馬野

第 6 回

「ファジィ システム シンポジウム」

講 演 論 文 集

期　日　　1990年９月６日(木)、７日(金)、８日(土)

会　場　　明 治 大 学　（ 和 泉 校 舎 ）

SOFT

主催　日本ファジィ学会

(Japan Society for Fuzzy Theory and Systems)

第6回

ファジィ システム シンポジウム

－ 知的システムの構築に向けて －

講演論文集

期日： １９９０年　９月６日（木）、　７日（金）、　８日（土）

会場： 明治大学（和泉校舎）
〒168　東京都杉並区永福１－９－１
京王線・井の頭線明大前駅下車徒歩５分
電話　03-321-8799

主催： 日本ファジィ学会（ＳＯＦＴ）
〒231　神奈川県横浜市山下町８９－１　シイベルヘグナービル４階
国際ファジィ工学研究所内　電話 045-212-8253

共催： 国際ファジィシステム学会（ＩＦＳＡ）日本支部
明治大学情報科学センター

協賛： 計測自動制御学会、システム制御情報学会、日本オペレーションズ・リサーチ学会、日本行動計量学会、日本経営工学会、情報処理学会、電子情報通信学会、電気学会、日本人間工学会、日本機械学会、土木学会、日本医療情報学会、人工知能学会、日本ロボット学会

第６回ファジィシステムシンポジウムの開催に当たって

日本ファジィ学会会長
浅居　喜代治（大阪工業大学）

ファジィシステムシンポジウムは、国際ファジィシステム学会日本支部によって1985年５月に第１回が開催されてから、毎年１回ずつ行われ、昨年６月に第５回を迎えた。この５回目のシンポジウムのときに、日本ファジィ学会が設立せられ、その理事会で、伝統のある日本支部主催のシンポジウムを、学会の年次大会として継承する方向が出されたので、今回、学会主催の第６回シンポジウムを開催する運びとなった次第である。

このシンポジウムの第１回の発表件数は２７件、前回の第５回は８１件で、今回はさらに上回り１３５件（デモセッション含）にのぼっている。この５年間は、ファジィの考え方が世間に認められ、その応用が日本を中心にして大きく発展した時期である。少し振り返ってみると、国際ファジィシステム学会（ＩＦＳＡ）設立（1984）、同日本支部発足（1985）、ファジィ推論用素子の開発（1984-85）、ファジィ制御の実用化（1985）、ＩＦＳＡ第２回会議（東京、1987），ＩＦＳＡ国際ワークショップ（飯塚、1988）、国際ファジィ工学研究所設立・科学技術庁プロジェクト発足（1989）、ファジィシステム研究所設立・ＩＦＳＡ等のよるファジィ－ニューロ国際会議（飯塚、1990）のようになり、学会の設立も行われ、産・官・学の連係のもとに活発な研究活動が展開された。従って、シンポジウムの発表でも、産業界によるものが年々多くなり、またこれを受けて、その基礎となる方法論、他技術との連係、新規応用分野についての学界側発表も増加してきた。これらに対する国の各省庁や、都道府県などの官側の支援も活発化している。やがて、日本がファジィ分野で、世界のリーダシップをとることとなるものと考えられる。

このような状況のもとに、ここに第６回シンポジウムが開催され、多くの研究者、技術者が結集して、それぞれの成果を発表・討論し、今後のファジィの発展の基礎を固めようとすることは、極めて意義深いものといえる。参加者各位には、この機会に、活発な研究や技術の交流、親密なコミュニケーションを進めて、実りある成果をあげて頂ければ幸いである。

終わりに、このシンポジウムの開催に当たって、種々お世話頂いた関係各位に心から謝意を表する。

第６回ファジィシステムシンポジウム
開催に当たって

”ファジィ”が最近のように誰でも知っているような流行語になるとは想像もしなかったが、これまで技術関係の人達の間では、徐々にファジィ理論の有用性が認識され、着実にその成果が蓄積されて来ていた。これには、これまでのこのファジィシステムシンポジウムの果たして来た役割が大変大きかったはずである。事実、ＩＦＳＡ（国際ファジィシステム学会）日本支部が結成された１９８５年を記念して開催された第１回ファジィシステムシンポジウムから数えて今年で６回目を迎えることになったが、この間、ファジィシステムシンポジウムの開催と共にファジィ理論の基礎と応用とは確実に進歩、発展してきた。これに従い、毎回、本シンポジウムの参加者と発表者とは着実に増加して来ている。今回は、”ファジィブーム”の中で開かれるという点からも、更に日本ファジィ学会（ＳＯＦＴ）が新しく結成されて最初のシンポジウムであるという意味からも記念すべきシンポジウムであると言えよう。招待講演、特別講演及び一般講演と共に、新しくデモンストレーションセッションを設けたのも今回の特徴となっている。

現代の高度情報化社会において、ファジィ理論の目指すところは極めて重要である。ファジィ理論の発展は、今後の人間に優しい科学技術にとって、本質的な役割を果たすはずである。ファジィ理論の将来にとって、今回のシンポジウムが新たな発展の一つの礎となれば幸いである。

なお、本シンポジウムの開催は、中西祥八郎プログラム委員長をはじめ、実行委員会の各委員の御尽力によるものです。ここに深く感謝する次第です。

１９９０年９月　　第６回ファジィシステムシンポジウム
実行委員会委員長　　向殿　政男

第6回
ファジィ システム シンポジウム

－ 知的システムの構築に向けて －

主 催　日本ファジィ学会（ＳＯＦＴ）
共 催　国際ファジィシステム学会（ＩＦＳＡ）日本支部
　　明治大学情報科学センター
協 賛　計測自動制御学会、システム制御情報学会、日本オペレーションズ・リサーチ学会、日本行動計量学会、日本経営工学会、情報処理学会、電子情報通信学会、電気学会、日本人間工学会、日本機械学会、土木学会、日本医療情報学会、人工知能学会、日本ロボット学会

■期　　日：　１９９０年　９月６日（木）、　７日（金）、　８日（土）
■会　　場：　明治大学　和泉校舎　（電話 043-321-8799）
　　東京都杉並区永福１－９－１
　　（京王線・井の頭線明大前駅下車徒歩５分）

■特別講演：　９月６日（木）１１：００～１２：００
あいまいさに対する方法論的考察
　　－計測・制御工学の立場から－　……北 森 俊 行（東京大学教授）
■招待講演：　９月７日（金）１０：００～１１：００
非決定の決定
　　－経済人類学の立場から－　……栗本 慎一郎（明治大学教授）
■講演発表：　一般セッション：１２４件
ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑ解析(3件), ﾌｧｼﾞｨｸﾞﾗﾌ(4件), ﾌｧｼﾞｨ集合(3件), ﾌｧｼﾞｨ推論(9件),
ﾌｧｼﾞｨ制御(11件), ﾌｧｼﾞｨ積分(3件), ﾌｧｼﾞｨ測度(3件), ﾌｧｼﾞｨ知的情報処理(3件),
ﾌｧｼﾞｨ同定(3件), ﾌｧｼﾞｨﾌﾟﾛｾｯｻ(3件), ﾌｧｼﾞｨﾌﾟﾛｸﾞﾗｸｼｮﾝｼｽﾃﾑ(6件), ﾌｧｼﾞｨ論理(3件),
あいまい表現(3件), 安定性(3件), 意志決定(3件), ｴｷｽﾊﾟｰﾄｼｽﾃﾑ(3件), 学習(4件),
画像検索・認識・理解(6件), 言語(3件), 言語ﾓﾃﾞﾘﾝｸﾞ(3件), 支援ｼｽﾃﾑ(4件),
色彩(2件), 線形計画(4件), 多段推論(3件), ﾁｭｰﾆﾝｸﾞ(4件), ﾆｭｰﾗﾙﾈｯﾄﾜｰｸ(7件),
ﾊｰﾄﾞｳｴｱ(7件), 評価・判別(3件), ﾌﾟﾛｾｽ制御(5件), ﾛﾎﾞｯﾄ(3件)

デモンストレーションセッション：１１件

参 加 費：　会員 6,000円、非会員 10,000円　（但し、協賛学会員は 8,000円）、
学生 3,000円　（共に、講演論文集を含む。当日、会場受付にてお支払い下さい）
懇 親 会：　９月６日（木）　１８：３０～２０：３０
〔於　明治大学駿河台校舎百周年記念大学会館〕
懇親会費 5,000円

問い合わせ先：　中西 祥八郎：東海大学工学部電気工学科（プログラム担当）
〒259-12　神奈川県平塚市北金目１１１７
TEL 0463-58-1211, EXT 4025
FAX 0463-58-1812

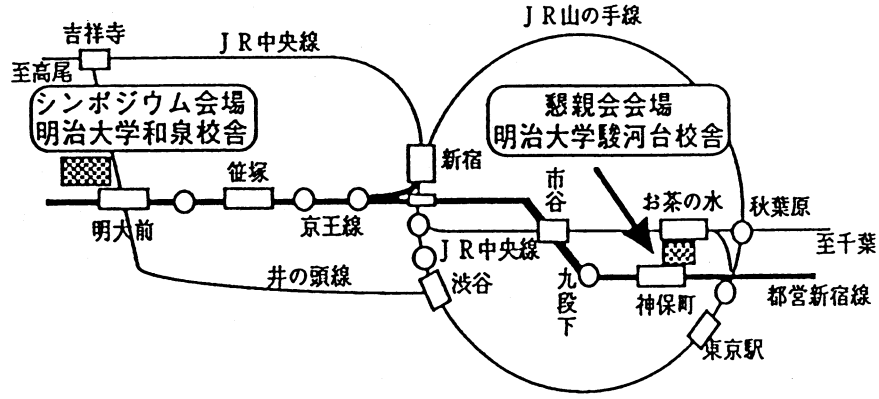
会場案内図

主要駅よりシンポジウム会場への道順

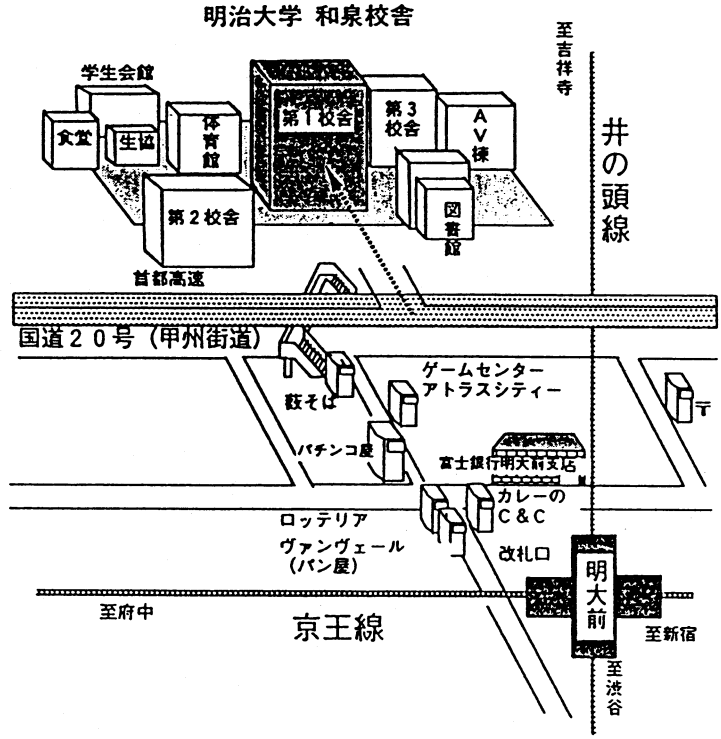
東京駅より：ＪＲ中央線で新宿駅まで行き、京王線に乗り換え明大前駅で下車

新宿駅より：京王線明大前駅で下車

渋谷駅より：井の頭線明大前駅で下車



シンポジウム会場：
明治大学 和泉校舎



シンポジウム実行委員会

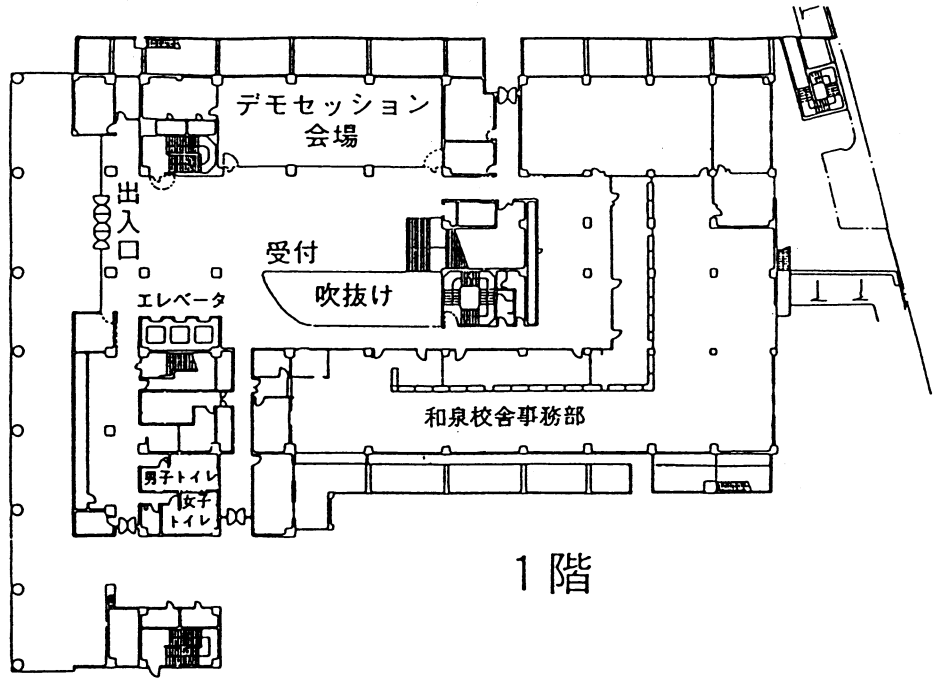
委員長　向殿　政男

副委員長　中西祥八郎

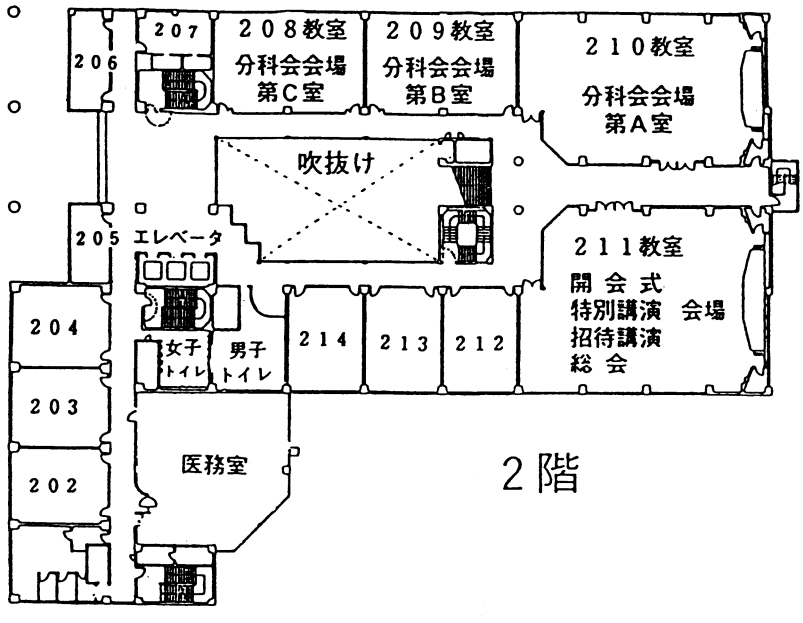
委　員　井口 幸洋　大里 有生　川口 誠人　後藤 賢治

鈴木 一如　中島 正夫　原 文雄　山崎 束

会場案合図：明治大学　和泉校舎内



1階



2階

第6回ファジィシステム

9月6日（木）

第1日	第A室	10:00～10:10 開会式	10:10～11:00 司会　鈴木　一如 （LIFE） **DM1** **デモセッション紹介**	11:00～12:00 司会　村上　周太 （九州工業大学） **TS1　特別講演** 講演者　北森　俊行 （東京大学）	13:00～14:00 司会 野本　弘平　三菱電機 **TA1　ファジィ制御1**	
	第B室				13:00～14:00 司会 中森　義輝　甲南大 **TB1　ファジィ論理**	
	第C室				13:00～14:00 司会 中島　信之　富山大 **TC1　ファジィ集合**	

9月7日（金）

第2日	第A室	10:00～11:00 司会　向殿　政男 （明治大学） **FS1　招待講演** 講演者　栗本　慎一郎 （明治大学）	11:00～12:00 **日本ファジィ学会総会**	13:00～14:00 司会 田中　英夫　大阪府大 **FA1　ファジィ同定**	
	第B室			13:00～14:00 司会 江澤　義典　関西大 **FB1　ファジィ推論2**	
	第C室			13:00～14:00 司会 上野　文男　熊本大 **FC1　評価・判別**	

9月8日（土）

第3日	第A室	10:00～11:00 司会 和多田淳三　大阪工大 **SA1　画像検索・認識・理解2**	11:10～12:10 司会 小田中敏男　都科技大 **SA2　安定性**	13:00～14:00 司会 後藤　賢治　LIFE **SA3　プロセス制御2**	
	第B室	10:00～11:00 司会 安信　誠二　LIFE **SB1　ハードウェア2**	11:10～12:10 司会 坂和　正敏　広島大 **SB2　ファジィ推論3**	13:00～14:00 司会 鬼沢　武久　熊本大 **SB3　多段推論**	
	第C室	10:00～11:00 司会 中村　和男　製科研 **SC1　色彩**	11:10～12:10 司会 市橋　秀友　大阪府大 **SC2　ファジィ知的情報処理**	13:00～14:00 司会 藪内　稔　学習院大 **SC3　あいまい表現**	

シンポジウム日程

	14:10～15:10 司会 伊藤　修　富士電機 **TA2　プロセス制御1**	15:20～16:20 司会 前田　博　九工大 **TA3　ロボット**	16:30～17:30 司会 山口　享　LIFE **TA4　ニューラルネットワーク1**
	14:10～15:10 司会 水本　雅晴　大阪電通大 **TB2　ファジィ推論1**	15:20～16:20 司会 馬野　元秀　大阪大 **TB3　エキスパートシステム**	16:30～17:30 司会 廣田　薫　法政大 **TB4　ファジィプロセッサ**
	14:10～15:10 司会 室伏　俊明　東工大 **TC2　ファジィ測度**	15:20～16:20 司会 和泉　孔二　阪南大 **TC3　ファジィ積分**	16:30～17:30 司会 奥田　徹示　大阪工大 **TC4　言語モデリング**

	14:10～15:30 司会 前田　幹夫　九工大 **FA2　チューニング**	15:40～16:40 司会 椎塚　久雄　工学院大 **FA3　画像検索・認識・理解1**	16:50～18:10 司会 五百旗頭正　明電舎 **FA4　ファジィ制御2**
	14:10～15:10 司会 片井　修　京都大 **FB2　ファジィプロダクションシステム1**	15:40～16:40 司会 塚本弥八郎　名城大 **FB3　ファジィプロダクションシステム2**	16:50～18:10 司会 戸貝　正喜　Togai IL Inc. **FB4　ハードウェア1**
	14:10～15:30 司会 宮本　定明　筑波大 **FC2　ファジィグラフ**	15:40～16:40 司会 椹木　哲夫　京都大 **FC3　意志決定**	16:50～17:50 司会 中西祥八郎　東海大 **FC4　言語**

	14:10～15:30 司会 林　勲　松下電器 **SA4　ニューラルネットワーク2**	15:40～17:00 司会 田中　一男　金沢大 **SA5　ファジィ制御3**
	14:10～15:30 司会 大里　有生　長岡技科大 **SB4　線形計画**	15:40～17:00 司会 山川　烈　九工大 **SB5　支援システム**
	14:10～15:30 司会 高木　友博　LIFE **SC4　ファジィシステム解析**	15:40～17:00 司会 山中　猛　LIFE **SC5　学習**

プログラムと目次

特別セッション

第S室（２１１教室）

第１日　９月６日（木）

セッションＴＳ１〔特別講演〕 11:00~12:00

〔司　会〕　村上周太（九州工業大学）

〔講演者〕　北森俊行（東京大学教授）

〔演　題〕　あいまいさに対する方法論的考察
－ 計測・制御工学の立場から － 3

第２日　９月７日（金）

セッションＦＳ１〔招待講演〕 10:00~11:00

〔司　会〕　向殿政男（明治大学）

〔講演者〕　栗本慎一郎（明治大学教授）

〔演　題〕　非決定の決定
－ 経済人類学の立場から －

一般セッション

第1日　9月6日（木）

第A室（２１０教室）

セッションＴＡ１　ファジィ制御１　１３：００～１４：００

司会　野本 弘平 （三菱電機（株））

TA1-1: ファジィ制御の改善法（IV）　（代数積－加算－重心法による場合）
水本 雅晴 （大阪電気通信大学） 9
TA1-2: ファジィ推論を用いた電縫管入熱制御システム
五百旗頭 正 （（株） 明電舎） 15
TA1-3: 貯水池実時間操作におけるファジィ制御の応用に関する研究
小尻 利治，藤井 忠直 （岐阜大学 ） 19

セッションＴＡ２　プロセス制御１　１４：１０～１５：１０

司会　伊藤 修 （富士電機（株））

TA2-1: 浄水場の凝集剤注入ファジィ制御
蓮本 了遠，守本 正範，伊藤 修，山岸 馨 （富士電機（株）） 23
TA2-2: ファジィ予測モデルによるプロセス制御
鈴木 一如 （国際ファジィ工学研究所），中森 義輝 （甲南大学）
山中 猛 （国際ファジィ工学研究所） 27

セッションＴＡ３　ロボット　１５：２０～１６：２０

司会　前田 博 （九州工業大学 工学部）

TA3-1: ファジィ制御によるアームロボットを用いた２次元不規則移動物体の把握
廣田 薫，渡辺 秀則 （法政大学 工学部） 33
TA3-2: 局所観測情報による適応型経路プランニングに基づく移動ロボットのファジィ制御
椹木 哲夫，片井 修，岩井 壮介，伊藤 公一 （京都大学 工学部） 37
TA3-3: 知能ロボットのファジィ走行制御
前田 幹夫 （九州工業大学 工学部），前田 靖 （新日鉄情報通信システム（株））
村上 周太 （九州工業大学 工学部） 45

セッションＴＡ４　ニューラルネットワーク１　１６：３０～１７：３０

司会　山口 享 （国際ファジィ工学研究所）

TA4-1: あいまいな教師信号を用いるニューラルエキスパートシステム
林 陽一，井村 敦 （茨城大学 工学部） 49
TA4-2: ファジィニューラルネットワークの構成法とその性能評価
堀川 慎一，古橋 武，大熊 繁，内川 嘉樹 （名古屋大学 工学部） 57
TA4-3: ニューラルネットワークを用いた自己組織化的ファジィ制御器の構成
采原 敬三，高木 敏幸 （東海大学 工学部），後藤 泰之 （名古屋大学 工学部）
中西 祥八郎 （東海大学 工学部） 63

第Ｂ室（２０９教室）

セッションＴＢ１　ファジィ論理　１３：００～１４：００

司会　中森 義輝 （甲南大学 理学部）

TB1-1: ファジィ測度に基づく多重様相意味論の一構成
村井 哲也 （札幌医科大学），宮腰 政明，新保 勝 （北海道大学 工学部） 67
TB1-2: ファジィ論理プログラムの線形導出
菊池 浩明 （（株）富士通研究所），向殿 政男 （明治大学 理工学部） 71
TB1-3: 古典述語論理計算ＬＫの拡張とそのファジィシステムへの応用
和泉 孔二 （阪南大学 商学部） 75

セッションＴＢ２　ファジィ推論１　１４：１０～１５：１０

司会　水本 雅晴 （大阪電気通信大学）

TB2-1: ファジィ推論の評価について
野島 和行，向殿 政男 （明治大学 理工学部） 79
TB2-2: ファジィエントロピー理論に基づいたファジィ推論方式の試み（第一報）
清水 昭雄 （宇部興産（株）） 83
TB2-3: 連想記憶システムを用いたファジィ推論
山口 享，高木 友博 （国際ファジィ工学研究所），銅谷 賢治 （東京大学） 93

セッションＴＢ３　エキスパートシステム　１５：２０～１６：２０

司会　馬野 元秀 （大阪大学 大型計算機センター）

TB3-1: ラフ集合による情報システムの縮小化とそのファジィ・エキスパート・システムへの応用
田中 英夫，石渕 久生 （大阪府立大学 工学部），松田 信義 （川崎医科大学） 97
TB3-2: ファジィエキスパートシステムにおける対象の状態推移の考慮とその応用
松原 行宏，長町 三生 （広島大学 工学部） 101
TB3-3: 火災判断ファジィエキスパートシステムの開発
兼田 真由美，中西 慎治，栗尾 孝，野村 淳二 （松下電工（株））
中森 義輝 （甲南大学 理学部） 105

セッションＴＢ４　ファジィプロセッサ　１６：３０～１７：３０

司会　廣田 薫 （法政大学 工学部）

TB4-1: Software Development Tools for the FC110 Digital Fuzzy Processor
J.Teichrow, E.A.Horstkotte, M.Togai （Togai InfraLogic, Inc.） 109
TB4-2: ファジィ推論プロセッサのためのファジィ化Ａ／Ｄ変換器
池田 博 （日産自動車（株）） 113
TB4-3: ファジィ推論専用プロセッサの開発
佐々木 守，上野 文男，井上 高宏 （熊本大学 工学部）
白井 雄二 （八代工業高等専門学校） 117

第C室（２０８教室）

セッションＴＣ１　ファジィ集合　１３：００～１４：００

司会　中島 信之（富山大学 経済学部）

TC1-1: メンバーシップ関数の一解釈とファジィ集合演算についての一提案
間渕 重昭（神戸商船大学） 121
TC1-2: 順序制約に基づいたファジィ集合概念の表現とその学習同定
片井 修，井田 正明，椹木 哲夫，岩井 壮介（京都大学 工学部） 125
TC1-3: エントロピーバランスを考えたファジィ数の演算
塚本 弥八郎（名城大学） 131

セッションＴＣ２　ファジィ測度　１４：１０～１５：１０

司会　室伏 俊明（東京工業大学）

TC2-1: Ｇöｄｅｌ含意を用いた様相測度に基づくファジィ数の順序付け指標
乾口 雅弘，久米 靖文（大阪府立大学 工学部） 135
TC2-2: 不等号関係に基づく種々のファジィ数の順序付け方法とそれらの相互関係
乾口 雅弘，久米 靖文（大阪府立大学 工学部） 139
TC2-3: ファジィ観測からの最尤推定
奥田 徹示，古殿 幸雄，前原 啓二，浅居 喜代治（大阪工業大学） 143

セッションＴＣ３　ファジィ積分　１５：２０～１６：２０

司会　和泉 孔二（阪南大学 商学部）

TC3-1: Choquet積分で表される多属性効用関数
室伏 俊明，菅野 道夫（東京工業大学） 147
TC3-2: ファジィ積分を使ったシナリオ評価
米田 稔，深海 悟，高木 友博（国際ファジィ工学研究所） 151
TC3-3: 相似線形構造の表現としてのChoquet積分に関する一考察
町田 元也（（株）日立製作所），室伏 俊明（東京工業大学） 155

セッションＴＣ４　言語モデリング　１６：３０～１７：３０

司会　奥田 徹示（大阪工業大学）

TC4-1: 数値データの言語モデリング
小沢 順（松下電器産業（株）），菅野 道夫（東京工業大学） 159
TC4-2: 最適モデルを用いたファジィデータベース検索のための自然言語インタフェース
前田 博（九州工業大学　工学部），石飛 康浩（富士ゼロックス（株）） 165
TC4-3: ファジィ理論を用いた言語モデルのシミュレーションの試み
浅見 真人（（株）日立製作所），菅野 道夫（東京工業大学） 169

第2日　9月7日（金）

第A室（２１０教室）

セッションFA1　ファジィ同定　１３：００～１４：００

司会　田中 英夫（大阪府立大学 工学部）

FA1-1: 可能性分布の同定手法によるファジィ ＩＦ－Ｔｈｅｎ ルールの構成
田中 英夫，石渕 久生（大阪府立大学 工学部），林 勲（松下電器産業（株））　175
FA1-2: 多変数ファジィ同定器
河村 廣，谷 明勲（神戸大学 工学部）　179
FA1-3: ファジィ対応の逆問題の超高速解法
林 陽一，井村 敦（茨城大学 工学部）　183

セッションFA2　チューニング　１４：１０～１５：３０

司会　前田 幹夫（九州工業大学 工学部）

FA2-1: ファジィ制御系のチューニング方法
林 真司（（株）東芝）　189
FA2-2: 一次遅れ＋むだ時間系におけるファジィコントローラの最適調整
朝山 宏，森永 智昭，佐野 学，田中 一男（金沢大学 工学部）　193
FA2-3: ニューラルネットワークを用いたメンバーシップ関数の学習法
山岡 正人，向殿 政男（明治大学 理工学部）　197
FA2-4: ブルドーザのファジィ制御
寺野 寿郎，増井 重弘，長屋 敬一（法政大学 工学部）　201

セッションFA3　画像検索・認識・理解1　１５：４０～１６：４０

司会　椎塚 久雄（工学院大学）

FA3-1: 双対測度に関するファジィ積分とその多属性パターン認識への応用
グラビッシュ・ミシェル，菅野 道夫（東京工業大学）　205
FA3-2: A Dynamic Memory Model for Scene Understanding
Weijing ZHANG and Michio SUGENO (Tokyo Institute of Technology)　211
FA3-3: On Osherson and Smith's contradiction
Kenpei Shiina (Waseda University)　215

セッションFA4　ファジィ制御2　１６：５０～１８：１０

司会　五百旗頭 正（（株） 明電舎）

FA4-1: 下水ポンプ所へのファジィ制御適用
村瀬　雄一郎（東京都下水道局），臼井　正和，伊藤 修　（富士電機（株））　219
FA4-2: ファジィ時制推論によるむだ時間システムの制御
今崎 直樹（（株）東芝）　223
FA4-3: 地震力を受けるシェル構造へのファジィ制御の応用
新宮 清志，川西 利昌（日本大学 理工学部），春本 光紀（旭化成）
船本 大蔵（日本大学 大学院）　227
FA4-4: ファジィを用いた時定数適応型モータ サーボコントロール
高木 啓史，Bigge Franz
（トムソン コンシューマ エレクトロニクス Ｒ＆Ｄ研究所）　231

第Ｂ室（２０９教室）

ｾｯｼｮﾝＦＢ１　ファジィ推論２　１３：００～１４：００

司会　江澤 義典（関西大学 工学部）

FB1-1: いわゆるマムダニの含意について
　　中島 信之（富山大学 経済学部）　235
FB1-2: マムダニ推論と合成した自動ルール作成型ファジィ推論法
　　江端 智一，八木 建史，石原 好之，戸高 敏之（同志社大学 工学部）　239
FB1-3: 近似推論方式を用いたファジィ推論基本処理のシステム化
　　小木 元，横山 一也，中村 和男（製品科学研究所）　243

ｾｯｼｮﾝＦＢ２　ファジィプロダクションシステム１　１４：１０～１５：１０

司会　片井 修（京都大学 工学部）

FB2-1: ファジィ・フレーム・システムについて
　　－ ファジィ・プロダクション・システムとの結合 －
　　角井 将史（大阪大学 基礎工学部），馬野 元秀（大阪大学 大型計算機センター）
　　宮原 秀夫（大阪大学 基礎工学部）　247
FB2-2: ファジィ・プロダクション・システムにおけるファジィ・パターン・マッチングについて
　　馬野 元秀（大阪大学 大型計算機センター）　251
FB2-3: ファジィ・プロダクション・システムにおける後向き推論の実現
　　馬野 元秀（大阪大学 大型計算機センター），江澤 義典（関西大学 工学部）
　　中嶋 直紀（関西大学大学院）　255

ｾｯｼｮﾝＦＢ３　ファジィプロダクションシステム２　１５：４０～１６：４０

司会　塚本 弥八郎（名城大学）

FB3-1: ファジィエキスパートシステム構築支援ツール ＬＩＦＥ ＦＥＳｈｅｌｌ
　　深海 悟，三好 力，小山 宏，高木 友博（国際ファジィ工学研究所）
　　馬野 元秀（大阪大学 大型計算機センター）　259
FB3-2: ＬＩＦＥ ＦＥＳｈｅｌｌにおけるファジィプロダクションシステム
　　小山 宏，三好 力，深海 悟，高木 友博（国際ファジィ工学研究所）
　　馬野 元秀（大阪大学 大型計算機センター）　263
FB3-3: ＬＩＦＥ ＦＥＳｈｅｌｌにおけるオブジェクトエディタ
　　三好 力，深海 悟，小山 宏，高木 友博（国際ファジィ工学研究所）
　　馬野 元秀（大阪大学 大型計算機センター）　267

ｾｯｼｮﾝＦＢ４　ハードウェア１　１６：５０～１８：１０

司会　戸貝 正喜（Togai InfraLogic, Inc.）

FB4-1: A VME-based Parallel Fuzzy Processing System
　　E.A.Horstkotte, R.J.Corder, M.Togai（Togai InfraLogic, Inc.）　271
FB4-2: α－カット変換チップ
　　徳永 秀和，勝亦 敦，安信 誠二（国際ファジィ工学研究所）　275
FB4-3: ファジィ集合演算チップ
　　勝亦 敦，徳永 秀和，安信 誠二（国際ファジィ工学研究所）　279
FB4-4: 補間機能を持たせた多入力ファジィ推論ボード
　　大谷 正幸，芦田 隆次，蜂巣 史良（マイコム（株））
　　廣田 薫（法政大学 工学部）　283

第C室（２０８教室）

セッションＦＣ１　評価・判別　１３：００～１４：００

司会　上野 文男（熊本大学 工学部）

FC1-1: ファジィ論理によるカーネーション苗の判別
寺野 寿郎，増井 重弘，田中 民雄（法政大学 工学部）
藤原 英幸（日本たばこ（株））　287

FC1-2: ファジィ行列階数の評価アルゴリズム
荒木 宏之，影井 清一郎（横浜国立大学 工学部）
大里 有生（長岡技術科学大学 工学部）　291

FC1-3: 可能性回帰分析の応用と評価　－ 日本の広告費の予測 －
森本 正昭（（株）電通），秋元 武（（株）プラスアイ・システム）
和多田 淳三（大阪工業大学）　295

セッションＦＣ２　ファジィグラフ　１４：１０～１５：３０

司会　宮本 定明（筑波大学 電子・情報工学系）

FC2-1: ファジィグラフの核と連結度との関係について
森岡 正臣（宮城教育大学）　299

FC2-2: ファジィグラフ応用した教材分析法
勝又 保雄（目黒高校），津田 栄（国学院高校），山下 元（早稲田大学）　303

FC2-3: 核酸配列分析へのファジィマッチング関数の応用
三宅 輝久，宮本 定明，中山 和彦（筑波大学 電子・情報工学系）　307

FC2-4: ファジィ理論を応用したソシオメトリー分析Ⅱ
津田 栄（国学院高校），勝又 保雄（目黒高校），山下 元（早稲田大学）　311

セッションＦＣ３　意志決定　１５：４０～１６：４０

司会　椹木 哲夫（京都大学 工学部）

FC3-1: ファジィ・ベイズ意思決定法則における一研究
植村 芳樹（奈良工業高等専門学校）　315

FC3-2: ファジィ関係式の区間値記号解法
韓 生廉，関口 隆（横浜国立大学 工学部）　319

FC3-3: 意志決定問題におけるファジィ測度の非加法性に関する考察
松下 裕，勝倉 裕，大江 守之（清水建設）　323

セッションＦＣ４　言語　１６：５０～１７：５０

司会　中西 祥八郎（東海大学 工学部）

FC4-1: 言語にかかわるあいまいさの分類と１～２の応用例　～ファジィ評価と文脈の視覚化～
北垣 郁雄（職業訓練大学校）　327

FC4-2: ファジィ集合の言語近似　－ シフト形ファジィ修飾語の検討 －
江澤 義典（関西大学 工学部），馬野 元秀（大阪大学 大型計算機センター）
井本 博之（関西大学大学院）　331

FC4-3: 言語的確率表現用語の心理学的研究
竹村 和久（光華女子短期大学 情報処理研究室）　335

第3日　9月8日（土）

第A室（210教室）

ｾｯｼｮﾝSA1　画像検索・認識・理解2　10：00～11：00

司会　和多田 淳三（大阪工業大学）

SA1-1: ファジィ画像検索について
宮本 定明（筑波大学 電子・情報工学系），小西 信明（筑波大学 理工学研究科）
三宅 輝久（筑波大学 電子・情報工学系）　341
SA1-2: ファジィ理論を用いた手書き数字の認識
中田 浩史，佐野 学，田中 一男（金沢大学 工学部）　345
SA1-3: ファジィ構造モデルの官能検査への適用
長沢 伸也（亜細亜大学 経営学部）　349

ｾｯｼｮﾝSA2　安定性　11：10～12：10

司会　小田中 敏男（東京都立科学技術大学）

SA2-1: リアプノフの直接法を用いたファジィシステムの安定解析と
リアプノフ関数の構成法について
田中 一男（金沢大学），菅野 道夫（東京工業大学）　353
SA2-2: ファジィ制御系の安定問題
北條 達也（山武ハネウエル（株）），寺野 寿郎，増井 重弘（法政大学 工学部）　357
SA2-3: 無限次元システムのファジィ・モデルについて
川瀬 真（長崎総合科学大学 工学部），柳原 二郎（千葉大学 理学部）　361

ｾｯｼｮﾝSA3　プロセス制御2　13：00～14：00

司会　後藤 賢治（国際ファジィ工学研究所）

SA3-1: 前塩素注入ファジィ制御システムの構築
津倉 洋，小須田 徹夫（（株）明電舎）　365
SA3-2: ファジィ制御の加熱炉温度制御への応用
谷 哲次（出光興産（株））　369
SA3-3: ファジィ理論を用いたガス吸収冷温水機制御
人見 和弘，小川 淳，前川 正弘，有馬 秀俊（三洋電機（株））　373

ｾｯｼｮﾝSA4　ニューラルネットワーク2　14：10～15：30

司会　林 勲（松下電器産業（株））

SA4-1: ニューラルネットワークを用いたRC床版の健全性評価システムのための知識獲得法
古田 均（京都大学 工学部），大谷 裕生（近畿日本鉄道（株））
白石 成人（京都大学 工学部）　377
SA4-2: ニューラルネットによる近似識別
石渕 久生，田中 英夫（大阪府立大学 工学部）　381
SA4-3: ニューラルネットワークとファジィ推論を用いたパターン認識
高木 敏幸，采原 敬三，中西 祥八郎（東海大学 工学部）　385
SA4-4: 人間の問題解決モデルを利用したヒューマンインタフェース用人工感情の実現
上石 陽一，中村 健，八重樫 清美，小山田 茂
村上 由美子（（株）アドイン研究所）　389

セッションＳＡ５　ファジィ制御３　１５：４０～１７：００

司会　田中 一男 （金沢大学）

SA5-1: ファジィアルゴリズムによる加速度制御系を用いたモーション制御
土川 浩史，松田 聡，大石 潔 （大阪工業大学） 395
SA5-2: 確率的バンバン制御について
小田中 敏男 （東京都立科学技術大学） 399
SA5-3: ファジィ状態メモリを利用したブレーキ制御回路
白井 雄二 （八代工業高等専門学校），佐々木 守，上野 文男，
井上 高宏 （熊本大学 工学部） 403
SA5-4: 光学法によるファジィ推論法
玉野 和保 （広島工業大学 工学部） 407

第Ｂ室（２０９教室）

セッションＳＢ１　ハードウェア２　１０：００～１１：００

司会　安信 誠二 （国際ファジィ工学研究所）

SB1-1: 高速化と回路の超小型化を実現するファジィコントローラのハードウェア化
佐々木 守，上野 文男，井上 高宏 （熊本大学 工学部）
白井 雄二 （八代工業高等専門学校） 411
SB1-2: ファジィ推論を用いたテープ走行系調整用視覚認識装置
鈴木 規之，岡橋 善一，岡 活範，藤原 博史（松下電器産業（株）） 415
SB1-3: 磁気ディスク装置へのファジィ推論応用
吉田 修一，都倉 光生，若林 則章 （松下電器産業（株）） 419

セッションＳＢ２　ファジィ推論３　１１：１０～１２：１０

司会　坂和 正敏 （広島大学 工学部）

SB2-1: 最急降下法によるファジィ推論の自動チューニングと障害物回避への応用
野村 博義，林 勲，若見 昇 （松下電器産業（株）） 423
SB2-2: ファジィＩＳＭにおける推移的結合の考察
若林 高明，大内 東 （北海道大学 工学部） 427
SB2-3: 遂次型ファジィ後向き推論への区間値ファジィの導入
野本 弘平，大橋 由昌，広瀬 保嘉，古川 裕之 （三菱電機（株）） 431

セッションＳＢ３　多段推論　１３：００～１４：００

司会　鬼沢 武久 （熊本大学 工学部）

SB3-1: 多重ファジィ推論と多段ファジィ推論
水本 雅晴 （大阪電気通信大学） 435
SB3-2: 多段型ファジィ推論シェルの構築　－多段推論機能と評価値最良探索機能－
林 勲，内藤 榮一，野村 博義，若見 昇 （松下電器産業（株））
馬野 元秀 （大阪大学 大型計算機センター） 441
SB3-3: 多段型ファジィ推論シェルの構築
－ウィンドウシステムを用いたユーザインターフェース－
山崎 久代，野村 博義，貞平 匡史，林 勲，若見 昇 （松下電器産業（株）） 445

セッションＳＢ４　線形計画　１４：１０～１５：３０

司会　大里 有生 （長岡技術科学大学 工学部）

SB4-1: ファジィ変数とファジィパラメータを含む多目的線形分数計画問題に対するパレート最適性
坂和 正敏 （広島大学 工学部），矢野 均 （名古屋市立女子短大） 449
SB4-2: ファジィ目標を考慮したファジィ係数を含む多目的非線形計画問題に対する新しい解の概念
坂和 正敏 （広島大学 工学部），矢野 均 （名古屋市立女子短大） 453
SB4-3: ファジィ線形計画法による多重成分スペクトルの分解
林 雅彦，影井 清一郎，佐藤 寿邦 （横浜国立大学 工学部） 457
SB4-4: ファジィアルゴリズムを用いた時系列情報からの特徴抽出に関する一考察
廣田 薫，生駒 哲一 （法政大学） 461

セッションＳＢ５　支援システム　１５：４０～１７：００

司会　山川 烈 （九州工業大学 工学部）

SB5-1: ファジィ予測支援システムとその環境問題への応用
甲斐沼 美紀子 （国立環境研究所），中森 義輝 （甲南大学 理学部）
森田 恒幸 （国立環境研究所） 465
SB5-2: キーワード間の関連性およびその漠度を用いた文献検索支援
吉田 裕見 （ＮＫＫ），廣田 薫 （法政大学 工学部） 469
SB5-3: 為替ディーリング・サポート・システムにおけるファジィ経済モデル
柳生 辰夫，深海 悟，高木 友博 （国際ファジィ工学研究所） 473
SB5-4: 縫製工場における工程編成支援システム構築に関する研究
荒木 攻，田部 勉，安瀬 美知子 （青山学院大学大学院） 477

第Ｃ室（２０８教室）

セッションＳＣ１　色彩　１０：００～１１：００

司会　中村 和男 （製品科学研究所）

SC1-1: 嗜好を考慮したファジィ色彩調和
稲村 聡，高木 敏幸，中西 祥八郎（東海大学 工学部） 481
SC1-2: 面積効果を考慮したファジィ色彩調和
稲村 聡，高木 敏幸，中西 祥八郎 （東海大学 工学部） 485

セッションＳＣ２　ファジィ知的情報処理　１１：１０～１２：１０

司会　市橋 秀友 （大阪府立大学 工学部）

SC2-1: オブジェクト指向パラダイムによるファジィ推論の表現
山本 創造，井上 由文，安信 誠二 （国際ファジィ工学研究所） 489
SC2-2: オブジェクトによるファジィ集合の表現
井上 由文，山本 創造，安信 誠二 （国際ファジィ工学研究所） 493
SC2-3: 信頼性解析のためのファジィ情報に関する二，三の考察
鬼沢 武久 （熊本大学 工学部） 497

セッションＳＣ３　あいまい表現　１３：００～１４：００

司会　藪内 稔（学習院大学）

SC3-1: 日常的コミュニケーション場面におけるあいまい表現に関する考察
中村 和男（製品科学研究所） 501
SC3-2: ファジィ・フェイスチャート
椎塚 久雄，玉木 博之（工学院大学） 505
SC3-3: 橋梁診断システムにおける主観的あいまいさの取扱い
宮本 文穂，森川 英典，益成 一郎（神戸大学 工学部） 511

セッションＳＣ４　ファジィシステム解析　１４：１０～１５：３０

司会　高木 友博（国際ファジィ工学研究所）

SC4-1: ファジィ推論による都市高速道路転換率モデルの作成と検討
邵 春福，秋山 孝正，佐佐木 綱（京都大学 工学部） 519
SC4-2: ＦＥＭのための要素自動分割へのファジィ理論の応用
吉川 徳重，近岡 秀男，本田 修一郎，佐野 学，田中 一男（金沢大学 工学部） 523
SC4-3: トンネル施工実績に基づくファジィ岩盤分類基準式
鈴木 昌次（（株）大本組），古川 浩平（山口大学 工学部）
古田 均（京都大学 工学部），井上 洋司（日本道路公団 広島建設局）
中川 浩二（山口大学 工学部） 527

セッションＳＣ５　学習　１５：４０～１７：００

司会　山中 猛（国際ファジィ工学研究所）

SC5-1: ＣＭＡＣ学習に基づくオペレータの制御戦略を有するファジィ障害物回避制御
前田 陽一郎，山中 猛（国際ファジィ工学研究所） 531
SC5-2: 逆キネマティクス－逆ダイナミクスモデルを学習するマニピュレータのファジィ制御
－ C^1級のファジィモデリング －
渡辺 俊彦（（株）神戸製鋼所），市橋 秀友（大阪府立大学 工学部） 535
SC5-3: 階層的ファジィモデルによる誤差逆伝播学習
－ オンラインのＧＭＤＨアルゴリズム －
市橋 秀友（大阪府立大学 工学部） 539
SC5-4: ファジィラベリング機能付き学習制御
有川 晴彦（アーク・テクノリサーチ（株）），水本 雅晴（大阪電気通信大学） 543

デモンストレーションセッション

第1日　9月6日（木）

第S室（211教室）

セッションDM1　デモンストレーション紹介　10：10～11：00
司会　鈴木一如　（国際ファジィ工学研究所）

DM1-1:　ファジィツール
　　蔦敏和　（ダイダン（株））　---

DM1-2:　シミュレーションゲームへのファジィ理論の適用
　　広内哲夫，宮川裕之　（文教大学情報学部）　549

DM1-3:　ファジィ制御設計支援ソフトFUZZIC－1，AMADEUS
　　博田忠邦，増田次郎　（三菱原子力工業（株））　553

DM1-4:　カラーコピー系における感性を考慮したファジィ画像処理
　　福島清司，藤原義久，源野広和，蚊野浩，米田広一　（三洋電機（株））　555

DM1-5:　ファジィ多変量解析パッケージについて
　　吉岡雅人，秋元武　（（株）プラスアイ・システム）　557
　　森本正昭　（（株）電通）

DM1-6:　ファジィ制御によるヘリコプターのホバリング
　　西野順二，室伏俊明，菅野道夫　（東京工業大学）　559

DM1-7:　多入力ファジィ推論ボードを用いた模型ヘリコプタの制御
　　蜂巣史良（マイコム（株）），関谷庸男（法政大学），
　　大谷正幸，芦田隆次　（マイコム（株）），廣田薫　（法政大学）　561

DM1-8:　ファジィ推論を用いたダーツ投げマニピュレータシステム
　　廣田薫，井上雅彦，永田康紀　（法政大学）
　　大谷正幸，蜂巣史良，芦田隆次　（マイコム（株））　563

DM1-9:　汎用オペレーションシステム上で稼働するファジィ制御システム
　　柳原弘彦，祝原栄治　（オーシーエンジニアリング（株））　565

DM1-10:　デジタルファジィプロセッサによる倒立振子の実演
　　松井一憲，土岐良元　（日邦産業（株））　---
　　戸貝 正喜　（Togai InfraLogic, Inc.）

DM1-11:　ファジィAIによるマシン機能マネジメントシステム
　　高田邦雄　（オムロン（株））　---

特　別　講　演　論　文

9月6日（木）

ｾｯｼｮﾝ　ＳＡ１　〔特別講演〕　　司会　村上 周太 （九州工業大学）

演題：　あいまいさに対する方法論的考察
－計測・制御工学の立場から－

講師：　北 森 俊 行 （東京大学教授）

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

あいまいさに対する方法論的考察

――とくに計測・制御工学の立場から――

東京大学工学部　北森俊行

人間の言葉の意味，判断や行動のあいまいさを扱う理論が重要なことは言をまたない．ファジー理論はその問題に対するひとつのチャレンジである．しかしそれが唯一可能な理論であろうか．いろいろなアプローチがあって良いのではないか．とくに工学的な立場から考えてみたい．

1　一般の理論とあいまい理論

理論の効用はその予知，予測の能力にある．実際にその状況に遭遇しなくても，あるいは実験しなくてもどうなるかが判ることである．われわれのもっている知識はそういった効用をもったものの集積であり，それを整理体系化して未経験の事象に対してまで判断できるようにしたのが理論である．その意味ではあいまいさを減らして，予知，予測の分解能が高いことが期待されている．しかもいつどこで誰が使っても同じ問題に対しては同じ答えがもたらされるという客観性が期待されている．

あいまい理論はどういう理論なのか．（a）人間の言葉の意味，判断や行動のあいまいさがどのようなものであり，推論の過程でどう伝播していくのか，という問題を心理学のように客観的にとらえようとするのか．（b）人間のあいまいさが（特に東洋では）物事をうまく処理するのに役立っているようであるから，それを工学的に役立てられるようにしようというのか．（c）何をするにしても完全には判らない部分があり得るから，そのような意味でのあいまいさの存在下で何ができるかを明らかにしようとしているのか．あるいはもっと他の問題意識があるかも知れない．ことによると，あいまいさを対象とする研究者一人一人異なった問題意識をもって研究しているのかも知れない．

部外者に聞えてくるあいまい理論は（a）のような科学ではないし，（c）のような工学でもない．どうも（b）のような思想？のように感じられる．しかし，人間のもつあいまいさが真にわれわれにとって有効に働いているのかどうか，また有効だとすればどういう意味で有効なのか，客観性をもたせる必要がある．

異常が起これば，あるいは事故が起これば，われわれは疑いもなくそれを解明しようとする．そうしないとふたたび同じような事故を引起こすかもしれないと当然考えている．したがって，よしんば人間があいまいさを有効に働かせているとしても，それを工学の領域にまで持込んでよいものかどうかは十分考える必要がある．あいまいなままの知識よりはあいまいさを減らした知識の方があいまいなままの知識を包含している．したがって，あいまいさを減らした知識に基づいた推論やシステム設計が，あいまいなままの知識を使った推論やシステム設計に劣ることはあり得ない．

2　ファジー理論の様相

理論は問題提起と数学的操作と解釈・評価の繰返しで発展するが，そのあるフェーズに関心が囚われてしまって，理論全体のバランスが崩れることが起こり得る．近年の工学的理論の中には特に数学的操作に熱中するあまり，提起された問題から遊離しそうなものがあるように思われる．ファジー理論を眺めるに，一度ファジー集合でグレイドを設定してしまえば，そこから先の計算は完全に厳密である．この数学的操作にはあいまいさは全くない．そして計算結果を解釈し，直感と合っていればその方法は正しかったと判断する．したがってあいまいさの議論はファジー集合の設定と計算結果の解釈・評価に押込められてしまっていて，数学的操作との遊離が著しい．そういう様相を呈している理論も無くはない．しかし数学的に厳密な扱いをする過程ではパラメータの値のわずかな変化に対して結果が不連続的に変化するようなことが起こり得る．ファジー推論の中でもパラメータの値は連続的に変化しているのに解が存在しなかったり急に現れたり，跳躍したりする．あいまいさというのはあいまいさ故にもっとなだらかに変化するものではないだろうか．

もちろん，計算に max，min などを使うとすれば，それはあいまい論理に妥当であるとの判断があるからであり，論理和，論理積，否定，If …，then …．の含意などにも幾つかの工夫がなされてはいる．これは結果的には，そこで工夫されている演算規則をみたす何ものかとしてあいまいというものを定義づけしていることに他ならない．あいまいさを陽に明示的に定義するのではなくて，一連の演算で操作されるものとして陰に定義されているわけである．非常に論理的で抽象度の高い理論かあるいは実用的であるが十分成長していない段階の理論にはこのような定義の方法を採用することがあるように思われる．しかし中間的で実用的な理論では扱う対象を陽に定義するのが普通である．

それがメンバーシップ関数であるのかも知れない．そうだとすると，メンバーシップ関数と演算操作の両方で定義していることになる．その結果，定義なのかも知れないメンバーシップ関数の立場をあいまいなものにしてしまっている．たとえばファジー数を表現するメンバーシップ関数はどのような演算の履歴を持っているかによってまちまちになる．いいかえるとファジー数を表現するメンバーシップ関数はそれ自体としては決めることができないことになってしまう．

結局あいまいさとは何かという問題に対する科学的研究がまず重要ということになろうか．

3　あいまいさに対するアプローチの可能性

あいまいさにも種々さまざまな内容が含まれている．そのあいまいさの多様性をファジー理論のように包括的に扱う方法は統計学や統計力学にも似て，非常に魅力的である．しかし統計力学が成功しているのは構成要素が同質だからである．異質な要素が多数混在している場合には統計学においても分離を試みる．異質なものを分類するのは数学や科学の理論構築の第一歩である．分類すれば必然的に問題毎の個別性が高くなるが，それだけ分解能の高い理論を構築できるようになる．

あいまいさにいろいろなものがあるとするならば，それなりの理由がある筈である．それを明らかにすれば分類ができる．

あいまいであるということは明白であるということの否定である．事物や言葉の意味が明白であるということはその事物や言葉に付随するいろいろな因子や属性についてすべて記述されているということである（そんなことが可能かどうかは別として，理想状態を考えて）．そのような意味での明白な表現の幾つかの因子の記述が欠落すると事物や言葉の意味があいまいになる．どの因子あるいは属性が欠落するかによっていろいろな種類のあいまいさが現れる．そこにあいまいさの多様性が現れるが，その全ては明白な表現の論理的否定としてリストアップできる（あいまいさの2重否定的定義）．A，B，C すべてが記述されているときを明白であるとすれば，それは論理積で

$$A\,B\,C \tag{3.1}$$

と書くことができる．そうすると，その否定であるあいまいは

$$\overline{A\,B\,C} = \overline{A}\,B\,C + A\,\overline{B}\,C + \cdots + \overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C} \tag{3.2}$$

すなわち $\overline{A}BC$ か $A\overline{B}C$ か ・・・ $\overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C}$ のいずれかということになるわけである．

記述が次第に綿密になっていくとあいまいさが減ってくる．その極限に明白がある．そういう意味であいまいと明白は連続的につながっている，あるいはあいまいの特別な場合が明白であると考えることができる．したがってあいまい理論と明白理論があったとすると両者は連続的につながっている，あるいは同一の理論の部分になっているべきである（理論の連続性あるいは整合性）．それは結局上の（3．1）と（3．2）を合せて扱うということに他ならない．

4　問題の記述とあいまいな問題

一般に問題を解決するとき，大別して

システマティックに解く

収束が保証された逐次解法で解く

試行錯誤的に解く

という3つの方法がある．できることならば勘や経験に頼らず，誰が（どんな素人でも）いつどこでやろうとも，定まった手順，有限回の手順で最もよい解に到達できる方法，試行錯誤を伴わない方法が望まれる．

いずれかの解（アイディア）の候補が他に比べて良いとすれば，それは何らかの条件を満たしているから良いと言えている筈である．したがって解は解であること，さらには良い解であることを規定する条件を満たしている筈である．したがって問題は条件式の集り，すなわち方程式で記述されるべきである．

方程式が与えられても，どの範囲から解を見つけだそうとしているのか，解の候補の集合が明示されていなければならない．したがって，問題は解の候補の集合と方程式とで明示的に記述されなければならない．方程式といっても通常の代数方程式や微分方程式に限る必要はない．

条件式の種類

実数，整数の方程式，不等式

論理方程式（2値論理，多値論理，ファジー論理，If ・・・，then ・・・．）

最適性の条件式，など

解の候補の集合

{実数}，{有理数}，{整数}，{正数}

{ｙｅｓ，ｎｏ}，{正常，異常}，{良，否}，{有，無}

{材料}，{部品}，{物}，{人}，{時}，{場所}，{システム}

{属性}，{構造}，{規模}

{方法}，{手続き}，{解き方}，{アルゴリズム}，{理論}，など

問題の記述が明白になれば，その記述のどこがあいまいかによって多様なあいまい問題が類別される．解の候補集合のあいまいさか条件式のあいまいさかによってあいまい問題が類別される．さらに条件式は幾つかの項（あるいは因子，要素），それらに作用する演算子，等号あるいは不等号から成っている．したがってそれらのどれがどうあいまいであるかによっても類別される．

5　計測方程式とあいまいさ

未知パラメータ　$p_1, p_2, \cdots, p_m$　の下で測定量 x に関するデータ y が得られる測定系

$$y = f(x ; p_1, p_2, \cdots, p_m) \qquad (5.1)$$

において，別途制御可能なパラメータ c を用意して，その値を変化させながら，連立方程式

$$\begin{aligned} y_1 &= f(x ; p_1, p_2, \cdots, p_m ; c_1) \\ y_2 &= f(x ; p_1, p_2, \cdots, p_m ; c_2) \\ &\cdots \quad \cdots \quad \cdots \\ y_n &= f(x ; p_1, p_2, \cdots, p_m ; c_n) \end{aligned} \qquad (5.2a)$$

さらに，既知の試料 x_0 を使って

$$\begin{aligned} y_{n+1} &= f(x_0 ; p_1, p_2, \cdots, p_m ; c_{n+1}) \\ y_{n+2} &= f(x_0 ; p_1, p_2, \cdots, p_m ; c_{n+2}) \\ &\cdots \quad \cdots \quad \cdots \\ y_{n+n'} &= f(x_0 ; p_1, p_2, \cdots, p_m ; c_{n+n'}) \end{aligned} \qquad (5.2b)$$

を立てる．これを計測方程式と呼ぼう．計測の本質はこのような方程式を立てて，未知パラメータ　$p_1, p_2, \cdots, p_m$　を消去しつつ，計測対象について知りたかった測定量の値

$$x = g(x_0 ; y_1, y_2, \cdots, y_n, y_{n+1}, y_{n+2}, \cdots, y_{n+n'} ; c_1, c_2, \cdots, c_n, c_{n+1}, c_{n+2}, \cdots, c_{n+n'}) \qquad (5.3)$$

を解くことである．方程式の種類を広げ，また解の候補の集合も広げていけば，単なる測定量の値を知るにとどまらず，一般に知りたいと思う知識を獲得する過程にも通用することになる．たとえば故障診断や異常診断はブール代数方程式あるいはファジー関係方程式を解く形に定式化することもできる．

そのように計測問題を表現したとき，あいまいな計測問題は前節の最後に述べたような種類のあいまいさが入ってくる可能性がある．

観測データのあいまいさは通常は誤差の範囲（統計的には信頼区間）$[x - \varepsilon_1, x + \varepsilon_2]$　などで表現している．

測定量の定義のあいまいさ（硬さ，美味しさ，規則性，・・・）

測定量とデータの間の関係のあいまいさ（測定量と関連があるデータが得られても関連（条件式）が明確でない場合）

未知パラメータの係わり合い（条件式）のあいまいさ

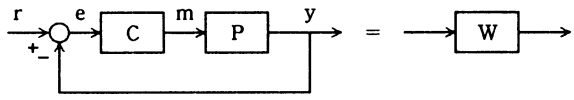
などがクローズアップされてくる．

6　制御系設計におけるあいまいさ

望ましい制御系（設計目標）が与えられ，制御方式を決めれば，制御系の設計方程式を書くことができる．図のような制御方式であると

き制御系の設計方程式は，与えられる制御対象を P，望ましい制御系の仕様を W，設計すべき制御装置を C としたとき，

$$\mathrm{inv}[\ \mathrm{par}[\ I,\ \mathrm{inv}\{\ \mathrm{ser}(\ P,\ C\ )\ \}\ ]\ ]\ =\ W \qquad (6.1)$$



(6.2)

となる．その解はシステマティックに解けて

$$C\ =\ \mathrm{ser}[\ \mathrm{inv}(\ P\ ),\ \mathrm{inv}\{\ \mathrm{par}(\ -I,\ \mathrm{inv}(\ W\ )\ )\ \}\ ] \qquad (6.3)$$

である．ここで P，C，W の表現は自由であるが，入力が与えられたら出力が計算でき，かつ２つの要素の直列接続，並列接続，また各要素の逆要素が計算できる表現でなければならない．線形時不変系では，直列接続，並列接続，逆要素の計算に便利な表現は伝達関数である．

伝達関数表現におけるあいまいさの物理的原因は寄生的要素，非線形性，時間的変動などにある．寄生的要素を完全に記述しきれないことにもとづくあいまいさは伝達関数表現

$$G(s)\ =\ \frac{b_0\ +\ b_1 s\ +\ b_2 s^2\ +\ b_3 s^3\ +\ \cdots}{a_0\ +\ a_1 s\ +\ a_2 s^2\ +\ a_3 s^3\ +\ a_4 s^4\ +\ \cdots} \qquad (6.4)$$

の“・・・”の部分に現れる．このことから制御系全体の伝達関数表現におけるあいまいさも同様に s の高次の項の係数に現れる．したがって望ましい制御系 W の仕様を条件式で与えるときその部分に対しては明白なことを指定しても設計計算では明白な結果が出せなくなる．ところがこの物理的世界は非常にうまくしたもので，このあいまいな部分は除外して設計しても良い制御系ができるのである（部分的モデルマッチング）．

7　ファジー制御と関連して

制御工学的には動的伝達要素の補償には動的伝達要素が要る．非線形性の補償には非線形性が要る．一般的には上の設計方程式の解（6．3）が示す通りである．制御対象の特性が制御装置の特性に反映している．望ましい制御系の仕様も制御装置に反映している．当然のことである．したがって制御装置はそれらを反映した構造をもたなければならない．制御対象や望ましい制御系の仕様におけるあいまいさとも整合がとれている構造でなければならない．

そのような制御装置・補償要素はメンバーシップ関数とデファジフィケーションを使わなくても容易に，システマティックに，理論の連続性を保ちつつ，作ることができる．

ファジー制御はチューニングのしやすさが特徴であるとの意見もあるが，それはメンバーシップ関数と積分によるデファジフィケーションを用いるなんらの必然性をも示唆しない．しかもあいまい理論からの逸脱ですらある．チューニングしやすい要素表現やチューニングの手続きは上述のような意味での構造を明白にし，さらに人間にとって判りやすいということがどういうことであるかを明白にしなければならないであろう．

第１節で述べた（ｃ）の意味でのあいまいさに対処するのに，いわゆるファジー制御に短絡する道しかないのではない．ここに述べたように制御系設計ということを明白にし，どういう構造であいまいさが入るのかを明らかにし，そのあいまいさを許す問題解決の道もあるのである．

一 般 セ ッ シ ョ ン 論 文

第1日

9月6日（木）

ｾｯｼｮﾝ ＴＡ１	〔ファジィ制御１〕	司会 野本 弘平 （三菱電機（株））
ｾｯｼｮﾝ ＴＡ２	〔プロセス制御１〕	司会 伊藤 修 （富士電機（株））
ｾｯｼｮﾝ ＴＡ３	〔ロボット〕	司会 前田 博 （九州工業大学 工学部）
ｾｯｼｮﾝ ＴＡ４	〔ニューラルネットワーク１〕	司会 山口 享 （国際ファジィ工学研究所）
ｾｯｼｮﾝ ＴＢ１	〔ファジィ論理〕	司会 中森 義輝 （甲南大学 理学部）
ｾｯｼｮﾝ ＴＢ２	〔ファジィ推論１〕	司会 水本 雅晴 （大阪電気通信大学）
ｾｯｼｮﾝ ＴＢ３	〔エキスパートシステム〕	司会 馬野 元秀 （大阪大学 大型計算機センター
ｾｯｼｮﾝ ＴＢ４	〔ファジィプロセッサ〕	司会 廣田 薫 （法政大学 工学部）
ｾｯｼｮﾝ ＴＣ１	〔ファジィ集合〕	司会 中島 信之 （富山大学 経済学部）
ｾｯｼｮﾝ ＴＣ２	〔ファジィ測度〕	司会 室伏 俊明 （東京工業大学）
ｾｯｼｮﾝ ＴＣ３	〔ファジィ積分〕	司会 和泉 孔二 （阪南大学 商学部）
ｾｯｼｮﾝ ＴＣ４	〔言語モデリング〕	司会 奥田 徹示 （大阪工業大学）

TA1-1

ファジィ制御の改善法（Ⅳ）
（代数積－加算－重心法による場合）

IMPROVEMENT OF FUZZY CONTROLS (Ⅳ) - CASE BY PRODUCT-SUM-GRAVITY METHOD -

水本雅晴
Masaharu MIZUMOTO

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

As the continuation of the works [1,2,3] on the improvements of fuzzy controls, this paper proposes new method for fuzzy control called product-sum-gravity method and compares with Mamdani's method known as min-max-gravity method. It is shown that the product-sum-gravity method is intuitive in nature and can get bettr control results than min-max-gravity method.

1. はじめに

論文[1,2,3]では、ファジィ制御法としてよく知られている Mamdani の方法に焦点を当て、いくつかの改善法について述べた。特に、論文[2]では、各ファジィ制御規則から得られた推論結果を統合する際に、従来の max を用いた統合ではなく、算術平均や双対な幾何平均・調和平均といった平均演算子を用いて統合すると制御結果の改善が見られることを示した。

本論文では、Mamdani のファジィ制御法として知られている「min-max-重心法」において min の代わりに代数積（掛け算）を用い、max の代わりに加算（足し算）による統合法を採用した「代数積-加算-重心法」を提案する。このファジィ推論法は直感にあい、「min-max-重心法」よりも良好な制御結果が得られることを示す。

2. ｍｉｎ－ｍａｘ－重心法

ファジィ制御やファジィプロダクションルールで使用される多重ファジィ推論形式

$$\begin{array}{l} \text{規則1: A1 and B1 => C1} \\ \text{規則2: A2 and B2 => C2} \\ \quad \cdots \\ \text{規則n: An and Bn => Cn} \\ \text{事 実: } u_\circ \text{ and } v_\circ \\ \hline \text{結 論: } \qquad C' \end{array} \qquad (1)$$

を考えてみよう。ここで、Ai は U での、Bi は V での、Ci は W でのファジィ集合である。$u_\circ$, $v_\circ$ はそれぞれ U, V の要素である。

事実「$u_\circ$ and $v_\circ$」と各規則「Ai and Bi => Ci」(i=1,…,n) から得られる推論結果 Ci' は

$$\mu_{Ci'}(w) = \mu_{Ai}(u_\circ) \wedge \mu_{Bi}(v_\circ) \wedge \mu_{Ci}(w) \qquad (2)$$

と与えられる。ただし、$\wedge$ = min である。

式(1)の最終的な結論である C' は、Ci'(i=1,…, n) の結び(U)をとることによって得られる。すなわち、v = max とすると

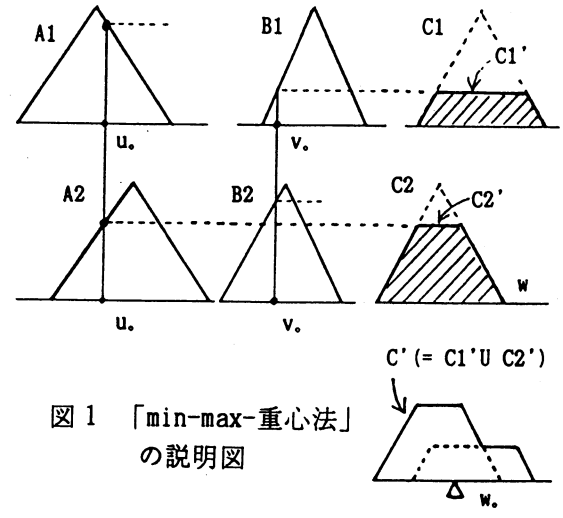


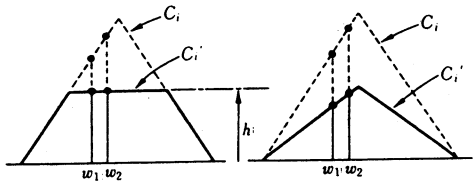
図１ 「min-max-重心法」の説明図

$$\begin{array}{l} C' = C1' \cup C2' \cup \cdots \cup Cn' \\ \mu_{C'}(w) = \mu_{C1'}(w) \vee \cdots \vee \mu_{Cn'}(w) \end{array} \qquad (3)$$

この最終的なファジィ集合 C' の代表値 $w_\circ$ を求める操作のことを一点化(defuzzifier)と呼び，次の重心法がよく使われる。

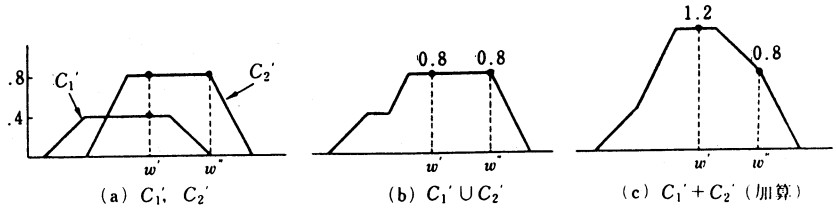
$$w_\circ = \frac{\sum w_i \cdot \mu_{C'}(w_i)}{\sum \mu_{C'}(w_i)} \qquad (4)$$

以上述べてきたファジィ推論法は Mamdani のファジィ推論法として有名であり、ファジィ制御法として最も多用されている。この方法は $u_\circ$ と $v_\circ$ が与えられてから $w_\circ$ を求めるまでに、まず式(2)で min (=$\wedge$) を、式(3)で max (=$\vee$) を、そして式(4)の重心法で代表点 $w_\circ$ を求めていることから「min-max-重心法」と呼ぶことにしよう（図１参照）。



(a) * = ^ (min)　(b) * = ・ (代数積)

図 2　$\mu_{Ci'}(w) = h * \mu_{Ci}(w)$



(a) C_1', C_2'　(b) $C_1' \cup C_2'$　(c) $C_1' + C_2'$ (加算)

図 3　ファジィ集合 C1', C2' の統合法

3. 代数積－加算－重心法

min-max-重心法によるファジィ推論法は min と max という非線形性の強い演算を用いていることから、その推論過程は必ずしも直感に合ったものではない。そこで本節では min の代わりに代数積（掛算）を、max の代わりに加算（足し算）を用いた「代数積-加算-重心法」を新たに提案する。この方法は直感に合い、また次節で示すようにmin-max-重心法よりも良好な制御結果を得ている。

今、事実「u_* and v_*」と規則「Ai and Bi => Ci」から得られる推論結果 Ci' の求め方をもう一度考えてみよう。min-max-重心法では式(2)からわかるように Ci' は、^ (=min) を用いて

$$\mu_{Ci'}(w) = h \hat{} \mu_{Ci}(w) \qquad (5)$$

のように与えられる（図 2 (a)参照）。ただし、

$$h = \mu_{Ai}(u_*) \hat{} \mu_{Bi}(v_*) \qquad (6)$$

この図で w1、w2 での高さ（"貢献度"）は w2 の方が高かったが、h との min(^) を取ることにより同じ高さになってしまう。ところが min の代わりに代数積(・)を用いると、Ci' は

$$\mu_{Ci'}(w) = h \cdot \mu_{Ci}(w) \qquad (7)$$

と与えられ（図 2 (b)）、これより w1, w2 の高さは同じ割合で低くなるだけで、お互いの順序は保たれる。このように貢献度の強さを継承する点からいえば min よりも代数積を使用する方が理にかなっているといえよう。

次に、式(3)の統合法について考えてみよう。簡単のため図 3 (a)の C1', C2' を考えて見よう。max を用いた統合 C' = C1' U C2' は

$$\mu_{C'}(w) = \mu_{C1'}(w) \vee \mu_{C2'}(w) \qquad (8)$$

と与えられることから、点 w', w" での高さは共に 0.8 となる（同図(b)参照）。ところで、C1' において w' での高さは 0.4 で、w" では 0 であるが、C2' においては w', w" 共に 0.8 である。高さを貢献度と考えた場合、w' では 0.4 と 0.8 の貢献度があるから、w" の 0 と 0.8 の場合よりも結果的には w' の方が貢献度が高いとするのが妥当であろう。しかしながら、max を用いた場合には同じ貢献度になってしまう。この貢献度の差を反映させるには max を用いるよりは加算(+)を用いる方がよいことが分かる。

$$\mu_{C'}(w) = \mu_{C1'}(w) + \mu_{C2'}(w) \qquad (9)$$

すると、w' での貢献度は 1.2(= 0.4+0.8) となり、w" では 0.8(= 0+0.8) となり、w' のほうが貢献度が高くなり、直感に合っていることがうなずける。

（注）式(9)のように max(v) の代わりに加算(+)を用いた場合、図 3 (c)のように C' の高さが 1 を越えることがある。その場合、2 で割って算術平均を取ったり[2]、1.2 で割って正規化することによって C' の高さを 1 以下に押さえることができる。しかし、最終的に C' の重心を取る点からいえば、加算のままであろうと算術平均や正規化を行おうと同じ重心値が得られるので、加算のままで十分であろう。

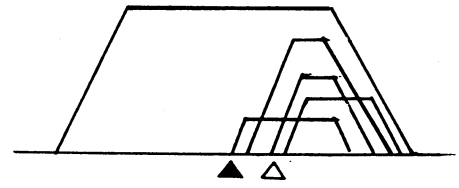


図 4　ファジィ推論結果が右側に沢山ある場合

もう 1 つの例を考えてみよう。いくつかの推論結果が図 4 のように右側にかたまっているとしよう。このような場合、右側に沢山の推論結果が存在しているから、代表点 w_* は中央より少し右寄りにあろうと考えるのは当然である。しかし、max で統合すれば統合結果は一番外側の推論結果に一致してしまい、その代表点（重心）w_* は中央(▲)に来てしまい、常識にあわない。ところが加算によって統合すると右側の推論結果の影響も考慮に入れることができ、重心（代表点）も右寄りの点(△)になることがうかがえる。

以上のことから、「min-max-重心法」において min のところを代数積に、max のところを加算に置き換えた「代数積-加算-重心法」を以下のように提案することができる[4,5]。

事実「u_* and v_*」と規則「Ai and Bi =>Ci」からの推論結果 Ci' は代数積(・)により

$$\mu Ci'(w) = \mu Ai(u_*) \cdot \mu Bi(v_*) \cdot \mu Ci(w) \qquad (10)$$

と与えられる。ただし、i=1,…,n である。

最終の C' は、各 Ci' (i=1,…,n) のグレードに加算(+)を施すことによって得られる。

$$C' = C_1' + C_2' + \cdots + Cn'$$
$$\mu C'(w) = \mu C_1'(w) + \cdots + \mu Cn'(w) \qquad (11)$$

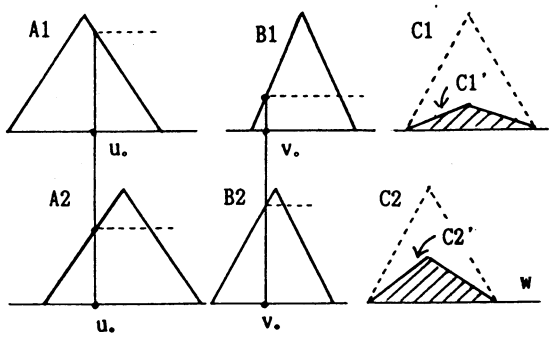
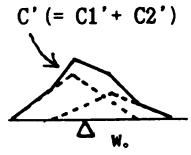


図5「代数積-加算-重心法」の説明図



最後に、式(4)の重心法によりファジィ集合 C' の代表値 w。が得られる（図5参照）。

以上のファジィ推論過程は「min-max-重心法」にしろ「代数積-加算-重心法」にしろ結局のところは、u。と v。が与えられたときの w。の求め方、すなわち w。= f(u。, v。) なる関数 f を提供するものである。

つぎに2種類のファジィ推論法「min-max-重心法」と「代数積-加算-重心法」を比較するために次のようなファジィ推論の例を考えてみよう。

【例】平面上の格子点 (u1, v1), (u1, v2), (u2, v1), (u2, v2)（ただし、u1<u2, v1<v2）での高さをそれぞれ w1, w2, w3, w4 とする。これをファジィ推論化して

$$\begin{array}{l} u1 \text{ and } v1 \Rightarrow w1 \\ u1 \text{ and } v2 \Rightarrow w2 \\ u2 \text{ and } v1 \Rightarrow w3 \\ u2 \text{ and } v2 \Rightarrow w4 \\ u_\circ \text{ and } v_\circ \\ \hline \qquad\qquad w_\circ \end{array} \qquad (12)$$

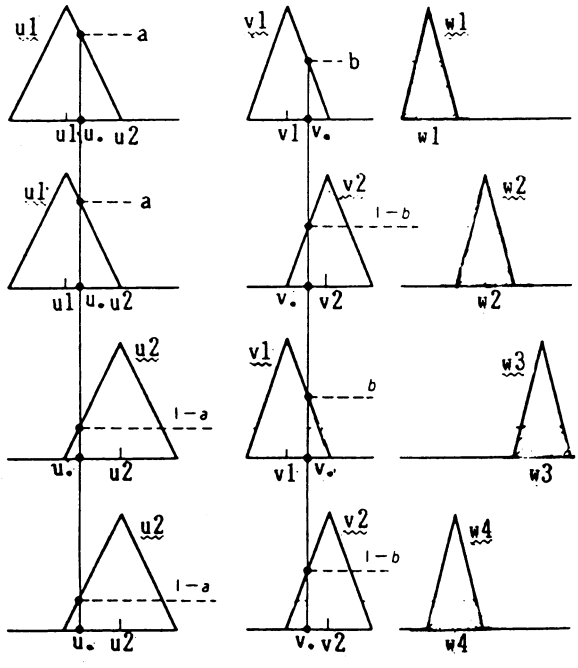
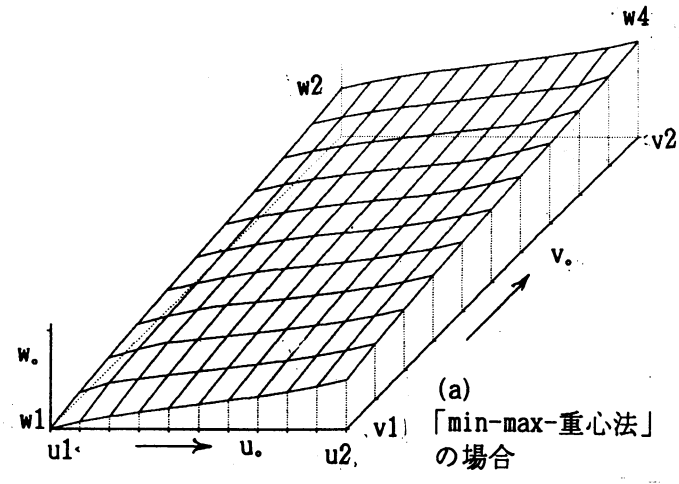


図6 式(12)のファジィ推論の説明図

とする。ここで、u1 は "u1 ぐらい" を表すファジィ集合である。また、ファジィ集合 u1, u2 は図6のように同じ幅の三角型であり、高さ 0.5 で交わるものとする。v1, v2 についても同様である。ただし、w1, w2, w3, w4 については同じ幅の三角型であるが、幅は自由であるとする。すると、例えば、高さ w1, w2, w3, w4 が同一平面上にあるような場合に、u。, v。に対する推論結果 w。を「min-max-重心法」と「代数積-加算-重心法」に適用して求めてみると図7(a), (b)のようになる。よく似た結果が得られているが、「min-max-重心法」の場合、平面とはなっていない。また、ファジィ集合 w1, w2, w3, w4 の幅が変われば曲面はわずかであるが変化する。ところが、



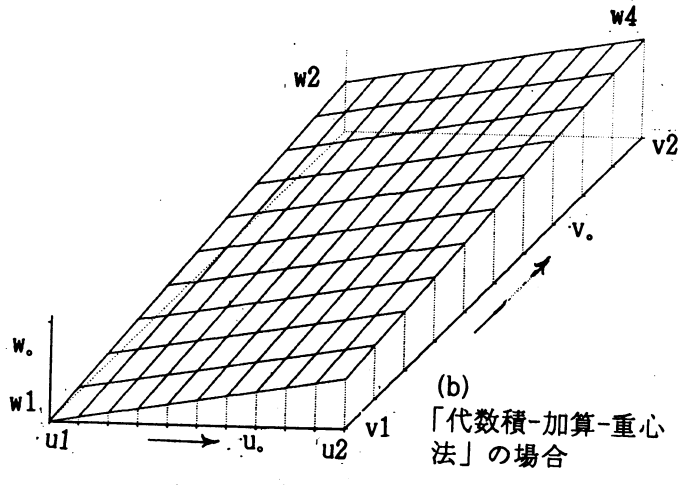


図7 式(12)の補間結果

「代数積-加算-重心法」の場合は平面になっており、w1, w2, w3, w4 の幅が変化しても平面が得られる。一般的に、「代数積-加算-重心法」の場合には、任意の高さ w1, w2, w3, w4 に対して

$$w_\circ = abw1 + a(1-b)w2 + (1-a)bw3 + (1-a)(1-b)w4 \qquad (13)$$

のような双2次形式で表される。ただし、

$$a = \mu_{u1}(u_\circ) = \frac{u2-u_\circ}{u2-u1} \;;\; b = \mu_{v1}(v_\circ) = \frac{v2-v_\circ}{v2-v1}$$

（参考）「min-max-重心法」の場合には、結果 w。は a, b の分数式となり、分母、分子共 a, b の複雑な双４次式となる。

次に、「min-max-重心法」と「代数積-加算-重心法」の下でファジィ制御を取り上げてみよう。直感にあう「代数積-加算-重心法」のほうが良好な制御結果を得ていることが示される。

4. ファジィ制御

対象とするプラントモデルは時間遅れを有する一次遅れの系で T dh/dt + h = q, 具体的には、G(s) = e^{-2s}/(1+20s) であるとする。また、e=偏差、△e=偏差の変化分, △q=操作の変化分である。

山崎ら[7]は一次遅れの系に対するファジィ制御規則を表１のように与えた。この13個の制御規則は e、△e より △q を評価するもので

```
e is NB and △e is ZO => △q is PB
e is NM and △e is ZO => △q is PM
            .....                    (14)
e is ZO and △e is PB => △q is NB
```

を意味する。ここで、NB (負で大)、NM (負で中位)、NS (負で小), ZO (零位), PS (正で小), PM (正で中位), PB (正で大) は [-6, 6] におけるファジィ集合である（図８参照）。

表１ ファジィ制御規則 e, △e→△q

e \ △e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB				PB			
NM				PM			
NS				PS			
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PS				NS			
PM				NM			
PB				NB			

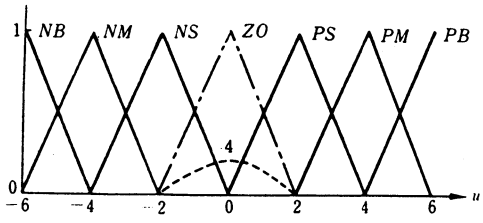


図８ ファジィ集合（幅 W = 4 の場合）

図９は、ファジィ集合 NB, NM, …, PB の幅 W を変化させた場合の「min-max-重心法」と「代数積-加算-重心法」による制御結果である。この図からも明らかなように「代数積-加算-重心法」の場合の方が立ち上がりが速く、オーバシュートも少なくなっていることがわかる。図10はファジィ集合の幅 W = 8 の場合の制御結果を取り出し比較したものである。図中、「min-加算-重心法」は、まず式(2)で min を使い、統合で式(11)の加算を使ったものである。また、「(min/代数積)-max-重心法」は式(2)の２つめの ^ の所で代数積を使い、すなわち

$$\mu_{Ci}'(w) = (\mu_{Ai}(u_o) \hat{} \mu_{Bi}(v_o)) \cdot \mu_{Ci}(w) \quad (15)$$

そして統合の際に max (式(3)) を用いたものであり、この方法は従来からよく用いられている手法である。図10からわかるように「代数積-加算-重心法」が最良の結果を得ており、「min-max-重心法」が最も悪い結果を得ている。また、minよりも代数積、maxよりも加算を使ったほうが良好な結果が得られていることがうなずける。

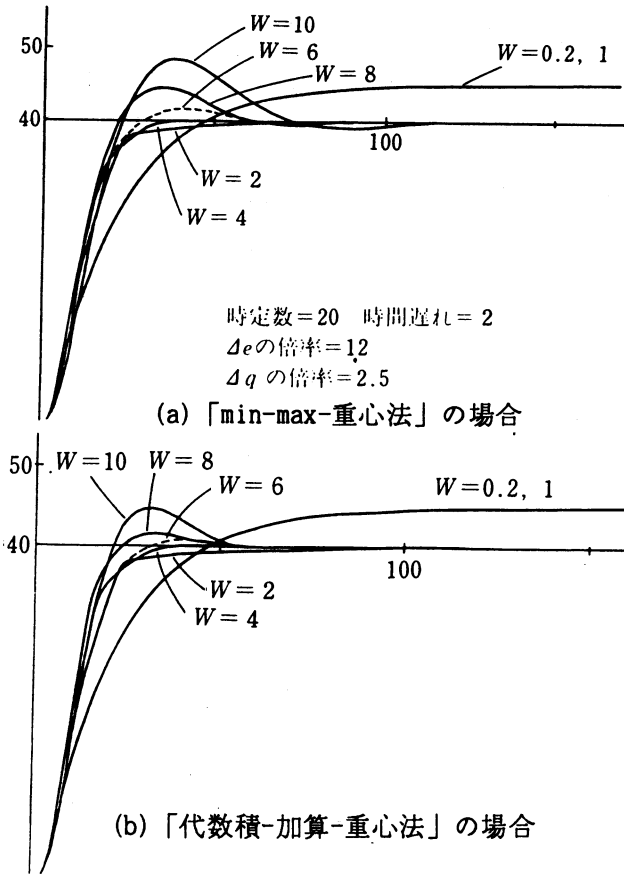


図９ 幅 W を変化させた場合の制御結果

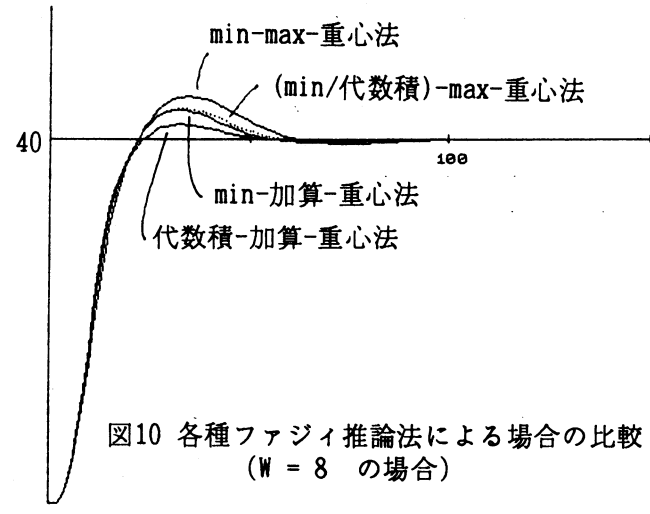


図10 各種ファジィ推論法による場合の比較
(W = 8 の場合)

なお、「(min/代数積)-max-重心法」の表記法は式(15)で最初に min (=^)を、次に代数積(·)を取ることを表しているが、この表記法を使うと「min-max-重心法」は「(min/min)-max-重心法」と表すことができ、同様に「代数積-加算-重心法」は「(代数積/代数積)-加算-重心法」のように表せる。したがって、種々の演算を組み合わせることによって「(代数積/min)-max-重心法」「(代数積/代数積)-max-重心法」「(min/代数積)-加算-重心法」「(代数積/min)-加算-重心法」といった種々のファジィ推論法を定義することができる。これらのファジィ推論法を使ってファジィ制御を行わせることができるが、図10と同じような制御結果が得られる（図省略）。この場合も、やはり「代数積-加算-重心法」が最良の結果を得ており、「min-max-重心法」が最も悪い結果を得ている。

最後に、「min-max-重心法」で使われている演算 min と max は互いに双対な演算であるが、「代数積-加算-重心法」における代数積と加算は双対な演算でない。そこで代数積と双対な演算である代数和を用いることによって「代数積-代数和-重心法」といったファジィ推論法を提案することができる。同様に「限界積-限界和-重心法」といったものも定義できる。ここで、代数和、限界積、限界和は以下のようである。

代数和：　$x + y = x + y - xy$

限界積：　$x \cdot y = (x + y - 1) \vee 0$

限界和：　$x + y = (x + y) \wedge 1$

図11は互いに双対な演算を用いたファジィ推論法「min-max-重心法」「代数積-代数和-重心法」「限界積-限界和-重心法」の場合の制御結果であるが、「代数積-代数和-重心法」が一番よい。「限界積-限界和-重心法」は他とは違った制御結果を得ているが、これは限界積では演算結果を0 に、限界和では 1 にしてしまう（つまり、情報が失われる）傾向にあることに起因しているものと思える。

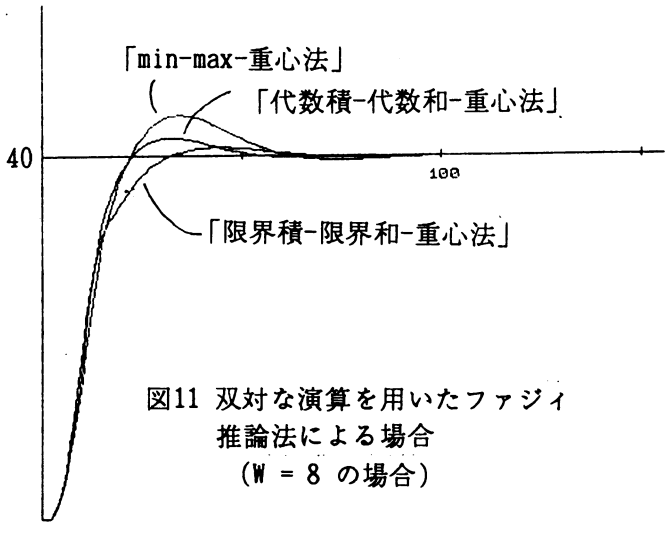


図11 双対な演算を用いたファジィ推論法による場合
（W = 8 の場合）

5. むすび

Mamdaniの方法「min-max-重心法」は、ハードウエア構成も簡単であり、数多くのファジィコントローラに使用されている。しかし、この方法を補間法として使用した場合、図７のように非線形な補間を行うが[6]、この(局所的な)非線形性がファジィ制御結果に好結果を与えているとは思えない。事実、線形補間を行う「代数積-加算-重心法」や「簡略化法」の場合のほうが良好な結果を得ている[4]。なお、ここでいう局所的な線形性とは式(12)のような少数のファジィ規則から得られる部分的な補間結果についてであり、多くのファジィ規則の相互作用によって得られる大局的な場合にはかなりの非線形性を有し、これがファジィ制御の特徴となっていることに注意されたい。また、「min-max-重心法」では、図４でもわかるように、小さな推論結果は無視されてしまう傾向にあり、したがって感度が悪くなり、これが制御規則のチューニングの困難さを引き起こしている。その点、「代数積-加算-重心法」は「min-max-重心法」に比べて感度がよいが、反面、使用されている制御規則が悪い場合には、悪い方に助長されて制御結果に悪影響を及ぼすことが考えられる。また、代数積の演算結果はすぐに 0 に近い値になってしまう欠点がある。これに対して min と代数積の中間的な積演算、例えば Hamacher積 xy/(x+y-xy) を使用することが考えられる。

参考文献

1. 水本、ファジィ制御に対する改善法(Ⅰ)、第３回「ファジィシステムシンポジウム」講演論文集、pp. 153-158、1987.
2. 水本、ファジィ制御に対する改善法(Ⅱ)、第４回「ファジィシステムシンポジウム」講演論文集、pp. 91-96、1988.
3. 水本、ファジィ制御に対する改善法(Ⅲ)、第５回「ファジィシステムシンポジウム」講演論文集、pp. 499-504、1989.
4. 水本、ファジィ制御向きのファジィ推論法、計測と制御、Vol. 28、No. 11、17-21、1989.
5. 水本、ファジィ推論とファジィ制御、Computrol（特集：ファジィ制御）、No. 28、32-45、1989.
6. 水本、ファジィ推論法による補間、第５回ファジィシステムシンポジウム」講演論文集、pp. 461-466、1989.
7. 山崎·菅野、ファジィ制御、システムと制御、28、7、442-446、1984。

問い合わせ先：〒572 寝屋川市初町18-8
大阪電気通信大学 経営工学科
水 本 雅 晴
TEL 0720-24-1131 ext 2361
FAX 0720-24-0014

TA1-2

ファジィ推論を用いた電縫管入熱制御システム

Fuzzy Control for High Frequency Tube Welding System

五百旗頭　正
Tadashi Iokibe
株式会社　明電舎
Meidensha Corporation

Abstract : Recently ERW(Electric Registance Welding) tube is getting used in many purposes and required good quality. To improve ERW tube's quality, many welding techniques and forming techniques are developed. Now we developed a fuzzy heat control systetm of ERW tube which is one of the most improved welding system. The fuzzy control system is composed by autmatic fuzzy rule generator for feedfoward control and fuzzy adapted feedback control logic.

1.はじめに

近年、電縫管の適用分野は拡大の一途をたどっており、要求される品質は年々高級化している。これに対応するために素材品質の向上はもとより、電縫管製造ラインにおけるより高度な成形技術、溶接技術が要求されている。特に溶接技術における入熱制御は品質向上および安定性に非常に重要な役割を果たしており、入熱制御に関連する種々の技術が研究、開発されている。

そして入熱制御は初期の手動制御からPIDﾌｨｰﾄﾞﾊﾞｯｸ制御を経て計算機を用いた数式ﾓﾃﾞﾙによるﾌｨｰﾄﾞﾌｫﾜｰﾄﾞ制御とﾌｨｰﾄﾞﾊﾞｯｸ制御とを併用したものへと発展してきた。

しかし最近のﾐﾙﾗｲﾝには、より高品質でかつ多品種の電縫管の製造が要求され、入熱制御に要求される機能、性能は従来の計算機制御では対応が困難になってきている。

これらを背景に、当社の持つﾌｧｼﾞｨ制御技術と入熱制御技術を組合せ、ﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙの自己学習、ﾌｧｼﾞｨ適応制御 および二色温度計の欠点を補う溶接温度真値推定機能を持つﾌｧｼﾞｨ入熱制御ｼｽﾃﾑを開発したのでここに紹介する。

2. ファジィ入熱制御システム

2.1 概要

本ｼｽﾃﾑの制御ﾓｰﾄﾞは、ｵﾝﾗｲﾝ、ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝそしてｵﾌﾗｲﾝの3ﾓｰﾄﾞがある。ｵﾝﾗｲﾝﾓｰﾄﾞでは全ての制御ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑ系を用いて自動入熱制御を行う。そしてｼﾐｭﾚｰｼｮﾝﾓｰﾄﾞでは、自己学習を行ったﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙおよびﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数の正当性を評価するものである。本ｼｽﾃﾑの入熱制御ﾌﾞﾛｯｸを図1に示す。なお本ｼｽﾃﾑで用いる変数は以下の通りである。

Ts : 基準板厚　Vs : 基準速度　θs : 目標溶接温度
Vw : ﾗｲﾝ速度　θw : 溶接温度（推定真値）
Rw : 外光　Pw : 温度計測位置
fw : 溶接機発振周波数　Fw : 視野ｽﾞﾚ

θ : 溶接温度（計測値）　Uw : 手動入熱量設定値
Ep : ﾌﾟﾚｰﾄ電圧　Ip : ﾌﾟﾚｰﾄ電流
dθ : 手動目標温度補正値　dVs: 目標速度偏差
dθs: 目標温度偏差　dθs': 目標温度偏差変化率
Ub : ﾌｨｰﾄﾞﾌｫﾜｰﾄﾞ制御量　dU : ﾌｨｰﾄﾞﾊﾞｯｸ制御量
U : 制御量

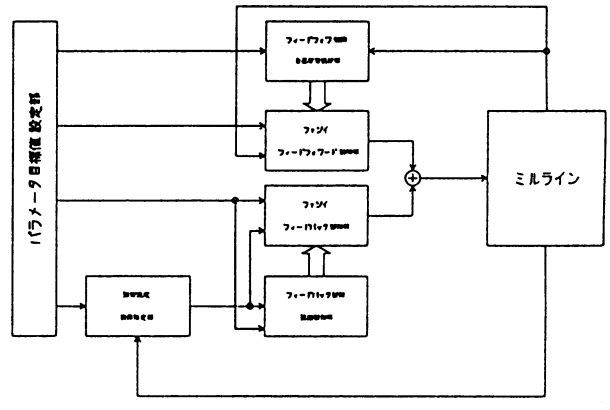


図1. 入熱制御ブロック図

図1に示す様に本ｼｽﾃﾑは、ﾌｨｰﾄﾞﾌｫﾜｰﾄﾞﾌｧｼﾞｨ制御部、ﾌｨｰﾄﾞﾊﾞｯｸﾌｧｼﾞｨ制御部により構成され、それぞれの制御に対する支援機能としてﾌｨｰﾄﾞﾌｫﾜｰﾄﾞ制御自己学習機能およびﾌｨｰﾄﾞﾊﾞｯｸ制御適応制御機能が付加されている。また二色温度計に対する各種外乱による影響を除外するためﾌｧｼﾞｨ推論を利用した溶接温度真値推定部を装備している。

2.2 フィードフォワード制御部

電縫管の入熱制御において同一速度、同一管種、同一鋼種、同一外径の場合、板厚の違いによるﾗｲﾝ速度と入熱量とは一般に図2で示す関係が有り、これを数式ﾓﾃﾞﾙで表現すると下記の様になる。

$$P=(Pr+Ps)\cdot t$$

$$Pr=aV+b$$

$$Ps=e/(cV+d)$$

但し　Pr　：　移動加熱領域における入熱量
　　Ps　：　静止加熱領域のおける入熱量
　　t　：　板厚
　　V　：　ﾗｲﾝ速度
　　a～e　：　係数

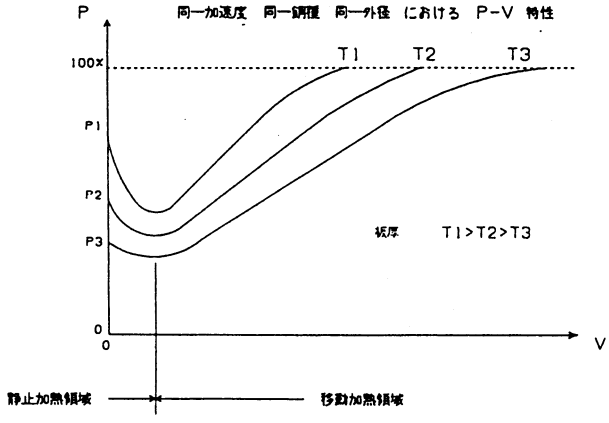


図2. ﾗｲﾝ速度と入熱量の関係

しかし数式ﾓﾃﾞﾙにおけるa～eのﾊﾟﾗﾒｰﾀの決定には時間がかかる上に、多品種を製造する場合には全ての場合を満足させるﾊﾟﾗﾒｰﾀが決定できないという問題が有る。この理由のため本ﾌｨｰﾄﾞﾌｫﾜｰﾄﾞ制御は後述するﾌｨｰﾄﾞﾌｫﾜｰﾄﾞ制御自己学習機能により、ﾗｲﾝ速度と入熱量の関係を表1に示す様なﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙとして表現し、これに図3に示すﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数を用いて100msec毎にﾌｧｼﾞｨ推論を行いUbを推定しﾗｲﾝ速度が0から基準速度に至る全域において制御を行う。

表1. FF制御用ﾙｰﾙ例

No	ﾙｰﾙ	内容	
1	IF Tv is Ts THEN	板厚にかんするルール	
2	IF ACC is ON OR Vv is VDC THEN	静止加熱領域におけるルール	
3	IF Vv is Vo THEN Ub is Uo		
4	IF Vv is Vx THEN Ub is Ux		
5	IF Vv is V1 THEN Ub is U1	移動加熱領域におけるルール	立上げ中ルール
N	IF Vv is Vn THEN Ub is Un		
S	IF Vv is Vs THEN Ub is Us		
S+1	IF ACC is NON AND Vv is DC THEN Ub is ZE	立下げ中低速域でのﾊﾟﾜｰｵﾌﾌﾟﾙｰﾙ	

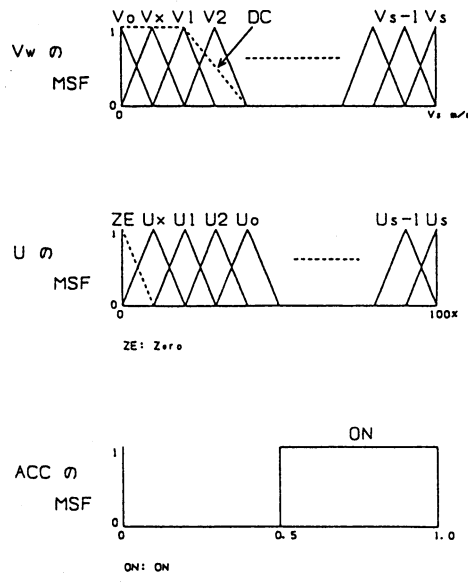


図3. FF制御用ﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数例

2.3 フィードバック制御部

本制御は定常状態(基準速度近傍にて運転中)において外乱による溶接温度変動を極力小さくするために、目標溶接温度と実溶接温度との偏差および偏差の変化率を入力ﾊﾟﾗﾒｰﾀとしてﾌｧｼﾞｨ推論を行い、500msec毎に補正制御量(dU)を推論する。そしてここで使用する実溶接温度は、溶接温度真値推定機能により推定したものである。なお本制御で使用するﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙを表2に、ﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数を図4に示す。

一般にﾌｨｰﾄﾞﾊﾞｯｸ制御は定常状態に入ってから手動運転により最適制御状態になった時に制御を開始し、非定常域に入った時は制御を停止するが、本ｼｽﾃﾑでは表2のﾙｰﾙ番号1,27に示す様にﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙのﾊｲﾌﾞﾗｰｷ化を行い基準速度とﾗｲﾝ速度の偏差による制御のきき方をｽﾑｰｽﾞに変化させている。

表2. FB制御ﾙｰﾙ例

No	ﾙｰﾙ	内容
1	IF dVs is ZE THEN	
2	IF dθs is NO AND dθs' is NO THEN dU is PB	
3	IF dθs is NB AND dθs' is NS THEN dU is PB	
4	IF dθs is NB AND dθs' is ZE THEN dU is PM	
5	IF dθs is NO AND dθs' is PS THEN dU is PS	
6	IF dθs is NB AND dθs' is PB THEN dU is ZE	
7	IF dθs is NS AND dθs' is NB THEN dU is PB	
8	IF dθs is NS AND dθs' is NS THEN dU is PM	
9	IF dθs is NS AND dθs' is ZE THEN dU is PS	
10	IF dθs is NS AND dθs' is PS THEN dU is ZE	
11	IF dθs is NS AND dθs' is PB THEN dU is NS	
12	IF dθs is ZE AND dθs' is NB THEN dU is PM	定常状態のルール
13	IF dθs is ZE AND dθs' is NS THEN dU is PS	
14	IF dθs is ZE AND dθs' is ZE THEN dU is ZE	
15	IF dθs is ZE AND dθs' is PS THEN dU is NS	
16	IF dθs is ZE AND dθs' is PB THEN dU is NM	
17	IF dθs is PS AND dθs' is NB THEN dU is PS	
18	IF dθs is PS AND dθs' is NS THEN dU is ZE	
19	IF dθs is PS AND dθs' is ZE THEN dU is NS	
20	IF dθs is PS AND dθs' is PS THEN dU is NM	
21	IF dθs is PS AND dθs' is PB THEN dU is NB	
22	IF dθs is PB AND dθs' is NB THEN dU is ZE	
23	IF dθs is PB AND dθs' is NS THEN dU is NS	
24	IF dθs is PB AND dθs' is ZE THEN dU is NM	
25	IF dθs is PB AND dθs' is PS THEN dU is NO	
26	IF dθs is PB AND dθs' is PB THEN dU is NB	
27	IF dVs is YZE THEN dU is ZE	非定常状態のルール

※ Y: NOT

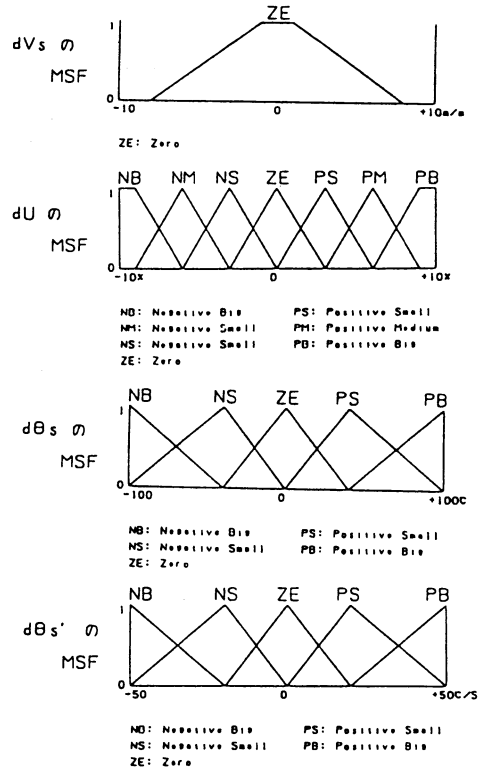


図4. 制御用ﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数例

2.4 フィードフォワード制御自己学習部

これは同一管種、同一鋼種、同一外径の電縫管において代表的な板厚でのﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙとﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数を熟練ｵﾍﾟﾚｰﾀの操作により自動的に作成しﾌｨｰﾄﾞﾌｫﾜｰﾄﾞﾌｧｼﾞｨ制御にて使用するものである。ﾌｨｰﾄﾞﾌｫﾜｰﾄﾞﾌｧｼﾞｨ制御は図5に示す様に3つの領域に分けることができる。

以下に板厚(Ts)および領域3のﾃﾞｰﾀを用いて領域別のﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙおよびﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数の決定方法について示す。

(1) 領域1,2の特徴点の推定

領域1および2のﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙおよびﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数の決定のための推論ﾙｰﾙを表3に、ﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数を図6に示す。

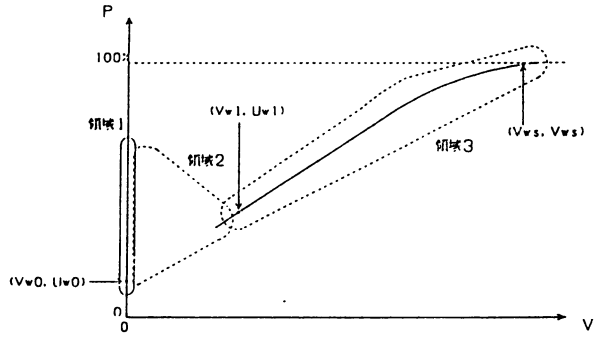


図5. FF制御学習領域分割

表3. 領域1,2特徴点推定ﾙｰﾙ例

領域1のルール (Uoを求める)

No	ルール	内容
1	IF Ts is TN THEN Uo is SL	板厚が薄い時のルール
2	IF Ts is MD THEN Uo is MD	板厚が中くらいの時のルール
3	IF Ts is TK THEN Uo is SH	板厚が厚い時のルール
4	IF Ts is VK THEN Uo is HI	板厚が非常に厚い時のルール

領域2のルール (Uxを求める)

No	ルール	内容
1	IF Ts is TN THEN Ux is VL	板厚が薄い時のルール
2	IF Ts is MD THEN Ux is LO	板厚が中くらいの時のルール
3	IF Ts is TK THEN Ux is SL	板厚が厚い時のルール
4	IF Ts is VK THEN Ux is MD	板厚が非常に厚い時のルール

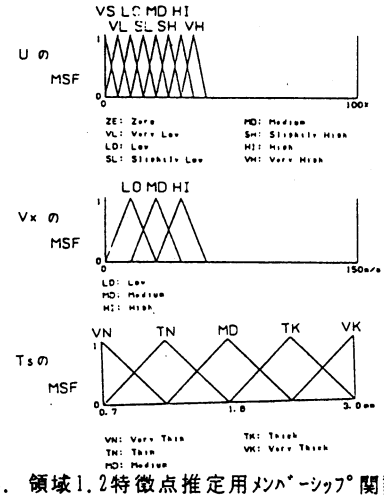


図6. 領域1,2特徴点推定用ﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数例

(2) 領域3の特徴点の推定

この領域でのﾙｰﾙの推定方法はﾗｲﾝの特性により以下に示す2種類が有る。

①ﾗｲﾝの加減速度が低く、領域3においてほぼｵﾍﾟﾚｰﾀが追従できる場合。

100mec毎にｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞしたﾗｲﾝ速度(Vw)、手動による操作量(Um)、溶接機のﾌﾟﾚｰﾄ電圧(Ep)およびﾌﾟﾚｰﾄ電流(Ip)を用いて入熱特性としてｲﾝﾋﾟｰﾀﾞﾝｽ(R=Ep/Ip)を求める。そして学習終了時のｲﾝﾋﾟｰﾀﾞﾝｽ(Rs)に近い値を持つVwおよびUmの組合せを抽出し、表4に示すﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙおよび図7に示すﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数を作成する。

②ﾗｲﾝ加減速度が高く、ｵﾍﾟﾚｰﾀが追従できない場合

基準速度(Vs)までにN個の適当な速度での適切な手動入熱量を計測し、各速度での速度VwおよびUmを取り込み、これを基に①と同様にﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙおよびﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数を作成する。

表4. 領域3の特徴点のﾙｰﾙ例

ルール	備考
IF Vw is Vw1 THEN Ub is Uv1	ポイント1 で測定した Vw1 と Uv1 でﾙｰﾙを作成
IF Vw is Vw2 THEN Ub is Uv2	ポイント2 で測定した Vw2 と Uv2 でﾙｰﾙを作成
IF Vw is Vw3 THEN Ub is Uv3	ポイント3 で測定した Vw3 と Uv3 でﾙｰﾙを作成
IF Vw is Vw4 THEN Ub is Uv4	ポイント4 で測定した Vw4 と Uv4 でﾙｰﾙを作成

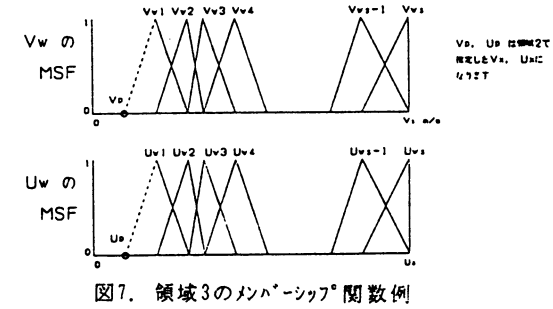


図7. 領域3のﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数例

(3) 全域に渡るﾌｨｰﾄﾞﾌｫﾜｰﾄﾞ制御用ﾙｰﾙの決定

(1)および(2)で作成したﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙ、ﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数に基準板厚(Ts)および加速中(ACC)の条件を加味したﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙおよびﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数を作成し、これを最終形態とする。

3.5 フィードバック適応制御機能

(1)および(2)で作成したﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙ、ﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数に基準板厚(Ts)および加速中(ACC)の条件を加味したﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙおよびﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数を作成し、これを最終形態とする。

これは定常状態(基準速度近傍)においてﾌｨｰﾄﾞﾊﾞｯｸ制御を行っている時に溶接温度目標値をθs0からθs1にｽﾃｯﾌﾟ状に変化させそのときのﾌｨｰﾄﾞﾊﾞｯｸﾌｧｼﾞｨ制御の特徴量、すなわち立ち上がり特性(E1)、ｵｰﾊﾞｰｼｭｰﾄ量(E2)、整定性(E3)を求め、表5に示す適応制御用ﾙｰﾙおよび図8のﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数を用いてﾌｨｰﾄﾞﾊﾞｯｸ制御用ﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数の修正量(Vdθsおよび Vdθs')を推論し、dθsおよびdθs'のﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数を自動修正する。本機能のﾌﾞﾛｯｸ図を図9に示す。

表5. FB適応制御ﾙｰﾙ例

No	ﾙｰﾙ	内容
1	IF E1 is FA THEN Vdθs is LS. Vdθs' is LS	立ち上がり特性改善用ﾙｰﾙ
2	IF E1 is MD THEN Vdθs is ZE. Vdθs' is ZE	
3	IF E1 is SL THEN Vdθs is RS. Vdθs' is RS	
4	IF E2 is HI THEN Vdθs is RS. Vdθs' is RS	ｵｰﾊﾞｰｼｭｰﾄ特性改善用ﾙｰﾙ
5	IF E2 is MD THEN Vdθs is ZE. Vdθs' is ZE	
6	IF E2 is LO THEN Vdθs is LS. Vdθs' is LS	
7	IF E3 is FA THEN Vdθs is ZE. Vdθs' is ZE	整定性改善用ﾙｰﾙ
8	IF E3 is MD THEN Vdθs is LS. Vdθs' is LS	
9	IF E3 is SL THEN Vdθs is LB. Vdθs' is LB	

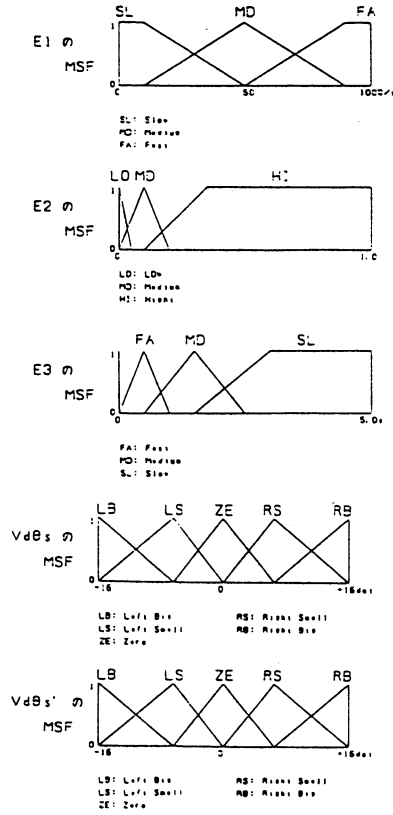


図8. FB適応制御ﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数例

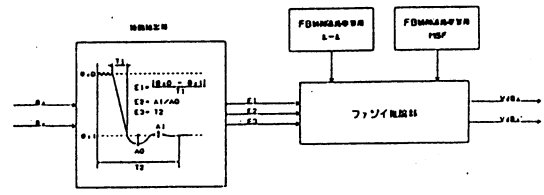


図9. FB適応制御ﾌﾞﾛｯｸ図

2.6 溶接温度真値推定部

電縫管の入熱制御において溶接温度は主なﾌｨｰﾄﾞﾊﾞｯｸ制御のの要因であるが、種々の外乱によりその計測値の再現性、安定性に問題が有る。外乱による溶接温度の計測値と真値との関係は図10に示す傾向が有る。

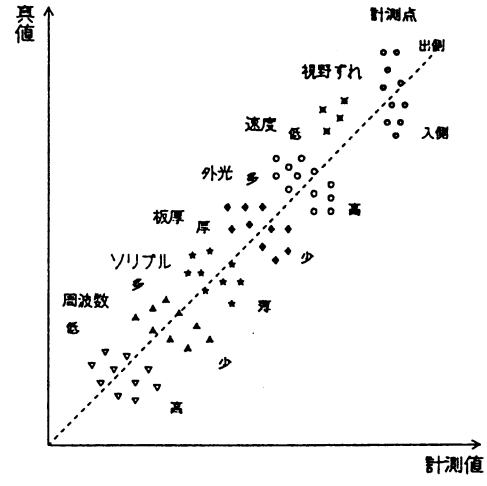


図10. 外乱による溶接温度の計測値と真値のとの関係

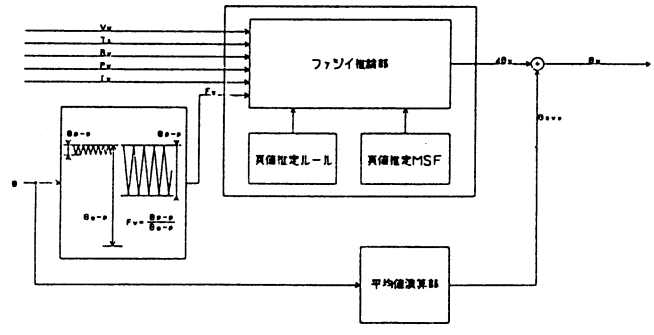


図11. 真値推定ブロック図

この傾向をﾌｧｼﾞｨﾙｰﾙ化し図11に示すﾌﾞﾛｯｸ図によりﾌｧｼﾞｨ推論を行い真値を推定する。

3. おわりに

本原稿を執筆している現在、本ｼｽﾃﾑは開発中のため具体的な実験ﾃﾞｰﾀは記載することができない。しかし、ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑでは試験ﾃﾞｰﾀを発表する予定である。

TA1-3

貯水池実時間操作におけるファジィ制御の応用に関する研究

Application of Fuzzy Control to Real-Time Reservoir Operation

小尻利治* 藤井忠直**
Toshiharu KOJIRI , Tadanao FUJII

*:岐阜大学 工学部 **:岐阜大学 大学院
*:Faculty of Engineering, GIFU University
**:Postgraduate Course, Faculty of Engineering, GIFU University

Abstract : The real-time operation of reservoir is carried out based on the administrator's experience and the fixed operation rules. But it seems not to effectively use the information on hydrological and meteorological forecasts:amout of rainfall, inflow discharge and so on.

This paper proposes an expert system for reservoir operation based on inflow prediction and the weather forecast. The knowledge base on inflow hydrograph is extracted from the past flood records by pattern recognition techneques. For each combination of the sub-spaces, the release in the rule base is optimized through the dynamic progaramming. The actual release as the output of the expert system is decided through the fuzzy inference theory. Fuzzy parameters in member-ship functions are optimized through the steepest descent method.

1．はじめに

ダム貯水池操作は、降雨量、流入量などの水文情報や、気象情報などに基づいた制御規則により行なわれている。しかし、洪水時には氾濫の危険性が高く、熟練オペレータでも操作が困難となる場合があり、固定的な操作では十分な制御効果が上げられないと考えれる。また、推論過程において、近年、めざましい進歩のあるファジィ理論を導入することにより、ダム管理者の過去の経験や知識を生かせるようなエキスパートシステムを構築するものである。

2．貯水池操作のエキスパートシステムの構成

貯水池の最適操作を達成するために必要な要素としては、治水操作に限定すれば、以下のようなものが挙げられる。

(i)今後の流入ハイドログラフ

(ii)現時点での流入量

(iii)現貯水量

また、洪水時には、気象台から発表されている天気情報(天気予報)が利用できる。すなわち、

(iv)気象情報(警報・注意報・発令無し)

(v)気象情報を利用した予測流入量

である。これらを用いて、小尻ら[1)]の提案している知識ベース型貯水池操作を構成すると、以下のようになる。

①知識ベース　貯水池操作の基礎情報となる部分であり、過去の多数の水文データにより分類されたハイドログラフや、Dynamic Programmingにより代表ハイドログラフについて計算された最適放流量系列が相当する。

②ルールベース　知識ベースで設定されている基本的な放流ルールを実時間操作に用いるべく、具体的な操作ルールとして書き直した部分である。

③推論機構　天気予報や観測データとルールベースにより現時点での放流量を決定する。観測されたデータあるいは知識ベース内で修正されたデータは新たな情報として知識ベース内で保存される。

④意志決定　貯水池、河道、雨域、氾濫、経済などあらゆる制御効果を考慮して実放流量を決定する。ここでは、現時点での流入量・現貯水量・流入ハイドログラフ・天気予報により実放流量を決定する。

⑤ユーザー・インターフェース・モジュール
現在の状態やシステムの制御結果をユーザーが取り扱いやすいように表示する部分である。

3．メンバーシップ関数と放流量

3.1メンバーシップ関数

FUZZY SCOPEにおける流入量、貯水量のメンバーシップ関数は、次式のように設定する。

$$fde(QI)=(-|QI-bqj|+aqj)/aqj \quad (1)$$

$$fse(S)=(-|S-bsk|+ask)/ask \quad (2)$$

ただし、aqj, askはパラメータ、bqj, bskはFUZZYSCOPEに対応する定数である。ハイドログラフのメンバーシップ関数は、(i)形状と(ii)ピーク流量により決定できる。具体的には、(i)の形状による類似度は、現降雨量、現流入量が観測されるとき、今までの流況と1時間先の予測流量で算定す

ることができる[2)]。この1時間先までの流入量系列と分類されたハイドログラフとの類似度は、

$$DS1(i)=\min\{\max|QI(t)-FH(t,i)|/FH(t,i)\} \quad (3)$$

となる。ここにQIは予測を含んだ流入量系列である。(ii)のピーク流量による類似度の算定は、天気予報により数時間先までの総降雨量が予測されるので、ルチハの式によりピーク流量の到達速度V，到達時間Tを求めることができる。また、予測総降雨量より一様降雨を仮定すると、T時間の平均降雨強度rtが得られるので、ピーク流量は合理式により

$$Qp=0.2778\cdot f\cdot rt\cdot a \quad (4)$$

となる。ここに、a：流域面積，f：流出係数である。結局、ピーク流量の類似度は

$$DS2(i)=\min\{|Qp-FHp(i)|/FHp(i)\} \quad (5)$$

となる。ここに、FHp(i)はハイドログラフのピーク流量である。したがって、式(3)，(5)を比較することにより類似度は、次式となる。

$$DS(i)=\max\{DS1(i),DS2(i)\} \quad (6)$$

よって、ハドログラフのメンバーシップ関数は

$$fhe'(DS)=\{ahi-DS(i)\}/ahi \quad (7)$$

となる。ただし、ahiはパラメータである。

3.2予測精度を考慮したメンバーシップ値

ハイドログラフのメンバーシップ値を求めるのに際し、流入量予測を行なったが、フィルタリングによる流出予測では、同時に予測残差が求められるので、その精度を考慮してメンバーシップ値を決め直す。予測精度に関するメンバーシップ関数は次式のように規定する。

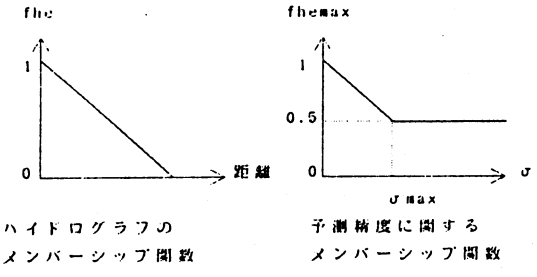
$$fhemax=1-0.5\cdot\sigma/\sigma max \quad (8)$$

σ：フィルタリングによる予測残差，

σmax：考えうる予測残差の最大値

よって、ハイドログラフのメンバーシップ値は式(7)，(8)を比較することにより次式のようになる。（図－1参照）

$$fhe(DS)=\min\{fhe'(DS),fhemax\} \quad (9)$$



ハイドログラフの メンバーシップ関数　　予測精度に関する メンバーシップ関数

図－1

3.3放流量の決定

上記のメンバーシップ関数が決定すると、適合度ωijkは相加平均法

$$\omega ijk=\{fhe(DS)+fde(QI)+fse(S)\}/3 \quad (10)$$

により求められる。また、異常出水への対応のため以下のような”ずれ”を考慮する。

$$DS'(t,i)=(sign)\min\{\max[|\frac{QI(t)-FH(t,i)}{FH(t,i)}|]\} \quad (11)$$

ここに(sign)はdistanceが＋側か－側かを示す記号である。計算放流量QR(i,j,k)をDS'に応じて変更し、修正放流量とする。すなわち、

$$MQR(i,j,k)=(1+DS'(t,i))\cdot QR(i,j,k) \quad (12)$$

とする。再び、実放流量QOはファジイ推論により次式のようになる。

$$QO=\Sigma_{ijk}\,\omega ijk\cdot MQR(i,j,k)/\Sigma_{ijk}\,\omega ijk \quad (13)$$

4．後件部にあいまい性を考慮した場合の放流量の決定方法

放流量のいっそうの平滑化をはかるために、後件部に次のメンバーシップ関数を設定し、あいまい性を検討しよう。

$$frq(l)=\{-|QO-brl|+arl\}/arl \quad (14)$$

arl,brl：パラメータ

ルールベースを集約することにより、もとの組み合わせ数より減らしたものを用いることができる。放流量の決定には式(11)をそのまま用いず、後件部のメンバーシップ値を算定して、そのメンバーシップ関数全体の形状を基に推論することになる。推論方法としては、以下の3手法を適用比較する。

①まず、後件部のファジイ集合C'の重心を代表点（放流量）とする重心法、式で表わすと

$$fre(qo)=\bigvee\{frq(l)\wedge\omega ijk\} \quad (15)$$

となる。ここで$\wedge$はminimum，$\vee$はmaximumを表わす。したがって、修正放流量は重心法により

$$QO'=\frac{\int fre(qo)\cdot qo\,dqo}{\int fre(qo)\,dqo} \quad (16)$$

となる。②つづいて、Ciの代表点Ziをファジイ集合C'iの高さhiで荷重平均をとる高さ法、であり式で表わすと

$$QO'=\frac{\Sigma frq(l)\cdot brl}{\Sigma frq(l)} \quad (17)$$

となる。③3番目は、Ciの代表点Ziをファジイ集合C'iの面積Siで荷重平均をとる面積法であり、式で表わすと

$$Q0' = \frac{\Sigma S(l) \cdot brl}{\Sigma S(l)} \qquad (18)$$

となる（図－２参照）[3]。

また、得られる推論の確かさとして、次の確信度を提案する。すなわち、

$cf = \min\{cf1, cf2\}$　あるいは、

$cf = \sqrt{(cf1^2 + cf2^2)}$　(19)

cf1：後件部メンバーシップ値の最大値、

cf2：後件部メンバーシップ関数の広がり

$cf2 = 1 - ZG/ZG'$　(20)

ZG：標準偏差、

ZG'：基準となる標準偏差

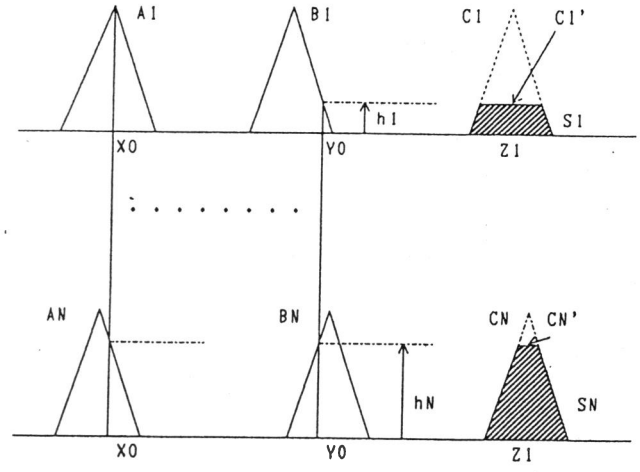
である。基本となる標準偏差とは、あいまい性の最大の場合、つまり一様なメンバーシップ値を持つ場合の標準偏差であり、$ZG' = \sqrt{3}/3 \cdot WG$(WGは重心の位置)とおくことができる。

５．ユーザー・インターフェース・モジュールの検討

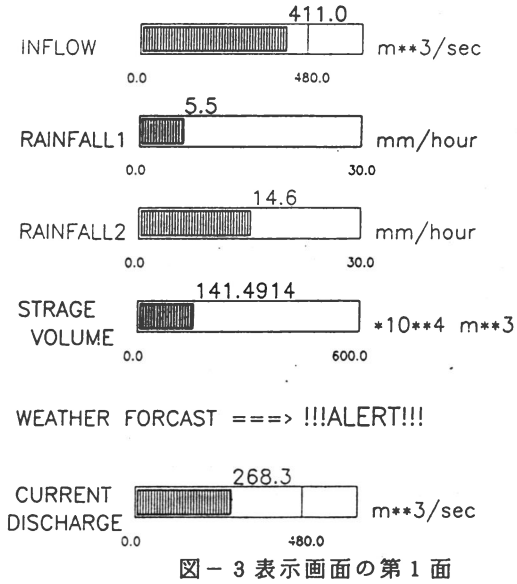
現在の状態やシステムの制御結果をユーザーに表示するために、図－３～図－５のような画面を作成した。図－３～図－５はそれぞれメニュー形式での各時間ステップの第１面・第２面・第３面を表わす。第１面では、現在の状態や情報を主に表示し、最後に放流量の結果を表示している。第２面では、流入量・貯水量の時間変化ならびに推論による放流量を表示している。一番上が今後の予測流入量系列を表わしており、真ん中が貯水量の時間変化、一番下が予測流入量と放流量の時間変化をまとめて表示している。実線は流入量、点線は放流量、縦線は１時間先の予測残差を表わしている。第３面では、後件部のメンバーシップ関数の適合度とその重心位置を示し、その結果とその大きさを言葉で表示し確信度も同時に表わしている。この言葉の表現によりダム管理者がこの時点で長年の経験から放流量をもう少し多くしたり少なくしたりできる余裕がある。

６．パラメータの決定方法

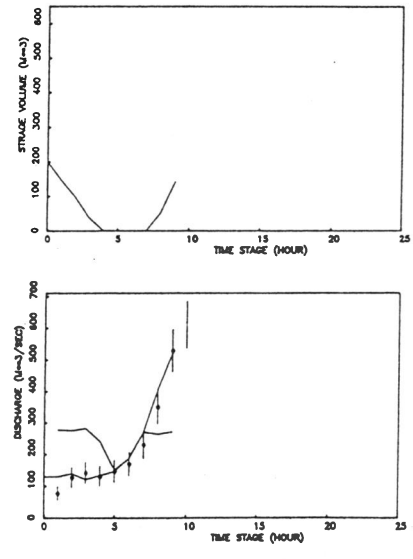
メンバーシップ関数のパラメータahi, aqj, askは、組み合わせ範囲を拡大していく最急降下法的な方法を用いて決定する。すなわち、初期値として適当なパラメータの組み合わせを考える。次に各パラメータをある微少値⊿ahi, ⊿aqj, ⊿askだけ動かし目的関数を算定する。３種類の移動方向の中で最も目的関数が改善されたものを１次解とする。その組み合わせより、同様にパラメータを



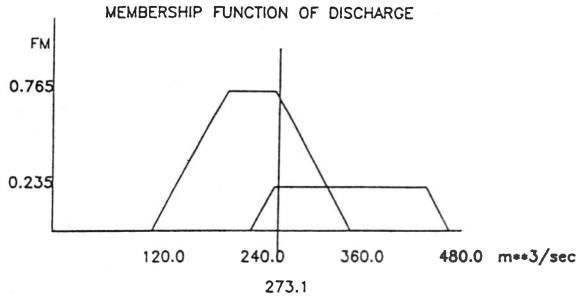
図－２



図－３表示画面の第１面



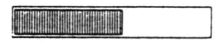
図－４表示画面の第２面



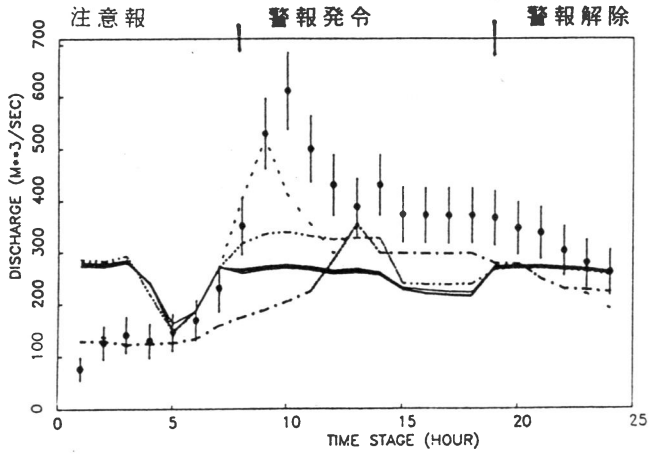
DISCHARGE== 273.1 m**3/sec

=====>>MORE OR LESS LARGE

PROBABILITY



図－5 表示画面の第3面



図－6 適用結果

微少値動かし改善方向を探る。この手順を繰り返し行ない、解が改善されなくなれば、最適解と見なすのである。また目的関数は全出水記録におけるシミュレーションでの平均放流量の最小化をとり、

$$OF=\sum_{t=t0}^{t0+24} QO(t) \longrightarrow \min \qquad (21)$$

とする。こうして得られたパラメータの値は、

適合度を相加平均法で求める場合

ahi=0.1, aqj=150.0(m^3/sec), ask=3000000.0(m^3)

となり、minimum演算法の場合

ahi=0.2, aqj=150.0(m^3/sec), ask=11000000.0(m^3)

となった。しかし、制御結果を比較してみると、minimum演算法の場合最小値以外のメンバーシップ値が放流量に反映されず、急激に放流量が増大する傾向がある。一方相加平均法は放流量が徐々に増大する傾向がある。ダム操作の観点から見れば、急激に放流量が変化することは好ましくないことより相加平均法を用いる。

7．適用と考察

図－6は昭和63年9月19日～20日の出水記録を用いて制御を行なった結果である。点線は流入量、1点鎖線は予測情報がない場合の放流量、2点鎖線は後件部にあいまい性を考慮しない場合の放流量、3本の重なった実線は後件部にあいまい性を考慮した場合の放流量（上から順に重心法、面積法、高さ法）、縦線は1時間先の予測残差を表わす。

ここで適用を通じて得られた結果を述べると次のようになる。

①洪水の立ち上がり部分では、予備放流を行ない異常洪水に対応している。

②流入量がピークになっても放流量が大きくならないよう、ピークカットが行なわれている。

③後件部にあいまい性を加えた結果、放流量のいっそうの平滑化が図られた。

④放流量は天気予報による影響が大きい。

⑤ファジィ推論には、重心法、高さ法、面積法があるが、操作結果からはどれも大した相違がなかった。

⑥流出予測が悪いにもかかわらず放流量の最小化がはかられているため、予測情報、後件部へのあいまい性の導入の効果が把握できる。

8．おわりに　本研究では天気予報などの気象情報を生かしうる異常洪水時の貯水池操作エキスパートシステムを構築した。また、いくつかのファジイ推論を考察し、実時間操作としての実用性を高めた．

9．参考文献　1）小尻・藤井：知識ベースを用いた貯水池の実時間操作、水工学論文集第34巻、1990

2）山田 久志：大流域における洪水予測システムのモデル化とダム管理、岐阜大学修士論文、1988

3）廣田薫・寺野寿朗；コンピュートロール、コロナ社、No28、pp.32～45 (1989)

TA2-1

浄水場の凝集剤注入ファジィ制御

FUZZY CONTROL TO COHESION ADDITION PROCESS OF WATER PURIFICATION PLANT

蓮本了遠　守本正範　伊藤　修　山岸　馨
Ryoon HASUMOTO, Masanori MORIMOTO, Osamu ITOH and Kaoru YAMAGISHI
富士電機㈱
FUJI ELECTRIC CO., LTD.

Abstract: We applied Fuzzy control to the process of cohesion chemicals injection in the cleaning bed and realized the automation of operation. The developed system finds the rate ate of cohesion medicine injection by an empirical formula and revises it by Fuzzy theory.
We tested it's usefulness by stimulation and field test and put it into practice.
As a result, the following effects were found.
The reduction of operator load/ The realization of safety control according to how water is turlid/ The realization of stability control against outer change/The reduction of chemicals

1. まえがき

浄水場の役割は取水した原水を処理し、飲料水や工業用水として、高品質，安全性を確保しながら確実に給水することにある。そのための水源には河川の表流水が多く用いられている。この表流水には濁質が多く含まれ、しかもその量が変動する。この濁質の除去を確実に、かつ効率的に行うために凝集剤を注入する。この注入率は浄水場に取り込む原水の水質により変える必要がある。この原水水質は様々な条件により大きく変化し、また経年変化もある。しかも、凝集過程が複雑であり、かつ水質発信器で測定できるものが限られているなどにより、確定的な注入率決定の方法がなく、計算機による自動化技術が発展しているにもかかわらず、まだ熟練したオペレータの豊富な経験に委ねられている場合が多い。

このような状況の中で、水処理分野においても、知的情報処理が注目され、熟練オペレータの操作方法をそのまま計算機で実行しようとするファジィ制御の実用化が進められている。富士電機では、早くからこのファジィ制御に着目し、１９８３年には凝集剤注入制御への適用研究結果を発表し、水処理分野への応用を進めてきたが、その事例をここに報告する。

2. 浄水場の処理概要

浄水場の処理プロセスを図１に示す。取水した原水は沈砂池よりポンプで揚水し、急速攪拌池で凝集剤を加え、一様に拡散させる。凝集剤とは水中に含まれる浮遊物質を凝集してフロック（濁質が凝集剤により電気的に中和され凝集した塊）とする薬品であり、硫酸アルミニウム（硫酸バンド）やポリ塩化アルミニウム（パック）が広く使用されている。フロック形成池は攪拌によって、凝集した粒子をさらに沈降しやすいフロックに形成するための施設である。フロック形成池で大きく成長したフロックの大部分を沈降させるのが沈殿池である。次のろ過池では砂層間隔内での沈殿作用や砂層に吸着したフロックに別のフロックが更に吸着することにより、沈殿処理水中に含まれる濁質のほか、マンガン，細菌，プランクトン藻類，浮遊性有機物，金属酸化物などの懸濁物も除去される。ろ過池で処理された浄水は後塩素を注入され、浄水池に入る。この浄水はポンプにより配水池を経由して給水される。この他、急速攪拌池の前で、ｐＨ調整のための苛性ソーダや殺菌・有機物・重金属除去を目的とした前塩素が注入される。

凝集剤注入にファジィ制御を適用した浄水場は日量５４０，０００㎥の浄水能力を有している。この浄水場では塩害，落雷，台風等による不慮の事故に備えるとともに土地の利用効率を高めるため、受配電，ポンプ，浄水池等主要設備を本館地下に設置している。そして、すべての機器は操作室で遠方操作し、計測，情報については計算機を用いた監視制御システムを採用している。図２に浄水場監視制御システムを示す。

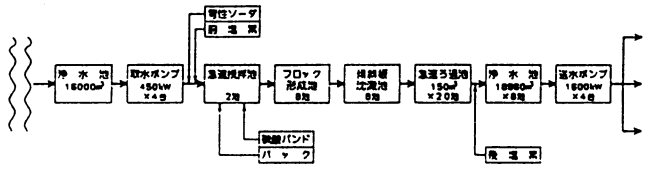


図1. 浄水場の処理プロセス

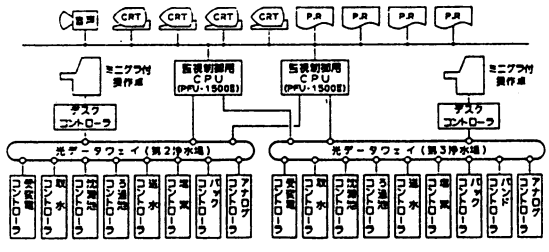


図2. 監視制御システム

3. ファジィ制御の適用

3.1 基本構成とその特徴

図３に凝集剤注入率演算の基本構成を示す。凝集プロセスの大まかな特性より定まる注入率式の値を種々の状況により補正する。すなわち、注入率式で対処できない非線形部分をファジィ推論で対処し、その補正量を推論し加えるシステムである。

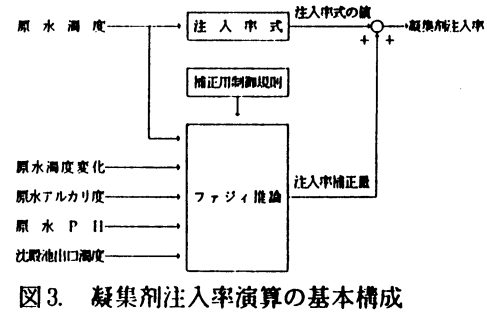


図3. 凝集剤注入率演算の基本構成

今回適用したパックと硫酸バンドを用いた凝集剤の注入率制御では、注入率式として原水濁度の関数である実験式を用いている。その注入率式の値を補正するファジィ推論では原水濁度，原水アルカリ度，原水ｐＨなどの状況により補正の仕方を表した制御規則を用いる。制御規則は「もし、原水濁度が低いときは注入率を少し低くする」などのように、入力値の状態が低い，高いなどの状況を表す命題とそのときの補正量を表す同様な命題からなる(1)式で表される。

もし　原水濁度＝低い　ならば　注入率＝少し多く　(1)

このような制御規則を種々の状況に対して、用意する。このとき、「低い、少し多く」をファジィ変数と予備、メンバーシップ関数でその内容を表す。その例を図４の実線で示す。横軸に原水濁度を取り、縦軸にその低い，やや低い，普通，高い，非常に高いなどの状態を０から１までの数値に対応させて表してある。従来の判断方法ではそれぞれの状態に当てはまるか当てはまらないかの二者択一であるから、破線で示すようになる。すなわち、原水濁度がやや低いのは３０度から１１０度というように、境界が明確になっている。しかし、人間の判断はあいまいであり、この範囲を少しでもはずれたら「原水濁度はやや低い」と言わないというようなＹＥＳ，ＮＯ的な思考はなじまない。そこで、実線のように境界に幅を持たすことにより、「原水濁度がやや低いが普通とも少し考えられる」などの表現が可能となる。そして、それらの状態に適合する度合を０～１までの数値で表す。このように、ファジィ制御は原水濁度がやや低いと原水濁度が普通などの相異なる状態が共存する状態を許容し、人間の得意とする多くの情報に基づく総合判断を計算機で実現できる。

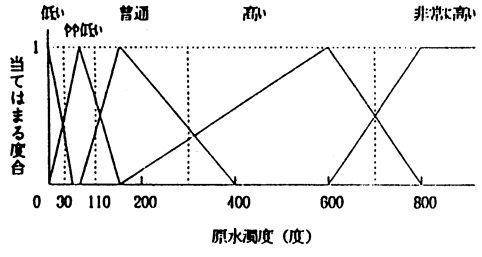


図4.　メンバーシップ関数によるあいまいさの表現

3.2　ファジィコントローラの概要

ファジィコントローラは浄水場の監視制御システム用に導入した制御用計算機上で動作し、その演算値を下位の調整用マイクロコンピュータの設定値として送っている。これらは監視用のＣＲＴ画面から、推論内容の表示やテーブル形式による制御規則の設定をマウスやキー操作で行うことができる。

① 制御演算機能
　与えられた入力値に基づいて、ファジィ演算により、制御出力値を計算する。

② 状態表示機能
　推論演算の内容を視覚的に表示する。

③ キーボード入力機能
　センサーで得られない情報をキーボードから入力し、ファジィ推論の入力値とする。

④ 入出力変数定義機能
　ファジィコントローラで使用する入出力変数を定義し名前を英数字で付ける。

⑤ ファジィ変数定義機能
　入出力変数毎のメンバーシップ関数をテーブル形式で定義する。

⑥ 制御規則定義機能
　IF ～ THEN ～ 形式で制御規則を定義する。

⑦ シミュレーション機能
　制御規則の変更に対応した制御出力の変化を模擬的に確認する。

まず、入出力変数を定義し、それぞれのファジィ変数を定義する。ファジィ変数の内容を表すメンバーシップ関数（そのラベルをＳＡ，ＭＭ，ＬＡなどで表す）は三角形を基準としている。

制御規則は入力変数とそのファジィ変数（ラベル）を対にした前件部命題と出力変数とそのファジィ変数を対にした後件部命題とするIF～THEN～形式で表す。例えば、(1)式は次のようになる。

IF TURB = SA THEN PAC = PS

一方、制御中の演算内容の確認や制御性の向上にはそのときの制御規則の当てはまる状態を知る必要がある。その為に、状態表示機能が用意されており、図５にその画面例を示す。画面の左上には推論結果が表示され、そのときの制御規則の当てはまる度合が山の高さとして表わされる。各山は制御規則に対応し、その詳細が画面の下側に当てはまる度合の高いものから３個、規則とその度合（グレード：各命題のメンバーシップ関数の値）がバーグラフとして表示されている。この例では１から３番目の制御規則が主に当てはまり、推論値（補正値）は－1.57であることが注入率式の値（基準値）と共に右上に表示されている。
更に、ファジィ推論内容に不満足な場合は、シミュレーション機能により、制御演算を停止せずに制御規則の調整・拡充ができ、制御性の向上が図れる。

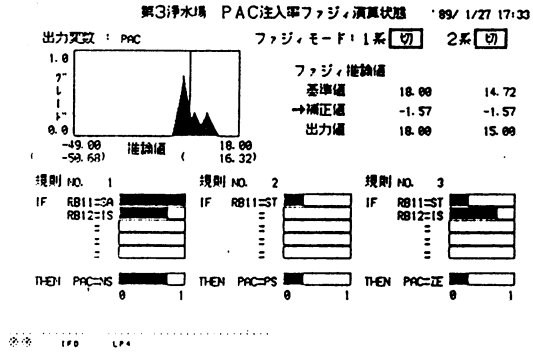


図5.　状態表示画面例

次に、ファジィコントローラの容量と処理点数を表１に示す。コントローラ数は３１個であり、１コントローラ当りの入力は最大１２８点，出力は最大８点，制御規則は最大２５６個設定可能である。また制御周期は各コントローラ毎に指定可能であり、大規模プロセスにも適用可能である。

コントローラ数		最大　３１個
入　力	プロセス入力	最大　９６点
	状況判断入力	最大　３２点
操　作　出　力		最大　８点
制御規則	規　則　数	最大　２５６個
	前件部命題数	最大　５個
	後件部命題数	最大　２個
制　御　周　期		最小　１０秒

表1.　ファジィコントローラの容量と処理点数

4. ファジィ制御の適用結果

4.1 制御規則の設計

凝集剤注入率制御にファジィ制御を適用するには

① 注入プロセスの特性を把握し、凝集剤の注入率を判断する要因（水質，処理状況など）の抽出

② それらの要因に対する状況認識（濁度が高い，低いなど）と操作方法（注入率をどの位増加または減少させるか）を結び付ける制御規則とメンバーシップ関数の決定

③ 制御規則の評価・拡充

が必要となる。そのため、次の手順で制御規則の設計を行った。

① 各種日報による熟練者の操業データの収拾

② 熟練者からの操作方法に関する聞取調査

③ 操業データを用いた計算機シミュレーションによる制御規則の評価・拡充

まず、昭和５８年４月より昭和５９年３月までの１年間の日報データより、１時間間隔の凝集剤注入データを整理した。この期間のデータを用いた理由は凝集剤注入の主な判断要因である原水濁度がこの年に大きく変動し、ほぼ全濁度範囲の操作結果が得られるためである。

浄水場では原水濁度が５０度以下を目安にして硫酸バンドを注入し、５０度以上を目安にパックを注入している。そこで、それぞれの注入時毎にデータを整理した結果、パック注入時のデータが７７９個、硫酸バンド注入時のデータが１４９０個得られた。

次に、熟練者から操作方法に関する聞取調査を行い、判断要因と基本的操作方法を収集した。その結果を基礎に制御規則を設計し、収集データを用いた計算機シミュレーションにより拡充を行った。すなわち、オペレータの操作結果とファジィ推論値で大きく異なる状況に着目し、両者が一致するようにメンバーシップ関数の修正、制御規則の修正・拡充を行った。このとき、沈殿池出口濁度の値より許容誤差を推定し、制御規則の良否を判断するとともに、熟練者の判断を求めた。これにより、信頼できる制御規則が設計できた。更に、現状の操業データを何回か収集し、シミュレーションにより、推論値の確認，制御規則の拡充を行った。最終的に得られた判断要因を表２に、制御規則の例を表３に示す。この制御規則の特徴は主に原水濁度で補正量が決まっており、その時間変化やｐＨ，アルカリ度等で修正が行われていることである。

凝集剤	判断要因
硫酸バンド（BAND） （低濁度時）	原水濁度（TURB） 原水濁度変化（DTUB） 沈殿池出口濁度（STUB） ろ過水濁度（FTUB）
パック（PAK） （高濁度時）	原水濁度（TURB） 原水濁度変化（DTUB） 原水ＰＨ（PH） 原水アルカリ度（ALK） 沈殿池出口濁度（STUB）

注）（ ）内は入出力度数名

表２．注入率補正の判断要因

No.	FUZZY RULE							
1	IF	TURB-SA	TURB-IS	*	*	*	THEN	PAC-MS
2	IF	TURB-ST	*	*	*	*	THEN	PAC-PS
3	IF	TURB-ST	TURB-IS	*	*	*	THEN	PAC-ZR
4	IF	TURB-SM	DTUB-ST	PH -IL	*	*	THEN	PAC-MS
5	IF	TURB-SM	DTUB-ST	PH -LA	*	*	THEN	PAC-MM
6	IF	TURB-SM	DTUB-GT	*	*	*	THEN	PAC-PS
7	IF	TURB-MM	ALK-ST	*	*	*	THEN	PAC-PS
8	IF	TURB-MM	ALK-MM	*	*	*	THEN	PAC-PS
9	IF	TURB-MM	ALK-GT	*	*	*	THEN	PAC-PM
10	IF	TURB-ML	STUB-IL	*	*	*	THEN	PAC-PS
11	IF	TURB-ML	TURB-GT	STUB-IL	*	*	THEN	PAC-PM
12	IF	TURB-ML	STUB-LA	*	*	*	THEN	PAC-PM
13	IF	TURB-LA	*	*	*	*	THEN	PAC-MB

表３．パック用制御規則の例

4.2 フィールドテストの実施

実操業データを用いたシミュレーションにより、推論値に問題なく、濁度上昇時の安全性の向上、使用薬品量の削減などの適用効果が見込まれることを確認した後、フィールドテストを実施した。フィールドテストは各凝集剤とも４日間行い、安全のため９時から１６時までの昼間のみとした。テスト時間以外では主に注入率式による制御が行われた。制御周期は３０分である。

安全を優先させたフィールドテストの実施計画を次に示す。

① ９時に異常のないことを確認後、計算機の出力をオンラインにし、ファジィ制御による実運用を開始。

② 制御出力値と原水水質および処理水質を適宜確認し、緊急の場合はオペレータの判断でテストを中止。

③ テスト中止の場合は原因を調査・修正し、安全を確認後、ファジィ制御を再開。

④ 何らかの操作介入があった場合は、その状況を記録。

⑤ １６時にファジィ制御を終了。

⑥ テスト中は計算機でプロセスデータを３０分間隔で収集。

⑦ 安全確認と解析時の最適注入率の判断指標とするためテスト中、適宜ジャーテスト（手分析による最適注入率の決定）を実施。

硫酸バンド使用時のテスト結果の例を図６に示す。フィールドテストは短期間のため、定量的な効果は確認できなかったが、次に示すようにファジィ制御の有効性が確認でき、実運転に支障のないことが分った。（図６の破線と一点鎖線参照）

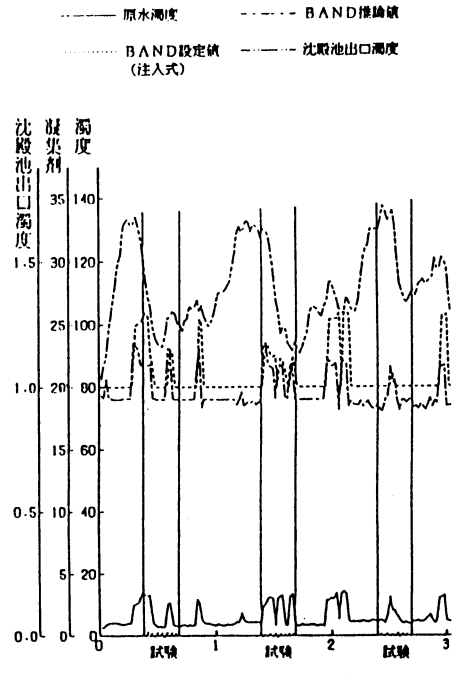


図６．硫酸バンドを用いたフィールドテスト結果例

① 原水濁度が低く、硫酸バンド使用時、汚泥返送水による外乱に対し、注入率式と比較し、安定な制御が可能である。

② 注入率式と比較し、ファジィ制御の方が低い注入率を与え、薬品の削減が可能である。
③ 原水濁度の上昇時にはファジィ推論値が注入率式より多く、下降時には早く減少し、原水濁度の変化に対応した制御が可能である。

図6の例では、原水濁度は3mg／ℓから5mg／ℓと低い値を示しているが、汚泥返送水の流入により、10mg／ℓから15mg／ℓに上昇している。それに応じて、注入率式の値も大きく変動しているが、ファジィ推論では注入率の変動が抑えられ、かつ全体的に低い注入率で操作の安定が図られている。これらが処理の安定を損なっていないことは、沈殿池出口濁度がテスト中とそれ以外で大きな差異の見られないことから確認できる。

4.3 適用結果と考察

フィールドテストの結果より、実運用に支障なく、ファジィ制御の効果が確認できたため、実運用を開始した。その結果を以下に述べる。

図7は硫酸バンド使用時の原水濁度，注入率式の値，凝集剤実注入率及び沈殿池出口濁度を示す。原水濁度が5mg／ℓ程度と低く、注入率を増加する領域であり、かつ後半には沈殿池出口濁度が上昇し、注入率増加の制御が行われているが、薬品使用量は注入率式より平均で0.57mg／ℓ少ない。また、原水濁度の上昇時の注入率増加による安全を考えた制御と下降時の注入率減少を行う制御は確認でき、フィールドテストと同じ効果が得られていることが分かる。

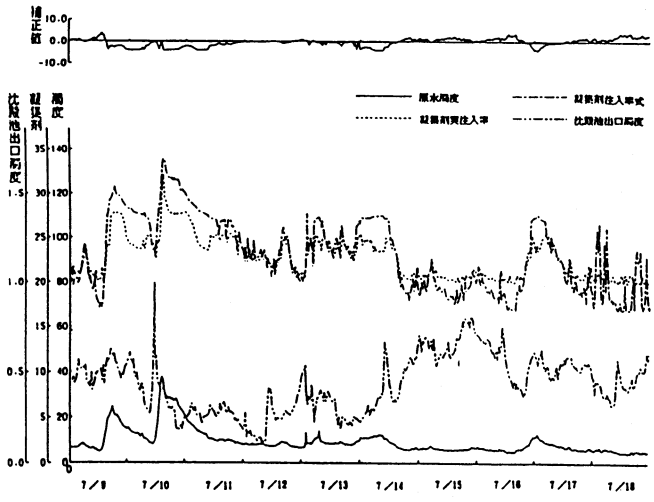


図7. 硫酸バンドの注入運用例

一方、図8にパック使用時の運用結果を示す。降雨により原水濁度が高い場合の例である。硫酸バンドと同様に原水濁度の上昇，下降時の安全を考えた制御と薬品使用量の削減制御の行われていることが分る。かつ、低濁度時の薬品使用量の削減制御の効果により、注入率式の値と比較し、平均で1.26mg／ℓ少なくなっている。なお、この時点では高濁度時（7月29日，30日の注入率式と実注入率が一致する期間）はオペレータの判断で操作が行われ、連続してファジィ制御が実施されなかったが、推論値から判断すると、高濁度時においても問題ないと判断できる。

いずれの薬品使用時においても、最終評価値であるろ過池出口濁度は0であり、ファジィ制御は有効と判断できる。

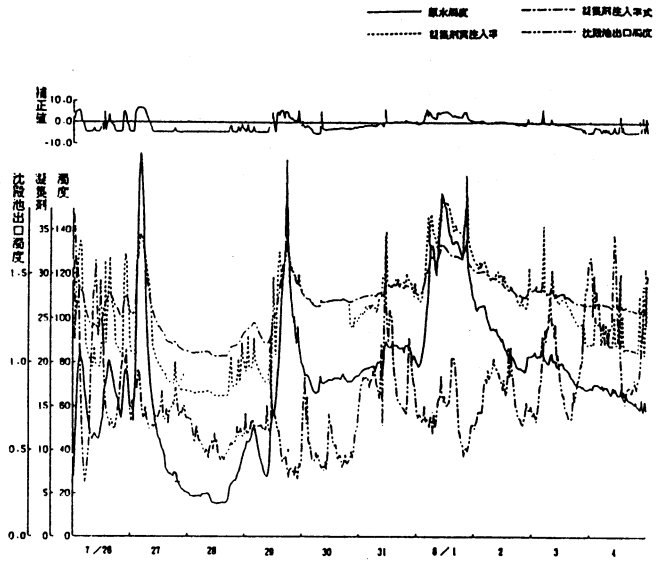


図8. パックの注入運用例

5. まとめ

以上述べたように、浄水場の凝集剤の注入率制御にファジィ制御を適用し、

① 原水濁度の変化に応じて、安全を考えた制御と薬品使用量の削減制御
② 汚泥返送水による外乱変動を抑えた安定制御
③ 従来操作と比較し、全体的に使用薬品量を削減した制御の自動化

を実現出来た。その結果、処理の安定化，オペレータの負荷の軽減が可能となり、ファジィ制御の効果を確認できた。

今後、制御結果の検討を引き続き行い、制御範囲を拡大すると共に水質の変化に対応し、制御性の向上を図って行く計画である。

参考文献

(1) 菅野：「ファジィ制御」、日刊工業新聞社、東京（昭63）
(2) 柳下、伊藤、菅野：「ファジィ理論の浄水場薬品注入制御への応用」システムと制御、28、597（昭59）
(3) 菅野、伊藤、柳下、鬼塚：「汎用ファジィコントールシステム」、富士時報、58、4、59（昭60）

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

TA2-2

ファジィ予測モデルによるプロセス制御

PROCESS CONTROL BASED ON FUZZY PREDICTIVE MODEL

鈴木一如(*) 中森義輝(**) 山中 猛(*)

Kazuyuki Suzuki Yoshiteru Nakamori Takeshi Yamanaka

(*) 国際ファジィ工学研究所

Laboratory for International Fuzzy Engineering Research

(**) 甲南大学 理学部

Faculty of Science , Konan University

Abstruct : This paper proposes a process control method based on a fuzzy predictive model which is constructed by using time-series data collected from a real working process. In the part of fuzzy modelling , a fuzzy ARX model is identified by an interactive algorithm using a modelling support system. In the part of designing controller, a control strategy is determined by a model predictive control algorithm . Finally , an application study is discussed on a real process control problem about stable incineration of the rotary-kiln of sewage sluge.

1、緒言

ファジィ制御は、ファジィシステム技術の実応用の中でも最も進んだ分野であるが、現在までのファジィ制御の実例は、大部分が偏差とその変化分を入力し制御量を出力するという２入力１出力系に対するものであり、積極的に多入出力系を扱ったものは少ない。これは、内部が複雑で干渉やむだ時間を含む多入出力系を我々人間が分かりやすいように扱うには、我々人間に分かりやすいプロセスモデルを必要とするにも拘わらず、従来のファジィ制御法のなかにこのプロセスモデルに基づく制御系設計のための方法論が十分でなかったことによる。

一方、化学工業などのプロセス産業分野においては、多品種少量生産要求、製品の従来以上の高品質化要求を達成するためのフレキシブルかつ高度な生産体制の確立が求められており、これを達成するための、より進んだ制御システム実現の研究開発が進められている。近年のこの分野での最も注目される制御方式はモデル予測制御[1]であるが、プロセス制御の現場でのヒューリスティックな知見を基にした簡単なプロセスモデルからプロセスの未来状態を予測し、現在の制御量を導出しようとする極めて現実的な制御手法である。従来より、プロセス状態量の未来値が予測できれば、よりよい制御が実現できることは、良く知られたところであるが、モデル予測制御で用いられているプロセスモデルがインパルス応答モデル、ステップ応答モデルという我々に分かりやすいモデルであることが注目される大きな理由の１つになっていると言えよう。

本報告では、プロセス制御に求められている上記のニーズとファジィ制御技術分野の上記のシーズに合わせて応えることを目的に、ファジィ予測モデルによるプロセス制御の新しい方法を提案し、プロセスモデルの作成が困難な多変数プロセスである下水汚泥の回転乾燥焼却炉（ロータリーキルン）を対象として検討する。

2、プロセスのファジィモデリング

高木、菅野[2]により提案され、姜[3]ら、によって発展されたファジィモデリングは、オーバーラップを許した幾つかの部分データセットを用いて構築された線形モデル群を、メンバーシップ関数を用いて結合し、滑らかな曲線をインプリシットな形式で組み立てるものである。それは、プロダクション・ルールの集合からなるエキスパートシステムと統計学、特に回帰分析あるいは時系列解析との融合という意味で、まさに「発見的」であった。

オリジナルな手法では、データを２つのデータセットに分割し、不偏性規範をメルクマールとしてアルゴリスミックにモデル同定を行っている。即ち、ファジィモデリングにおいては、データのファジィ分割、メンバーシップ関数の同定、部分線形モデルの構築と言うサブ問題が存在し、それらが互いに強く影響し合って、トータルモデルとしてのファジィモデルの良否を決める。非可算無限の組み合わせの中から最適なモデルを選ぶ手続きが存在しないことから、「どの範囲を調べるか」ということと「どこで満足するか」という二つの約束ごとをしなければならない。ここにアルゴリズムのすべてがある。

「ファジィは主観の科学化」[4]という。アルゴリズムの中にその方向が見えなければ、ファジィモデリングは統計解析の一つであるとかたづけてもおかしくはなく、ファジィモデリングのアルゴリズムの中には主観をいかに取り込むかという、ファジィの命ともいうべき手続きが記述されていなければならない。言い換えれば、データと規範のみに頼るのではなく、データやモデルを「観る」手続きが記述されていなければならない。

本報告では、モデリング過程における人間の主観（経験的知見）を重視する立場から、対話型モデリング支援システム[5]により、これを行なう。対話型モデリング支援システムのアルゴリズムは次の通りである[6](図1参照)。

ステップ1　　データの観察

収集された時系列データに必要な前処理(間引き、補間)を行ってサンプリング間隔を揃えるとともに、周期性の検討(自己相関関数)、共線性の検討(主成分分析)、周波数分析(パワースペクトル密度関数)、トレンド除去、ノイズ処理、定常性検定などの事前検討を行う。

ステップ2　　全域線形モデルの構築

ステップ1の結果をもとに、入出力変数、サンプリング間隔を決定し、ARXモデルを同定する。実データ又はランダム入力によるシミュレーションを行なって、モデルの挙動をチェックする。

ステップ3　　データのファジィ分割

ここでは、状態変数を前件部変数としてWard法などのクラスタリング手法を用いてデータをファジィ分割する。分割変数としては、対象に対する先験的知見を基本として選定するが、データの散布状況を観察しながら分割に使用する変数（複数であっても良い）の候補を決める。

ステップ4　　ファジィARXモデルの同定

データを観察しながら、分割変数の候補とした変数のメンバーシップ関数を仮定する。メンバーシップ値がある値以上の範囲のデータを用いて、各部分空間毎に線形モデルを同定する。

ステップ5　　メンバーシップ関数のチューニング

実データ又はランダム入力によるシミュレーションを行って、モデルの挙動を調べる。この際特にメンバーシップ関数が重なる部分の挙動に注意して予測誤差を最小にするように、パラメータをチューニングする。チューニング手法としては

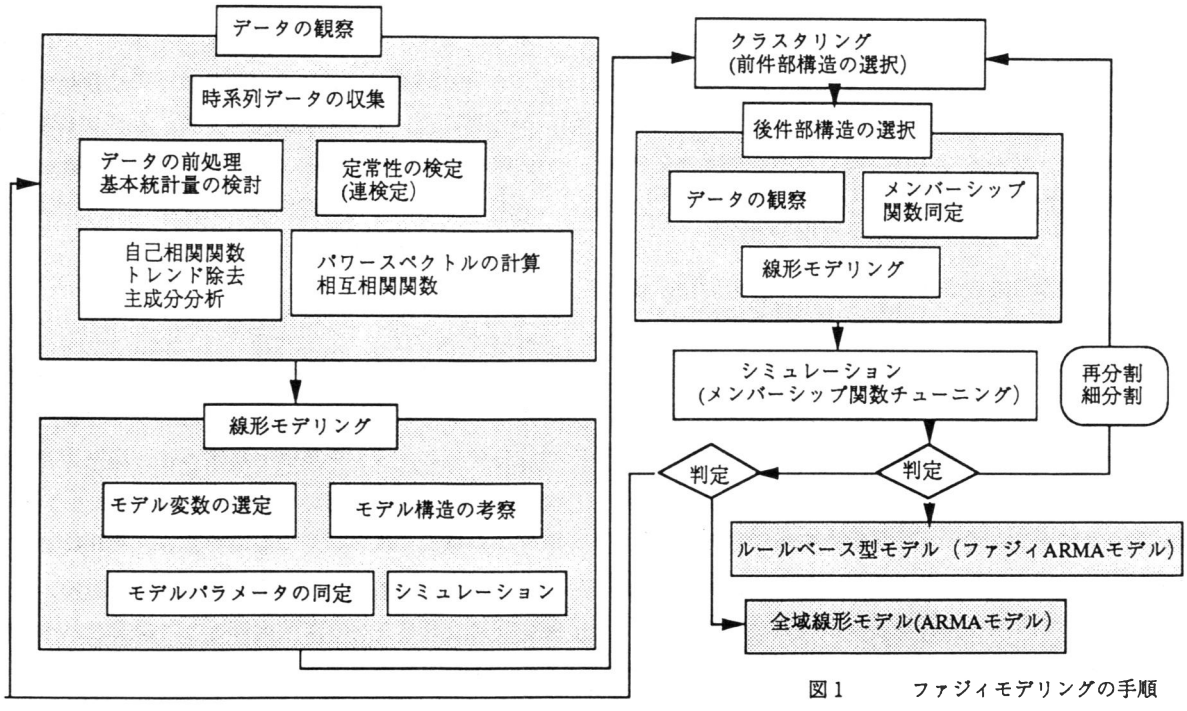


図１　　ファジィモデリングの手順

視察によるランダム探索によるが、他の手法[7]を用いても良い。結果が不十分であれば、ステップ3又はステップ1に戻り、データの再分割または細分割をおこなってステップ4, 5を繰り返す。

この結果得られるファジィARXモデルは、つぎの形式のモデルである。

ルールR^i:

IF $y_\alpha(t-l_\alpha)$ is A_α^i and $(y_\beta(t-l_\beta), y_\gamma(t-l_\gamma))$ is $A_{\beta\gamma}^i$ and .....

$$\text{THEN} \quad Y^i(t)=\sum_{j=1}^{N} C_j^i Y(t-j)+\sum_{j=1}^{M} D_j^i U(t-j) \tag{1}$$

但し、$A_\alpha^i, A_{\beta\gamma}^i, \ldots$はファジィ集合、$Y(t)=[y_1(t), y_2(t), \ldots y_n(t)]^T$は出力変数ベクトル, $U(t)=[u_1(t), u_2(t), \ldots u_m(t)]^T$は入力変数ベクトルであり、$C_j^i, D_j^i$は係数マトリックスである。ルールの合成によるY(t)の予測値は、

$$Y(t)=\sum_{i=1}^{p}\omega_i(t)Y^i(t)/\sum_{i=1}^{p}\omega_i(t) \tag{2}$$

で与えられる。ここに、pはルールの総数、$Y^i(t)$はルールR^iの出力であり、荷重$\omega_i(t)$はメンバーシップ値、$A_\alpha^i(y_\alpha^*(t-l_\alpha)$, $A_{\beta\gamma}^i(y_\beta^*(t-l_\beta), y_\gamma^*(t-l_\gamma))$, ...の積で与える。

3、制御系の設計

ここでは、前記で同定されたファジィモデルを用いた制御系設計の一方法を提案する。

ファジィモデルからの制御系の設計方法としては姜ら[7]、田中ら[8]の方法が提案されているが、これらは各部分空間毎に同定された線形回帰モデルから線形制御理論に従って最適レギュレータを導出し、導出された最適制御量を部分空間に対して前件部で規定されている適合度による重みづけ平均によって、全体空間に対する制御量を導出する方法であるが、部分空間での最適制御量の重み付け平均が全体空間での最適制御量である保証はない。

本方法では、モデル予測制御の考え方[9]を応用し、以下のアルゴリズムを与える。

ステップ1

同定されたファジィARXモデルモデルをインパルス応答モデルに変換する。これは、システムの挙動を我々に分かりやすい個別の関係に表現しなおすことであり、相互の関係の処理はモデルに委ねる精神に拠っている。

(1),(2)式で得られたファジィARXモデルの後件部は(3)式のファジィ・インパルス応答モデルに変換される。

ルールR^i: $$\text{THEN} \quad Y^i(t+j)=\sum_{k=1}^{q} H_k^i U(t+j-k) \tag{3}$$

但し、qはインパルス応答曲線を観察して決定する。H_k^iはパルス伝達関数行列である。これを用いれば、ファジィ予測モデルの出力は次式で与えられる。

$$Y_M(t+j)=\sum_{k=1}^{q} H_k^{t+j} U(t+j-k) \tag{4}$$

ここに、

$$H_k^{t+j}=\sum_{i=1}^{p}\omega_i(t+j)H_k^i/\sum_{i=1}^{p}\omega_i(t+j) \tag{5}$$

である。

現時刻をtとし、過去の入力と現時刻以降の未来の入力とを分けて(4)式を表現しなおすと

$$Y_M(t+j)=\sum_{k=1}^{j} H_k^{t+j} U(t+j-k)+\sum_{k=j+1}^{q} H_k^{t+j} U(t+j-k) \tag{6}$$

と表せる。

現時刻をtとし、今までプロセスには入力として、[U(t-1), U(t-2),....]が加えられ、さらに現時刻からMステップ未来にわたって [U(t), U(t+1), ..., U(t+M-1)]の入力系列がプロセスに加えられるとする。時刻t+Mから以降は入力値を変更しない。この時、時刻t+LからPステップにわたる出力の値を求め、さらに(4)式でj=0とおいた現時刻のモデル出力をもとに、$Y_M(t+j)-Y_M(t)$を求めると、最終的に次式が得られる。

$$Y_M=Y_{M0}+H_F U_a+H_0 U_0 \tag{7}$$

ここで、

$Y_M=[Y_M^T(t+L), \ldots Y_M^T(t+L+P-1)]^T$, $Y_{M0}=[Y_M^T(t), \ldots Y_M^T(t)]^T$

$U_a=[U^T(t), \ldots U^T(t+M-1)]^T$, $U_0=[U^T(t-1), \ldots U^T(t-q)]^T$

$$H_F=\begin{bmatrix} H_L^{t+L}, H_{L-1}^{t+L}, \ldots, H_{L-M+2}^{t+L}, \sum_{k=1}^{L-M+1} H_k^{t+L} \\ H_{L+P-1}^{t+L+P-1}, H_{L+P-2}^{t+L+P-1}, \ldots, H_{L+P-M+1}^{t+L+P-1}, \sum_{k=1}^{L-M+P} H_k^{t+L+P-1} \end{bmatrix}$$

$$H_0=\begin{bmatrix} H_{L+1}^{t+L}-H_1^{t+L}, H_{L+2}^{t+L}-H_2^{t+L}, \ldots, H_{L+q}^{t+L}-H_q^{t+L} \\ H_{L+P}^{t+L+P-1}-H_1^{t+L+P-1}, H_{L+P+1}^{t+L+P-1}-H_2^{t+L+P-1}, \ldots, H_{L+q+P-1}^{t+L+P-1}-H_q^{t+L+P-1} \end{bmatrix}$$

ステップ2

(7)式による予測値はモデル誤差や外乱のため実際値とはずれるので、これを補正する予測式として(8)式を与える。

$$Y_P(t+j) = Y_M(t+j) + \{ Y(t) - Y_M(t) \} \qquad (8)$$

ここで、Y(t)は、$Y_M(t)$に対応する実測値のベクトルである。

今、現時刻における観測値Y(t)を始点として設定値Rに近づく目標値の軌道$Y_R(t+j)$を与えておく。これは、出力を一気に設定値に持っていくのではなく、ある滑らかな軌道に沿ってLステップで到達させようとするもので、その軌道を参照軌道と言う。参照軌道として一次遅れ曲線を選べばその時定数は、応答速度を調節するパラメータとなる。

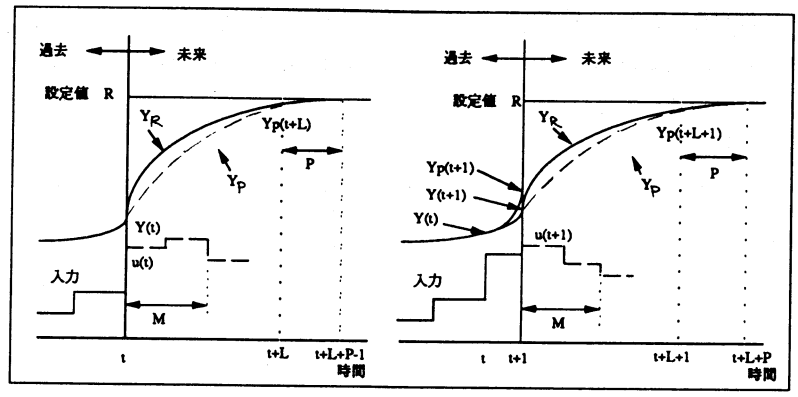


図2　　モデル予測制御の基本概念

ステップ3

Y(t)を始点として、Lステップ先の未来値をプロセスのモデルを使って予測し、予測値が目標値に近くなるように現時刻での操作量を次式により求める。即ち、

評価関数　　$J = \| Y_P - Y_R \|^2 \rightarrow \min.$

とするU_aは

$$U_a = (H_P^T H_P)^{-1} H_P^T (Y_R - Y - H_0 U_0) \qquad (9)$$

で求められる。ここに、

$$Y_P = [Y_P^T(t+L), \ldots\ldots, Y_P^T(t+L+P-1)]^T$$

であり、Y_R は Y_P に対応する参照軌道である。

H_P及び H_0 の計算にあたっては、前件部の適合度が必要となるが、これには、参照軌道で与えられる状態量により計算する。求められたU_aのM個の操作系列の内、現時刻の$U_a(t)$のみをプロセスに加える(図2の左図参照)。

ステップ4

時刻t+1において、再び出力Y(t+1)を観測する。観測値はモデルの不完全さや外乱のために時刻tにおける予測値とは異なっているため、時刻t+1を新たに現時刻とし、観測値Y(t+1)を新たな始点として目標値を与え直し、ステップ2以降を繰り返す(図2の右図)。このアルゴリズムでは、出力を目標値に幅Pの区間にわたって一致させようとし、またそのために、ある区間の入力(Mステップ)を決めるようになっていることを特徴としている。P,Mとして1以上がとれる。

4、実プラントデータによる検討

以上に述べた方法を実プラントデータについて検討した。対象プラントは、下水道終末処理場の水処理プロセスから発生する余剰汚泥を焼却処理する回転乾燥焼却炉（ロータリーキルン、図3）である。

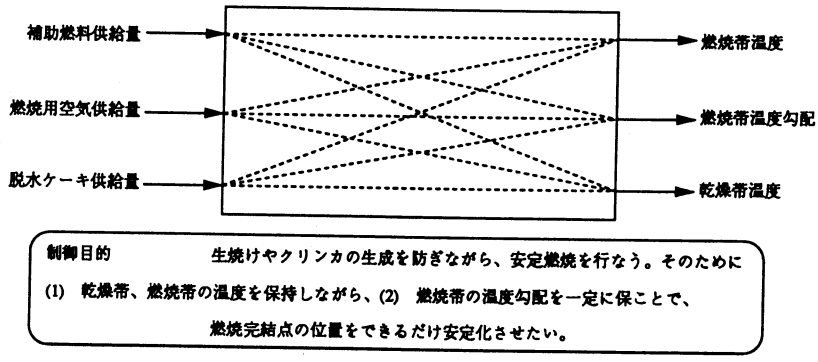


図3　　下水汚泥の回転乾燥焼却炉

回転乾燥焼却炉の制御は従来排ガスの炉出口温度を一定とするよう、補助燃料供給量を調節する方法で行なわれてきているが、被燃焼処理物（脱水ケーキ）の性状変化に対応できないため、生焼けやクリンカの生成防止のためにオペレータは、炉内の燃焼状況をTVカメラにより常に監視しながら、燃焼完結点の位置が適正な範囲にあるよう補助燃料供給量、脱水ケーキ投入量、燃焼用空気供給量等を調節する運転を行ってきている。

このプラントは、炉内の燃焼状態を表現する現象論モデルが立ちにくいうえ、多変数で干渉が大きく脱水ケーキの性状変化に応じて運転条件の大幅な変更を余儀なくされるなど複雑で悪構造な性格のプラントである。

4.1　データの収集と前処理

手動運転を行なっている炉よりオンラインデータを採取し（図4に例）、統計的解析を中心にデータを検討した。

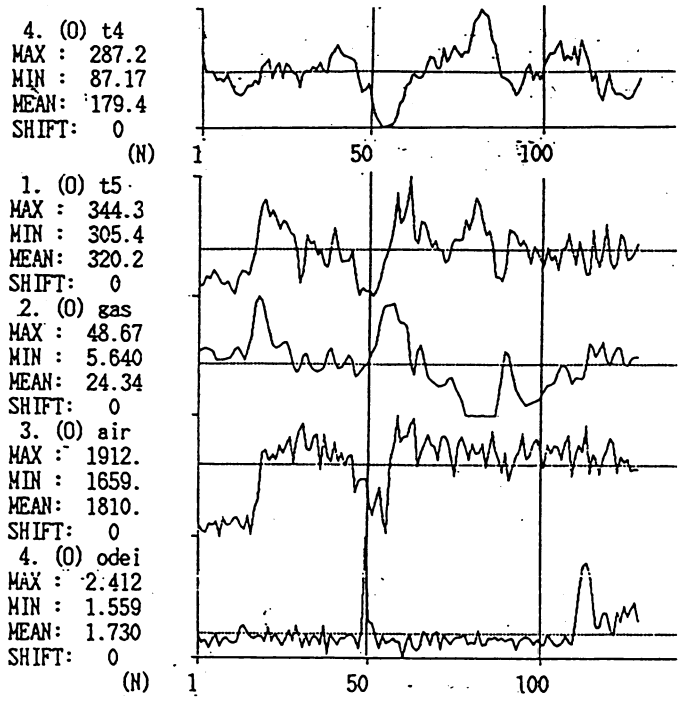


図4　　収集された時系列データの例

その結果、

(1) 時系列データのスペクトル解析結果より、各変数の支配周波数は長周期側にあるためモデル作成データのサンプリング間隔は10分とする。

(2) 燃焼完結点の位置を保持する安定燃焼のためには、燃焼域の温度（t0）及びその温度勾配（tm）を管理することが重要であることが分ったため、これを表現する新しい温度指標を導入した。

(3) 主成分分析、自己及び相互共分散関数などの分析結果から、モデリングの対象とする系として、3入力（補助燃料供給量、燃焼用空気供給量、脱水ケーキ供給量）3出力（t4（乾燥帯温度）,t0,tm）系を設定した。

4.2　ファジィモデルの構築

構築されたファジィARXモデルの例を図5に示す。このファジィARXモデルにランダム入力を加えたシミュレーションの結果の一部を図6に示す。

5、まとめ

1)　時系列データを用いたファジィARXモデルの構築法とモデルにもとづく予測制御法の基本的な考えを提案した。

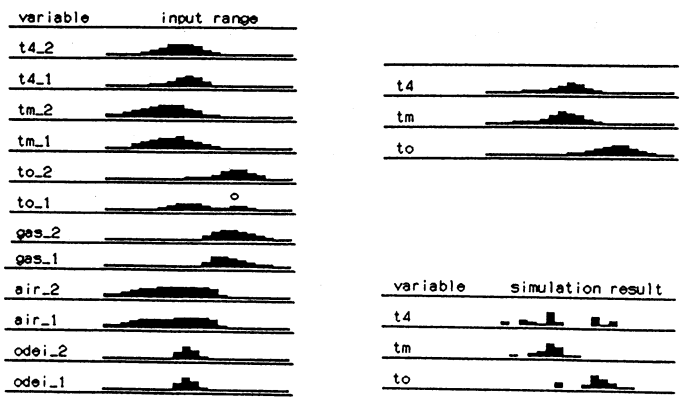
2)　提案した方法の実用性について、実プラントから収集したデータについてファジィARXモデルを同定し、検討した。モデル予測制御系の実証がつぎの課題である。

R¹: IF t0_1 is Big THEN t4 = -7.7741D+02 + 2.7765D-02 t4_2 + 4.6545D-01 t4_1 +1.9541D+02 tm_2 + 3.7564D+01 tm_1
- 1.6527D-01 t0_2 + 7.7875D-01 t0_1 - 1.6050D+00 gas_2 + 1.0973D+00 gas_1
-1.4979D-02 air_2 + 5.2506D-02 air_1 + 2.3030D+01 odei_2 + 1.0003D+02 odei_1
tm = + 4.9753D-01 + 3.1992D-04 t4_2 - 6.0570D-06 t4_1 + 9.4086D-04 tm_2 + 5.8331D-01 tm_1
- 2.8706D-04 t0_2 -2.6611D-04 t0_1 -3.9370D-04 gas_2 + 5.6094D-04 gas_1
+6.3457D-05 air_2 + 7.1850D-05 air_1 + 4.9711D-02 odei_2 -8.0139D-02 odei_1
t0 = +5.1121D+02 + 2.0805D-01 t4_2 -2.4823D-02 t4_1 -1.8003D+02 tm_2 -2.1067D+01 tm_1
+8.2636D-02 t0_2 +5.1993D-01 t0_1 -2.8680D-01 gas_2 + 8.3027D-01 gas_1
+6.0450D-03 air_2 -2.0309D-03 air_1 -2.8956D+01 odei_2 -4.6551D+01 odei_1

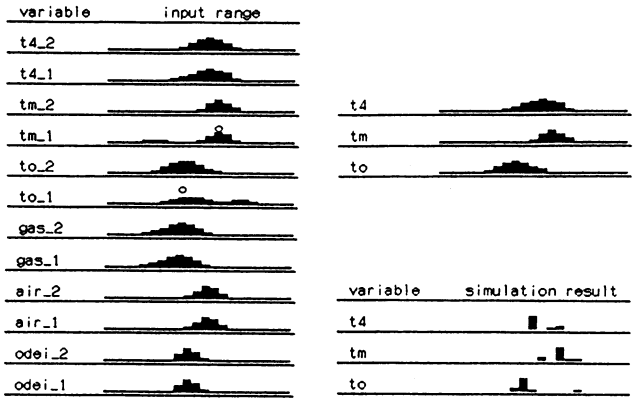
R²: IF t0_1 is Small and tm_1 is Small
THEN t4 = -6.4090D+03 +9.6383D-01 t4_2 -1.4058D+00 t4_1 -2.7644D+02 tm_2 1.3819D+02 tm_1
-3.0511D-01 t0_2 + 7.7654D +00 t0_1 - 6.0519D-01 gas_2 -2.9756D+00 gas_1
-4.2572D-02 air_2 +1.0341D+00 air_1 -1.4091D+02 odei_2 +4.4904D+02 odei_1
tm = +1.0650D+01 + 1.4359D-03 t4_2 +3.8552D-03 t4_1 -1.9548D-01 tm_2 +1.9447D-01 tm_1
-1.0857D-02 t0_2 -3.1220D-03 t0_1 +2.5718D-03 gas_2 +8.3117D-03 gas_1
-1.1201D-03 air_2 -2.3848D-04 air_1 +4.1694D-02 odei_2 +5.8482D-02 odei_1
t0 = -2.0717D+03 + 6.0697D-01 t4_2 -8.3974D-01 t4_1 -1.5070D+02 tm_2 +7.8853D+01 tm_1
-2.5091D-01 t0_2 +3.5472D+00 t0_1 +1.0818D+00 gas_2 +4.8536D-02 gas_1
-9.8211D-02 air_2 +3.5351D-01 air_1 -4.8328D+01 odei_2 +2.1400D+02 odei_1

R³: <略>

図5　　同定されたファジィARXモデルの例



caseA



caseB

図6　　シミュレーション結果の例

caseAはt0-1をややおおきめに固定し、他をランダムに選択した場合で、右上図は出力の分布（メンバーシップ関数）を示し、右下図がシミュレーション結果を示す。

caseBはt0-1をやや小さく固定し、さらにtm-1をやや大きく固定し、他をランダム入力とした場合で、分布がこのように変化する。右上図は、出力の可能な分布、右下図は、100回のランダム入力によるシミュレーション結果を示す。尚、図の領域は、m+3σ

6. 結言

ファジィ制御のアドバンスト制御への発展を目指して、ファジィ予測モデルによるプロセス制御の一方法を提案し、悪構造多変数プロセスである下水汚泥の回転乾燥焼却炉について具体的に検討した。

世の中の多くのプロセスシステムは、現象が複雑すぎて現象論的モデルの作成が困難なことが多く、また仮に作成できたとしても、複雑すぎて制御系設計段階での取り扱いが困難であることがしばしば起こる。このような場合に、現実の問題解決のための実用的な手法として、入出力間の観測値のような時系列データに基づいてプロセスシステムのモデルを作成し、このモデルに基づいて制御系を構築する手法が非常に有力になってこよう。本報が、この問題に対し一つの方向を示せれば幸いである。

<謝辞>

本研究を進めるにあたり、大阪大学情報工学科西谷紘一助教授、金沢大学機械システム工学科田中一男助手には、有益なご討論、ご意見をいただいた事を感謝いたします。また、本研究の機会を与えていただき、終始ご指導いただいている国際ファジィ工学研究所寺野寿郎所長に感謝いたします。

[参考文献]

[1] 西谷, モデル予測制御の応用, *計測と制御*、28, (11),1989

[2] Takagi,T. and Sugeno,M. : Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, *IEEE Trans.on Sys. Man and Cybernetics*, SMC-15, (1), pp.116/132, 1985

[3] Sugeno, M. and Kang, G.T. : Structure Identification of Fuzzy Model, *Fuzzy Sets and Systems*, 28, pp. 15/33, 1986

[4] 菅野, ファジィ理論の展開一科学における主観性の回復, サイエンス社, 1989

[5] 中森, 甲斐沼, ファジィシミュレーションとその環境予測への応用, システム*制御情報学会論文誌*, 2 ,(5),pp.166/174, 1989

[6] 中森, 「ファジィOR」講習会テキスト, 日本ファジィ学会主催, 1990,7,13

[7] Kang, G. T. and Sugeno, M. : Fuzzy Modelling and Control of Multilayer Incinerator, *Fuzzy Sets and Systems*, 18, pp. 329/346, 1986

[8] 田中, 菅野, ファジィ制御系の設計と解析に関する一考察, 第5回ファジィシステムシンポジウム, PP.127/132, 1989

[9] 大嶋, モデル予測制御, 化学工学展望シリーズ第5回「プロセス制御技術1989」化学工学会関西支部編, 1989.11

<連絡先>

〒251　横浜市中区山下町89-1　シイベルヘグナービル4F
国際ファジィ工学研究所第1研究室
鈴木一如
TEL　045-212-8221　FAX　045-212-8255

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

TA3-1

ファジィ制御によるアームロボットを用いた2次元不規則移動物体の把握

Grasping 2-D Random Moving Object Using Fuzzy Controlled Arm Robot

廣田　薫*　　○渡辺　秀則**
Kaoru Hirota　　Hidenori Watanabe

＊法政大学工学部　　＊＊法政大学大学院
*College of Engineering, Hosei Univ.　　**Graduate School of Hosei Univ.

abstract
A fuzzy controlled robot system, which can grasp a 2-D randomly movig spherical object, is presented. It consists of a scalar type arm robot, an image processing system, and a fuzzy controller. The moving position of the spherical object is predicted by a fuzzy inference method based on a trajectry pattern matching procedure.

1．はじめに

視覚機能を持った水平多関節型アームロボットを用いて、ファジィ制御手法により2次元の不規則移動物体の把握動作を実現した。本研究は、傾斜のゆるやかな摺鉢状の台の上を転がる球状の物体の把握の研究[1)2)]を、平面上を不規則に動き回る物体の把握に拡張したものである。回転している駒のように不規則に動く球状の物体を製作し、この物体をファジィ推論を用いて把握する。

移動物体の軌跡の座標データからファジィ推論を用いたパターンマッチングを行い、移動物体の移動先の座標を予測して、アームロボットを起動して移動物体を把握する。用いたファジィ推論は3入力2出力で、入力は軌跡の座標データから求めたパターンマッチングのための3つの特徴量、出力は軌跡の最後の点からのX座標・Y座標とした。

2．2次元不規則移動物体把握ロボットのシステムの構成

ファジィ制御手法による2次元不規則移動物体の把握動作実現のためのシステム構成を図1に示す。

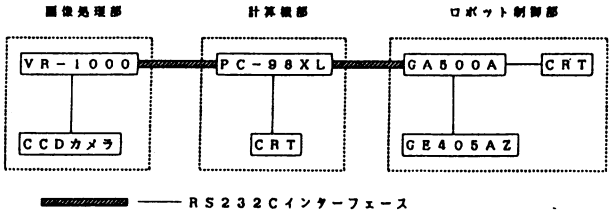


図1　2次元移動物体把握ロボットのシステム構成

図1に示すように、本システムはロボット制御装置、パーソナルコンピュータ、画像処理装置の3要素から成る。この間のコマンドとデータの通信には、ＲＳ２３２Ｃインターフェースを用いている。本来、ロボット制御装置と画像処理装置は直接接続してあったのであるが、これでは静止している物体の把握しかできないので、ファジィ推論による移動物体把握の動作実現のために１６ビットパーソナルコンピュータを用いて中継した。

3．2次元不規則移動物体把握の問題設定

2次元不規則移動物体把握のために、図2に示す直径7センチの球状の物体を制作した。中心にあるモーターを回転させ、モーターの先についているおもりを回転させることによって球体の重心を移動させ物体を不規則に運動させる。移動物体の軌跡の一例を図3に示す。図3において各点は画像処理装置で認識した座標で、そのサンプリングタイムは０．３秒である。

そしてこの物体を把握するためにファジィ推論を用いる。

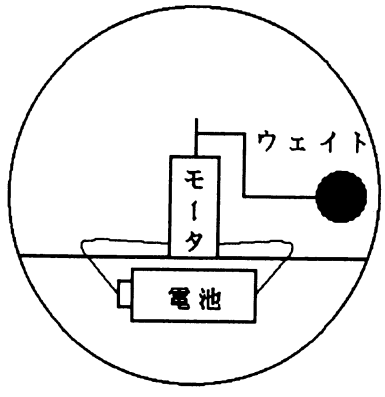


図2　不規則移動物体の構造

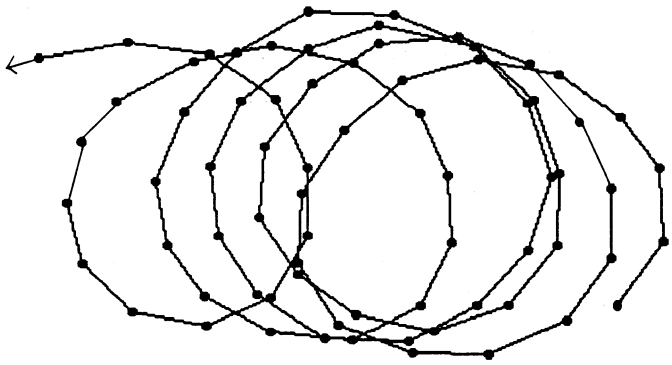


図３　移動物体の軌跡の一例

４．ファジィ推論部

移動物体の移動する先の座標の予測には、ファジィ推論を用いる。図４に示すように画像処理装置で認識した移動物体の軌跡の連続した５点の座標データからパターンマッチングのための３つの特徴量を得て、移動物体の移動予測先の座標をファジィ推論を用いて求める。

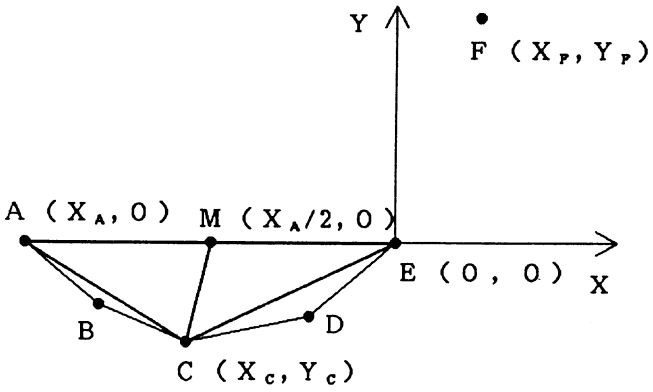


図４　移動予測先の座標

図４において原点をＥ（０，０）として、ＡＥをＸ軸にとり、Ｆ（X_F, Y_F）点のＸ座標、Ｙ座標をファジィ推論を用いて求める。Ａ～Ｅの５点のうちのＡ（X_A, 0），Ｃ（X_C, Y_C），Ｅ（X_E, Y_E）の３点を用いて前件部入力変数の特徴量として以下の３つを用いることにした。

１．Ａ（ＡＥの長さ）$=\sqrt{X_A^2}$　　（１）

２．Ｂ（ＡＥの中点からＣ点までの長さ）

$$=\sqrt{(X_A/2-X_C)^2+Y_C^2} \qquad (2)$$

３．Ｃ（ＡＣとＣＥの長さの比）

$$=\frac{\sqrt{X_C^2+Y_C^2}}{\sqrt{(X_A-X_C)^2+Y_C^2}} \qquad (3)$$

以上の前件部入力変数のメンバーシップ関数のファジィ変数を表１に示す。前件部のメンバーシップ関数は要素数３１の離散値型全体空間を採用した。

次に図５に前件部の各入力変数の全体空間を示す。図中の数値は、画像処理装置の座標系からとったものである。

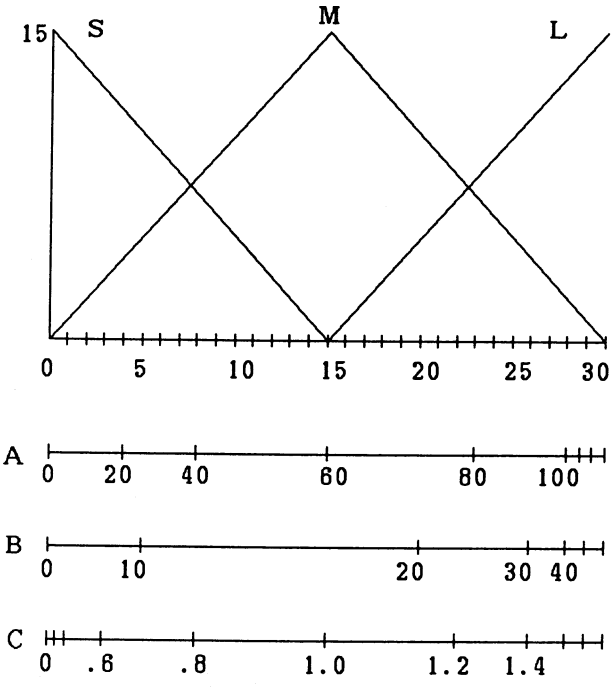


図５　前件部の全体空間

図５の様な全体空間採用した理由は、パーソナルコンピュータのメモリーの制約上、離散値型のファジィ変数を取らざるを得ないので、より効果的に３１の離散値を用いるため入力値が一部分に集中しないようにしたためである。

表１　前件部離散値ファジィ変数

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
S	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

次に後件部のメンバーシップ関数を図６に示す。後件部のメンバーシップ関数は、ラベルの数３、要素数１００の離散値型とした。

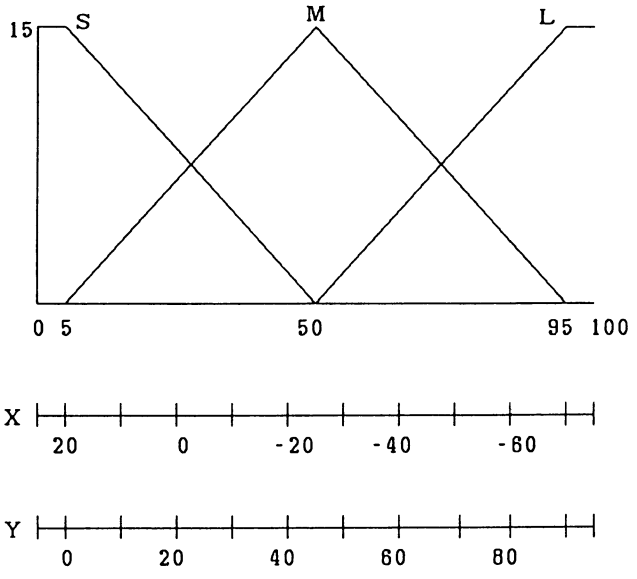


図６　後件部メンバーシップ関数

不規則移動物体把握のための制御規則として最終的に２０通りのルールを用いることにした。以下にその全てのルールを示す。

```
IF  A=S  B=S  C=S  THEN  X=L  Y=S
IF  A=S  B=S  C=L  THEN  X=L  Y=S
IF  A=S  B=M  C=S  THEN  X=M  Y=M
IF  A=S  B=M  C=L  THEN  X=S  Y=S
IF  A=S  B=L  C=L  THEN  X=M  Y=M
IF  A=M  B=S  C=S  THEN  X=M  Y=M
IF  A=M  B=S  C=M  THEN  X=M  Y=M
IF  A=M  B=S  C=L  THEN  X=M  Y=M
IF  A=M  B=M  C=S  THEN  X=M  Y=M
IF  A=M  B=M  C=M  THEN  X=S  Y=M   (4)
IF  A=M  B=M  C=L  THEN  X=S  Y=S
IF  A=M  B=L  C=S  THEN  X=M  Y=L
IF  A=M  B=L  C=M  THEN  X=S  Y=M
IF  A=M  B=L  C=L  THEN  X=S  Y=S
IF  A=L  B=S  C=S  THEN  X=L  Y=L
IF  A=L  B=S  C=M  THEN  X=L  Y=L
IF  A=L  B=M  C=S  THEN  X=L  Y=L
IF  A=L  B=M  C=M  THEN  X=M  Y=L
IF  A=L  B=L  C=M  THEN  X=M  Y=L
IF  A=L  B=L  C=L  THEN  X=M  Y=M
```

ファジィ推論の推論法は、一般的なmax-min合成重心法を用いた。

５．推論結果のシミュレーション

作成したファジィ推論の推論結果を用いてパーソナルコンピュータ上で推論結果のシミュレーション実験を行った。

連続した座標データからの実測結果と推論結果の座標の誤差がどの程度あるかをシミュレーションした。その一例を図７に示す。

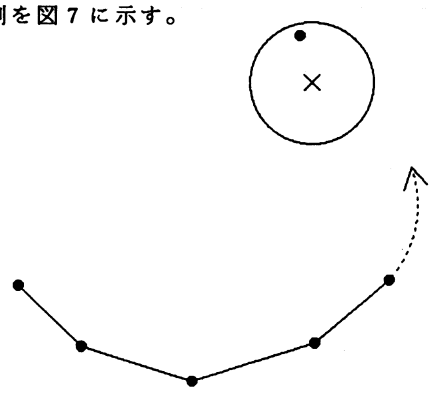


図７　シミュレーション実験の一例

図７において、黒点が座標データからの実測結果であり、×点が推論結果である。推論結果の点を中心とした円はロボットの把握可能範囲を示しており、直径１０センチとした。約７００の座標データを用いたときのシミュレーション実験による把握率は、１８％であった。

全体の把握率では、適切でないルール、メンバーシップ関数がわからないので、各入力変数の全体空間の３１の要素を３分割した２７個の入力空間の把握率を表２～４に示す。

表２　把握率（１）　（単位％）

A＝ B＝	0～10	C＝ 11～20	21～30
0～10	3	11	0
11～20	9	——	8
21～30	——	——	0

表３　把握率（２）　（単位％）

A＝11～20 B＝	0～10	C＝ 11～20	21～30
0～10	17	15	17
11～20	13	20	21
21～30	18	26	29

表４　把握率（３）　（単位％）

A＝21～30	0～10	C＝11～20	21～30
0～10	２６	２３	５
B＝ 11～20	１９	２７	１９
21～30	——	１５	——

表２に示すように、Ａが小さいときの把握率が低くなっている。このため、ルール、メンバーシップ関数の検討が必要である。

６．おわりに

ファジィ制御による２次元不規則移動物体の把握動作については、把握率２割弱という結果が得られた。この結果については、一部分の入力空間の把握率が低くなっているのでこの部分のルール、メンバーシップ関数の調整を行なえば把握率をあげることが可能であると思われるので、引続き検討していく。

参考文献

１）　廣田、渡辺：水平多関節型アームロボットを用いたファジィ制御による２次元移動物体の把握、第５回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、PP.65/70,1989.6.2

２）　廣田、渡辺：水平多関節型アームロボットを用いたファジィ制御による２次元移動物体の把握、電気学会研究会資料、PP.31/38,1989.11.22

問い合わせ先：〒184 東京都小金井市梶野町3-7-2
法政大学工学部
TEL 0423-81-5341（内線304）

TA3-2

局所観測情報による適応型経路プランニングに基づく移動ロボットのファジィ制御

Intelligent Fuzzy Control of Mobile Robot Based on Adaptive Path-Planning from Incompletely Observed Information

○椹木哲夫，片井修，岩井壮介，伊藤公一

Tetsuo SAWARAGI, Osamu KATAI, Sosuke IWAI, Koich ITOH

京都大学工学部

Faculty of Eng., Kyoto University

As for the control of a mobile robot in a world where the complete map is not obtained, the reasoning and planning capabities by monitoring spatio-temporally restricted information of the world are required. Wherein, since detailed plans cannot be built in advance, the robot has to be able to build or change its plans in response to the shifting situations at execution time. This paper at first presents a way for global path-planning based on the topological relationships existing in the interactions between the robot and the environment by a qualitative-spatial reasoning. Second, an architecture of an intelligent fuzzy controller is presented for avoiding the surrounding obstacles locally as well as for seeking for the attainment of the global plans that are produced in the former module.

Key words: intelligent control, fuzzy control, mobile robot, adaptive/reactive planning, spatial reasoning.

1．まえがき

従来の自律誘導型の移動ロボットにおいては，環境内の進むべき経路や回避すべき障害物に関する情報から詳細な認知マップを構成し，これにロボット自身の位置・速度情報を個別に抽出して照合していく制御方式が主流である．本研究で扱う大規模空間（ロボットの置かれた環境の全体構造がある地点で観測されるものよりも十分大きな空間）のように，時空間的な局所に限定された観測情報からの経路計画やプラン実行を余儀なくされる場合，この方式では処理負荷が大きく実時間処理が困難になる．本研究では，ロボットの移動に伴う環境（対象）の「見え方」やその変化を知覚することによって，同時に二重の情報—すなわち対象についてと自身についての情報—を抽出することができる点に着目し，自走ロボットの走行制御システムを，見え方のトポロジに関する定性空間推論による上位大局レベルでの概略経路計画と，そのもとでのファジィ制御による局所的な障害物回避に分けて実現する．ここでは，計画されたものがそのまま実行可能であるとは限らず，プラン実行時に知覚される環境情報に基づいて，適応的かつ即応的にプランを修正していくことが必要になることから，両者の間の円滑なコミュニケーションが要請されることになる．

2．環境設定とシステムの概要

Fig.1 に本システムの概要を示す．ロボットは自由空間内に互いに識別可能な障害物が配置された中を，与えられた初期位置から目標位置に至るために，障害物を境界標（ランドマーク）として活用しながら経路プランニングを行ない，このプランに従って，

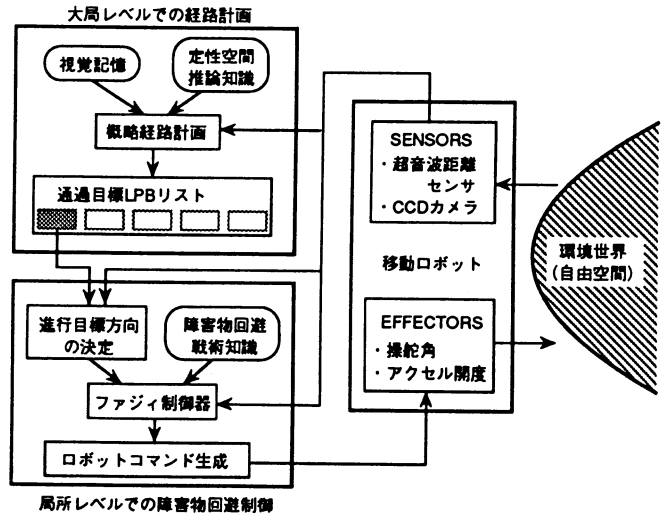


Fig.1 システムの概要

障害物を回避しながら移動を行なう．システムはランドマークの絶対位置や地図に関する情報を持つのではなく，環境世界中をいくつかの経路で通り抜けた際に得られた局所的な視野情報のみを記憶しているものとする．ロボットは，米国ヒースキット社製HERO-2000で，前進・後退用の駆動輪と操舵輪，360度方向にスキャン可能な超音波センサとCCDカメラを搭載しており，無線モデムによりホストコンピュータNEC-PC-9801 F2と接続されている．ランドマークとしては，移動空間内に存在する対象のうち，簡単な画像処理ルーチンにより，その色や輪郭形状から互いに識別が可能なものを採用する．

3．視野情報に基づく経路プランニング

3.1 視野情報のトポロジ表現と視覚記憶の構成

ビューフレーム（view frame）[2]はロボットが移動途上の各地点において，センサにより環境世界を逐次的に観測して得た情報を記憶しておくための単位である．ビューフレームは，空間上のある地点から観測されるランドマークの集合が，360度方向時計回りにスキャンする際に観測される順序（Fig.2(a)）に従って記憶されている（ランドマーク・リスト）．またロボットの位置は，その地点で観測されるランドマークの間に成り立つ空間的な定性的関係の集合として記憶される．すなわち，ランドマーク・リスト中の任意の2つのランドマークで作られる境界（Landmark Pair Boundary, LPB）(Lk,Lk+1) に対する相対位置関係を，その間の相対方位角θk,k+1から，

θk,k+1 ＜ 180度 → [Lk, Lk+1]（Lkを左に，Lk+1を右に見る領域）

θk,k+1 ＞ 180度 → [Lk+1, Lk]（Lk+1を左に，Lkを右に見る領域）

のように表現すると，このような対象の「見え方」から，ロボットの現在位置がLPB [Lk, Lk+1] により分割される2つの半平面のいずれの側に位置しているかを知ることができる（Fig.2(b)）．また2つ以上のランドマークが観測されている場合には，その地点で観測されている全てのLPBに対する上記表現の積集合をとったもので状態表現される（同図(c)）

ビューフレームは，ロボットが搭載している超音波センサの有効到達距離rを半径とする円内の範囲に限られた局所観測情報であり，環境世界全体の中でどの部分であるかを示すものではない．従って，

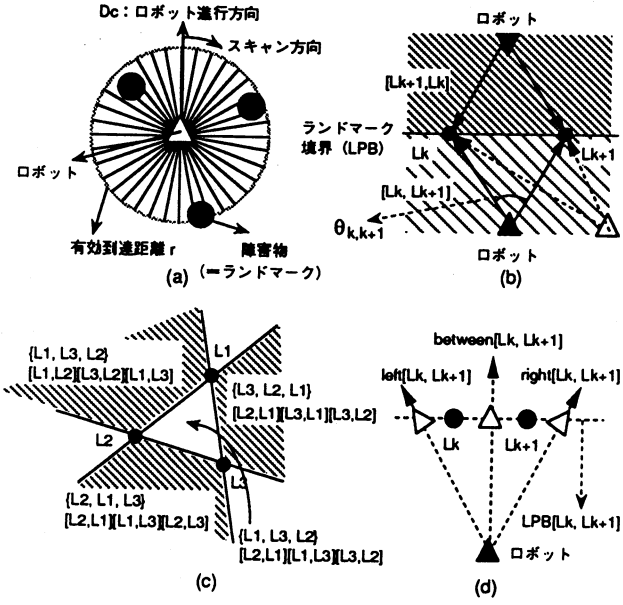


Fig.2 (a) 超音波センサによる計測 (b) トポロジ表現
(c) 空間のビューフレーム表現 (d) 移動操作子

このような互いに独立な部分情報を手掛かりに大局プランとしての経路を生成するためには，異なる状態の間を遷移させる操作子（operator）を導入する必要がある．ここでは，「LPBをロボットが横切って通過する」事象をこのような操作子として定義し，Fig.2(d)に示すように，

left[Lk, Lk+1]（LPB[Lk, Lk+1]を左に見ながら通過）

between[Lk, Lk+1]（LPB[Lk, Lk+1]の間を通過）

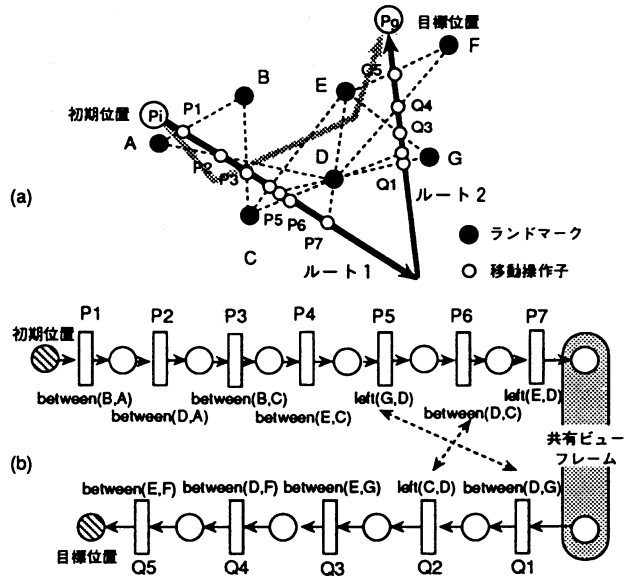
right[Lk, Lk+1]（LPB[Lk, Lk+1]を右に見ながら通過）

の3種類を定義する．

3.2 既知経路の記号表現

本システムでは，与えられた環境世界内を予めロボットが移動した複数のルート経験を，移動中に観測生成されたビューフレームとLPB通過時に適用した移動操作子が交互に繰り返される系列として格納・記憶している（既知ルート）[注1]．例えば，Fig.3(a)に示すような環境世界を，図示のような経路で移動した場合のルートを同図(b)に示す．ここでロボットの状態（＝ビューフレーム）は○で，移動操作子は

（注1）異なるビューフレーム間の遷移は，超音波センサの有効到達距離rの制限から，LPBの通過時以外に異なるランドマーク集合が視野内に見えてくる場合にも生起しうる．本研究ではこのようなLPB通過を伴わないビューフレーム間の遷移は除外する．



(c) [between(B,A), between(D,A), between(B,C), between(E,C), left(E,D), between(E,G), between(E,F)]

(d) [between(B,A), between(D,A), between(E,D), between(E,F)]

Fig.3 (a) 既知のルート b) 初期経路 (c) LPB 通過目標リスト（実行前）
(d) プラン実行時に活性化されたLPB

‖で表現している．このような過去の移動経験の視覚記憶が存在するとき，任意の初期位置 Pi と目標位置 Pg が与えられたもとで，本システムは以下のような手順に従って経路計画を行なう．

(1) ルート結合による初期経路の生成

視覚記憶内の既知ルートの間で共有されるビューフレームを介して結合し，初期位置から目標位置に至るビューフレームと移動操作子の系列を初期経路として生成する（同図 (b)）(注2)．

(2) 初期経路からの冗長な移動操作子の除去

既知ルートから生成された初期経路には，同一の LPB を異なる方向から行き来するような冗長な部分を有しうる．そこで，初期経路中からこのような冗長な移動操作子を取り除き，通過目標 LPB リストを生成する（Fig.3(c)）．このようにして生成された通過目標 LPB リストの各要素は，ロボットが課題達成のために逐次的に通過しなければならない中間目標を与えるものである．

（注2）このような初期経路は，視覚記憶内の既知ルートの数や粗密さの程度により，必ずしも一意に決定できるものではなく，連続した一本の初期経路が生成できない場合や複数の経路が生成される場合が生じうるが，この点に関し，本報告ではこれ以上の議論は行なわない．

3.3 定性空間推論によるプラン実行時の適応型プランニング

上記通過目標 LPB リストを構成する移動操作子は，過去の移動経験としての既知ルートから生成されたものであるが，トポロジに基づいて生成されたものであるがゆえに，実際のプラン実行時に辿る経路は，必ずしも既知のルートに一致するものではなく，その結果，実行時に観測されるビューフレームも，既知ルートのものと一致するわけではない．また，上述の手順を経て生成された通過目標 LPB リストは，それ自体，未だ冗長な操作子を含んでおり，ロボットはプラン実行時に，各時点で観測されるランドマークに応じて，ある LPB の通過のための空間的な制約として必然的に通過せざるを得ないような移動操作子を発見しうる．

例えば Fig.4(a) に示すように，ロボットがある地点において観測しているランドマーク・リストが [X, Y, Z, W] であり，その時点での通過目標 LPB リストに right(X,Y), left(Z,W) の両者の移動操作子が含まれている場合には，between(Y,Z) のみの実行により必然的に実行されることになる．実行効率を考えると，なるべく少ない移動操作子からなるプラン系列に集約した上で後述のプラン実行部に送るのが得策であることから，本システムではこのような空間推論のための定性規則を同図(b) に示すようなプロダク

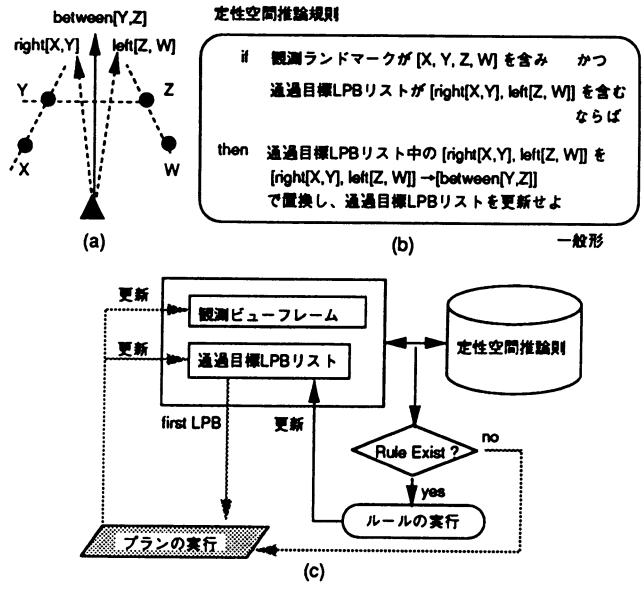


Fig.4 (a) (b) 定性空間推論則 (X,Y,Z,W は変数)
(c)プラン実行時の定性空間推論による通過目標LPBリストの縮約

ションルールとして用意し，プラン実行時に観測されるランドマークに随時照合しながら，opportunistic に通過目標 LPB リストの縮約・更新を行なう．このようなルールの照合は，更新された通過目標リストに対して繰り返し適用され，より以上の縮約が出来なくなった時点で，更新された通過目標リストの第一要素に相当する LPB が通過目標として活性化され，次節のプラン実行ルーチンに渡される（同図(c)）．また Fig.3(d) は，ロボットが同図(a) 中の灰色矢印のように移動を実行した場合に，順次活性化されるLPB を示したものである．

4．周囲環境との干渉に基づくファジィ制御

4.1 大局プラン下での障害物回避制御の枠組み

ロボットは，前章での手続きにより求められた大局レベルでの目標 LPB の通過達成を試みると同時に，目先の障害物を回避するという局所的な制御戦術も併せ持つ必要があるが，このような大局―局所にわたる戦略・戦術をいかに円滑に統合処理し，目的に指向した行動を実現できるかが知的システム構築の上での重要な課題となる．本研究では，Fig.5 に示すような制御機構を考える．本機構は，目標が陽に最初から与えられたり外部の行動の場に存在しているのではなく，内部機構の側から発生されるという意味において，主体的かつ能動的である．すなわち目標信号 Dg は，上位大局レベルから送られる通過目標 LPB と，その時点での周囲障害物の状況によって動的にセットされ変更されることになる．この目標が決まると，図中のフィードバック機構に基づいて，その目標と行動の場からの情報が比較器Ｃで比較されてその差異が計算され，選択器Ｓを経て効果器Ｅから適切な行動（操作量）が選択される．本章では，このような制御機構における目標進行方向 Dg の決定と障害物回避のためのフィードバック制御

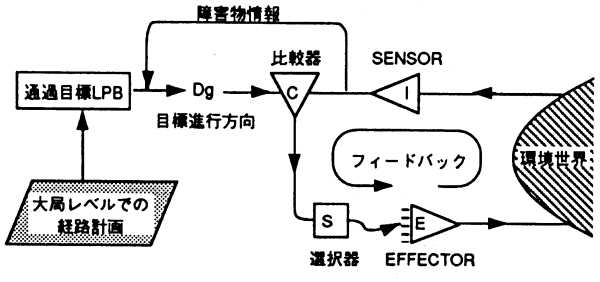


Fig.5 大局プラン下での障害物回避制御

を，各々ファジィ集合論とファジィ制御により実現するための手法を提案する．

従来の障害物回避のためのファジィ制御としては，障害物までの距離・障害物形状・ロボットの現在速度・通過目標点などの実測量を，移動アクセル開度やステアリング操舵角の操作量にダイレクトに関係付けた制御規則に基づく方法が主流である．しかしながら，このような手法の問題点として，

1）観測変数の増加に伴い，必要になる制御則の数が増大する．
2）計測誤差・ノイズの存在がクリティカルになる．
3）精緻な環境認識（例えば障害物の詳細な形状の認識など）は現実の状況では困難であり，出来るとしても膨大な処理負荷を要する．

が挙げられる．これらの問題点はいずれも，障害物回避ロボットにとっての本質的に有用な観測情報を我々の感覚に馴染む形に抽象化して集約記述し，この感覚量の上に制御規則を構成することによって解消されるものと考えられる．このような抽象化を行なうべく，本研究では，「生物は自身の位置の認識・記憶を，周囲環境との干渉を通して理解している」という脳生理学における所見[3] に基づき「プレースフィールド（place field）」の概念を導入する．

4.2 周囲環境のコンターライン表現（プレースフィールド）

Fig.6 に示すようにランドマークが配置された世界内の一点Ｐにおける周囲環境，すなわちＰ点でのランドマーク群の「見え方」を基準とするとき，観測点がＰから離れるに従ってランドマークの見え方は変化することになる．ここではこのようなランドマークとして，同図に示すように，(a) 大きさを持たない質点状のランドマーク，(b) 視野方向の広がりをもつ壁状のランドマーク，(c) 奥行きを有する立体状のランドマーク，の３種類を考える．これらの各々に対し，地点Ｐにおけるプレースフィールドを以下のように定義する．まず (a) に対しては，Ｐ点から各ランドマークまでの距離 d を基準に考えるとき，この基準からのずれ（Δd）が等価な地点群（$d \pm n\Delta d, n=1,..,k$）を結んだものがＰ点回りにコンターラインとして表されているプレースフィールドである．(b) の場合には，視差角 θ をパラメータとして採用する．また (c) の場合には，視野方向に最も

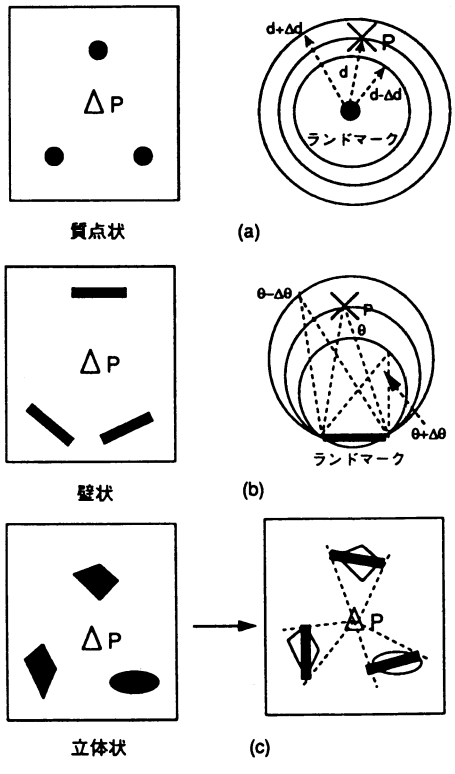


Fig.6 (a)(b)質点・壁状ランドマークとプレースフィールドの位置パラメータ (c) 立体状ランドマークの近似

長い対角線に等しい壁状ランドマークで近似して構成する.

プレースフィールドは，P点の回りに均一に変化するわけではなく，観測者（＝ロボット）のおかれた環境，すなわちランドマーク配置ならびにランドマーク形状に依存する環境世界を「見え方」の観点から抽象表現したものである．このようなプレースフィールドは，既述の超音波センサにより，上述の(a), (b), ならびに(c) のいずれかのランドマーク・タイプへの簡単な分類を行なうことによって直ちに構成することが可能である．Fig.7 に３つの質点状ランドマークに対し地点Pで構成されたプレースフィールドを示す.

4.3 プレースフィールドからの目標進行方向の決定

Fig.8(a) は，前章の手続きを経て活性化されたLPB の一つを実行する際のロボット周辺の環境世界を一般的に表したものである．ここではランドマークA, B が活性化されている通過目標 LPB (between [A, B]) で，ロボットは周辺のランドマークL1,L2,L3 を回避（障害物回避戦略）しながらこの

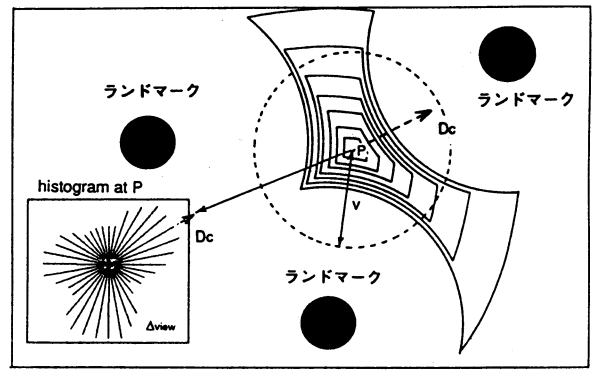


Fig.7 ３つの質点状ランドマークによる地点P周りのプレースフィールド

LPB の通過（通過目標 LPB への誘導戦略）を試みる.

Fig.7 に示したように，ロボットの現在位置を基準に考えるとき，ランドマークに接近する方向にはライン間隔が蜜になり，２つのランドマークに挟まれた間隙の方向には疎になることがわかる．すなわち，ロボットからの環境の見え方が大きく変化しない方向に進めば，ランドマークに衝突することなく安全な空間を通り抜けることができ，逆に大きく変化する方向に進めば，いずれかのランドマークに到達することになる．このことから本研究では，

1）障害物回避戦略：ロボットからの障害物環境の見え方が大きく変化しない方向へ進む

2）通過目標 LPB への誘導戦略：ロボットからの通過目標LPB の見え方が大きく変化する方向へ進む

の両戦略に従って，ロボットの目標進行方向を決定する[4]. ただしここでの「見え方の変化」はロボット自身の移動速度に依存することから，P点におけるロボットの速度 v に等しい長さの線分を考え，P点から各方向 Di（i=－18～＋18: 10度間隔，D0: ロボット正面方向）に延ばした線分がこの範囲内で横切るコンターライン数 Δview（Di） を算出する．これを Fig.8(b) に示すように進行方向 Dc から左右180 度にわたるヒストグラム分布をとり，線形変換して得られる同図(c) の分布は，ロボット回りに自身の速度に応じて構成される「障害物の動的視野」を各方向Di の台集合上に表現したファジィ集合 O と考えることができる．またこの補集合 O^c は「障害物回避の方向」を表すファジィ集合になる.

一方，通過目標 LPB のランドマークの組に対しては，この間隙を通過しなければならないことから，これらのランドマーク間に壁状のランドマークを想

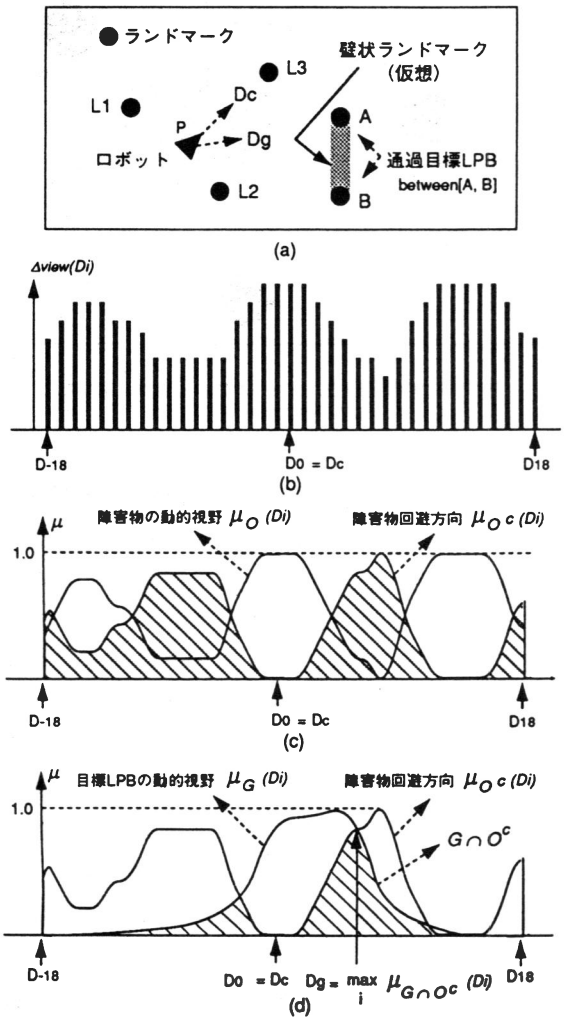


Fig.8 目標進行方向 Dg の決定

定し，上記とは逆に，これに対する見え方がなるべく大きく変化するような，換言すれば，この仮想障害物にいち早く衝突するような方向についてのファジィ集合Gを同図(d)のように構成する．そして同図(d)に示すように周辺障害物の回避・通過目標 LPB への到達の各々の目標のもとで生成されたファジィ集合の和集合$O^c \cap G$ を生成し，そのピーク点に対応する方向を，ロボットのP点における目標進行方向 Dg として決定する．

4.4 障害物回避のためのファジィ制御則と制御結果

前節の手順によりロボットの視野情報から決定された目標進行方向 Dg と，ロボットの現在進行方向 Dc とのずれに応じたステアリング角，ならびに進行方向の動的視野に応じた加減速操作（アクセル開度）の決定をファジィ制御により実現する．ここでの制御則は，

「IF Ai and Bj then Ys and Ya」

Ai: Dc の Dg に対するずれの認識を表すファジィ命題（i=1,..,5; Fig.9(a)）

Bj: 進行領域の動的視野を表すファジィ命題（j=1,2; Fig.9(b)(c)）

Ys: ステアリング操舵角を表すファジィ命題，

Ya: アクセル開度を表すファジィ命題

の一般形で表される．ここで進行領域の動的視野は，ロボット進行方向Dcから左右60度の範囲に構成される．例えば，「ロボットの進行方向が目標進行方向から左に大きくずれており，かつ進行領域に障害物が迫ってきたら，左方向に大きくステアリングをきり，減速せよ」のようなルールを，前件部の2つのファジィ命題（変数）の10個の組み合わせに対して定義する．これらの規則への入力データとしては，変数Ai に対しては Dc の Dg に対する偏差（＝離散値）が，変数Bj に対しては，Fig.8 で示した「障害物の動的視野」を表すファジィ集合Oのうち Dgから左右±60度の部分ファジィ集合が充てられる．Fig.9

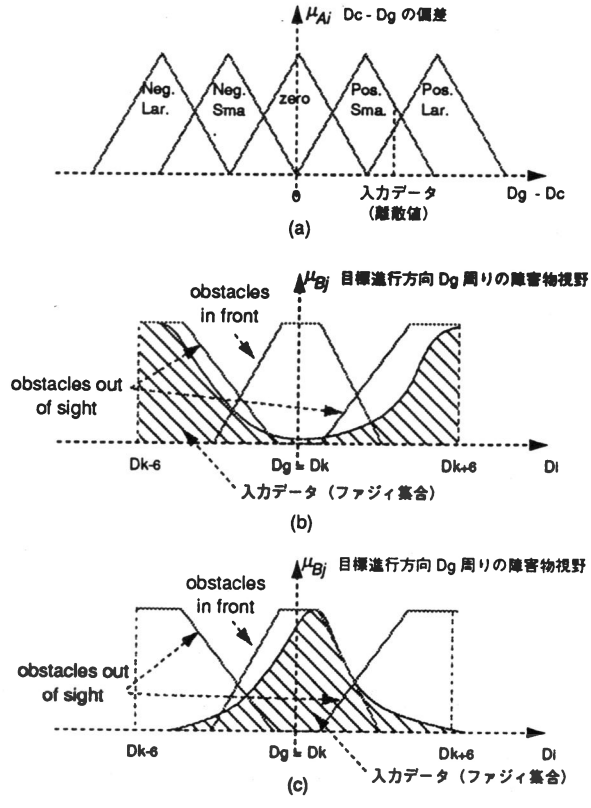


Fig.9 (a) ファジィ制御則前件部変数（方向偏差）
(b)(c) ファジィ制御則前件部変数（障害物視野）

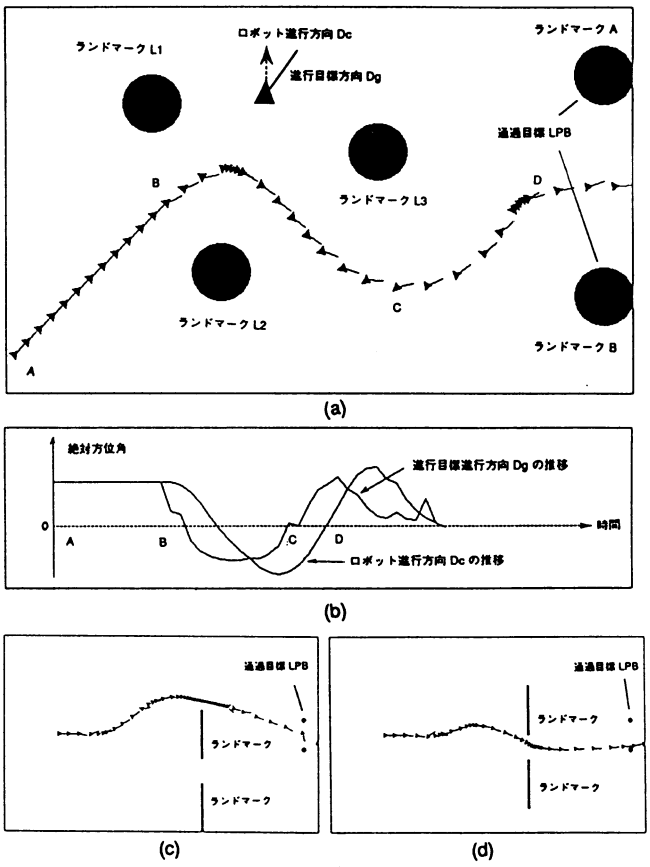


Fig.10 ファジィ制御結果
(a) (b) 質点状障害物（ランドマーク）(c) (d) 壁状障害物

(b)および(c)は，各々進行領域に障害物がない場合とある場合の入力を例示したものである．これらの入力データに対し，min-max 法[5]に従って，後件部の各々のファジィ命題について，別途操作量を決定する．Fig.10 にそのシミュレーション制御結果の一例を示す．同図(a)は質点状障害物からなる環境世界中の移動履歴，(b)はその時間推移を表したものである．Dg の決定からある時間遅れをもったスムーズな移動（Dc）が，ファジィ制御により実現されている．同図(c)(d)は壁状障害物に対する移動履歴である．

5．展望とまとめ

上位大局プランとして生成されたもの全てが，ファジィ制御によりそのまま実行可能であるとは限らない．例えば，トポロジ情報に基づいて導出されたプラン LPB が，メトリックな世界での実際の実行時には，狭すぎて衝突の危険性から通過を回避したり，またその結果，プラン生成時には，見えなかったランドマーク集合が視野内に入ってきて，生成されている経路プランよりもより効率的な近道を偶発的に見いだすことも生じうる．本システムでは，このような実行時のプランからの逸脱したランドマーク集合の観測を得ると，直ちに上位プランニング・フェイズにこの情報をフィードバックし，3章で示した手順に従い，適応的かつ即応的に経路計画を行なう．

以上本研究では，大規模空間内の自走ロボットの走行制御をとりあげ，局所的に観測されたトポロジ情報からの空間推論による経路プランニング，ならびにそのもとでの障害物回避のためのファジィ制御法について報告した．周囲環境との干渉のあり方（見え方）としての抽象化表現の導入により，限られた精度の局所情報を取り扱うための演繹的記号処理と，人間の有する概念に指向したファジィ制御の間を円滑にリンクし，ロバストかつフレキシブルな知的制御システムが実現できることを示した．

参考文献

[1] T.Sawaragi, K.Ogawa, O.Katai and S.Iwai: Skill Acquisition for Intelligent Fuzzy Controller by Analyzing Operator's Control Action Sequences, Proc. SICE'89 in Matsuyama, 1369-1372, 1989.

[2] T.S. Levitt et al. : Qualitative Navigation, Proc. of Image Understanding Workshop, DARPA, pp.447-465, 1987.

[3] D. Zisper : Biological Plausible Models of Place Recognition and Global Location, in J.L. McClelland et al. (eds.), Parallel Distributed Processing, Vol.2, MIT Press, Cambridge, MA, pp.432-470, 1986.

[4] M.A. Arbib et al. : Depth and Detours: An Essay on Visually Guided Behavior, in M.A. Arbib et al. (eds.), Vision, Brain, and Cooperative Computation, MIT Press, Cambridge, MA, pp.129-164, 1987.

[5] E.H Mamdani : Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. of IEE 121-12, pp.1585-1588, 1974.

問い合わせ先：
〒606 京都市左京区吉田本町
京都大学工学部精密工学科
椹木哲夫
Tel. 075-753-5266 Fax. 075-771-7286

TA3-3

知能ロボットのファジイ走行制御

Fuzzy Drive Control of an Intelligent Robot

前田幹夫*, 前田　靖**, 村上周太*
Mikio Maeda, Yasushi Maeda, Shuta Murakami
* 九州工業大学　工学部
** 新日鉄情報通信システム（株）
* Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology
** NIPPON STEEL Information & Communication Systems Inc.

Abstract

This paper describes the fuzzy drive control of an intelligent robot. The fuzzy control is applied to the steering and speed control. The fuzzy control system architecture is a hierarchy that is constructed by a visual sensor subsystem, a motor drive unit and fuzzy drive expert system which manages these subsystem. As an application to the fuzzy drive control, the driving experiments of the autonomous mobile robot on the straight road and the one with corner are implemented.

1．はじめに

知能ロボットとして自律型移動ロボットを考える．これは，カメラや超音波センサー，レーザセンサーなどの様々なセンサーからの情報により，自分自身で周囲の環境を認識し，状況に応じた行動を計画し自律的に障害物を回避しながら走行するロボットである．その応用分野としては，工場やプラント，病院内での無人搬送車，危険かつ苛酷な状況下における極限状態作業ロボット，さらに，家庭内においてはサービスロボットなどがある．これらのニーズは，社会の進展と共に増大し，人間の単純作業や苛酷な労働から解放や，これまでは不可能であった作業の遂行も可能になる．

人間は，限られた時間内に，あいまいで確実性や完全性を欠いているさまざまな情報から，思考を進め適切な判断や行動を行う．本研究では，人間の知的活動をあいまいさに重点をおいてモデル化し，ファジイエキスパートシステムをファジイ理論を用いて設計することにより，自律型移動ロボットが人間と同等に，柔軟に動作するように制御することを目的としている．

本研究における自律型移動ロボットでは，センサーにはＣＣＤカメラを用いて，ファジイ制御及び予見制御をステアリング制御とスピード制御に応用している．ファジイ走行制御システムは，各々の制御目的を達成するために独立して動作する視覚情報サブシステム，モーター駆動ユニット，およびファジイ走行エキスパートシステムより，階層的に構成されている．

2．移動ロボットの制御システム

2．1　制御システムの概要

図１のように，ロボット（HERO2000）前方の道路状況は，ロボット頭部のＣＣＤカメラで撮影する．カメラには広角レンズを取り付けてあり，高さ約80cm，水平から下へ約30度の方向で前方を見ている．

カメラの画像は，ビデオ送信機により電波で画像入力装置に送られる．この装置で，信号をデジタル化し，濃淡256階調，256×256画素の画像情報として取り込む．

制御システムは，パソコン（PC-9801）上において，画像処理，認識を行い，得られる情報を基に，周囲の環境を認識する．次に，制御者からの指令に従って動作を計画し，進路，スピード，移動距離を制御指令として決定する．これらの制御指令は，ワイヤレスコネクター（CC-232）により電波でロボットに送られる．

ロボットの駆動系は左右の二輪をステッピングモータで独立に駆動するＰＷＳ（power wheeled steering）方式であり，モータの回転速度を変えることにより，前進，後退，円弧状の回転，その場での回転が可能である．ロボット本体では，制御システムが決定した制御指令に従って，上記の方法でモータを動かす．

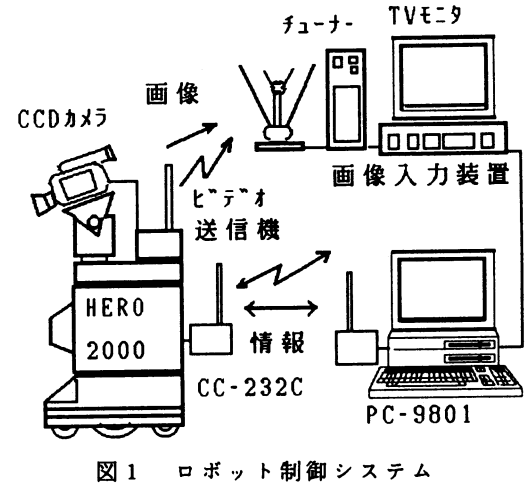


図１　ロボット制御システム

2．2　自律走行エキスパートシステム

制御システムは，図2のように，各ユニットにより階層的に構成され，上位レベルの自律走行エキスパートシステムと，下位の入出力システムに分けられる．

自律走行エキスパートシステム

制御者からの走行計画を達成するように，カメラからの画像を基に周囲の環境を認識し，ロボットの動作を決定する．この走行計画は分岐点における進行方向であり，制御者は分岐点の種類とＴＶモニタのロボット前方の様子を見て進行方向を選ぶ．

入出力システム

カメラ，ＴＶモニタ，ロボット本体などの外部機器と入出力される画像や制御データを処理する．

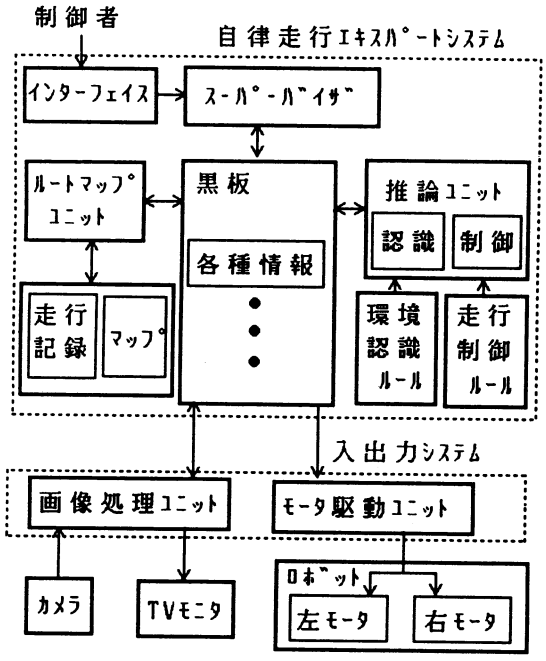


図2　制御システムの構成

以下に，主なユニットの説明を行う．

(1)推論ユニット

①画像認識，環境認識

画像の種々の特徴より，環境認識ルールを用いて，画像を解析する．次に，周囲の環境認識を行い，ロボットの動作決定に必要な制御情報を得る．

②状態評価ファジイ制御，予見ファジイ制御

状態評価ファジイ制御により，ロボットの動作を求める．次に，予見ファジイ制御では，この動作を実行したシミュレーションを行い，評価基準を満足する動作を求める．

(2)画像処理ユニット

二値化，画像圧縮，ノイズ除去を行う．

(3)モータ駆動ユニット

ロボットの進行方向，移動距離に対して，左右のモータのスピード，回転数を決める．

(4)ルートマップユニット

①ロボット内部に分岐点を基に地図を作成する．

②分岐点におけるロボットの進行方向を記録する．

(5)スーパーバイザユニット

走行計画の達成のために，上記の各ユニットを総合的に管理運用する．

3．ロボット制御のための画像認識

3．1　画像前処理

カメラから取り込まれる画像を，処理時間の短縮化のために，128×128画素に圧縮し，画像中の物体認識を容易に行うために，壁，障害物を黒色，道路面を白色であると仮定し，影や乱反射による影響が少ないレベルで二値画像に変換する．また，画像を送信する際の種々の電子機器によるノイズの除去処理を行う．

3．2　環境認識

ワールドマップの作成

カメラ横方向の視野が狭いために，一度の画像サンプリングでは周囲の環境全体の把握は難しい．そこで，画像認識により得られた物体を，ロボットの移動開始点を原点としているワールドマップ中の既に発見された物体と比較を行い，少しずつ環境を把握していく．

ローカルマップの作成

ワールドマップからロボットを中心として，一定範囲内の物体を選択し，ローカル座標に変換する．こうして作成された物体の配置をローカルマップとして，走行制御に必要な情報を得る．

図3に，この処理結果として，ロボットが走行しながら認識した道路状況をワールドマップで示す．今回は，障害物は静止しているとしたが，移動している物体に対しては，その位置をワールドマップ上で更新することにより，対処できる．

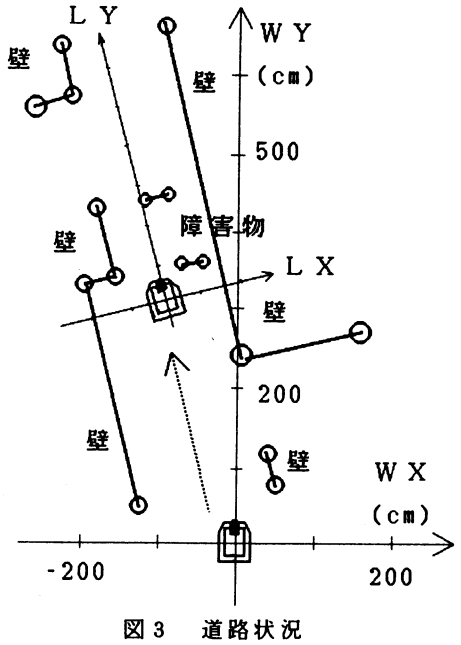


図3　道路状況

3．3　画像情報の抽出

ロボット走行制御のための情報は，ロボットの動作に応じて，直進用情報，分岐点の右折および左折用情報，走行可能範囲に関する情報の3種類に分けられる．

直進用情報

道路に対して平行に走行するための道路中央線に対する傾き，道路の中央付近を走行するための中央位置からの偏差の2種類である．

(1)道路中央線に対する傾きθ

左右の壁に対するロボットの傾きθ_L，θ_Rを求め，平均した値をθとする．値は，左に傾いている場合を負，右に傾いている場合を正とする．

(2)道路中央位置からの偏差p

ロボットから左右の壁までの最短距離d_L，d_Rを求め，(1)式で計算される値を道路上の位置pとする．pは，中央位置より左側に寄っていれば負，右側に寄っていれば正の値をとる．

$$p = \frac{d_L}{d_L + d_R} \times 2 - 1 \qquad (1)$$

左折，右折用情報

図4のように，分岐点における，コーナーと前壁に関する情報である．

(1)コーナーの情報

コーナーまでの距離d_cと，その方向θ_cを求める．θ_cは，コーナーがロボットの進行方向より左側にあれば負，右側にあれば正の値をとる．

(2)前壁の情報

前壁に対する傾きθ_wと，前壁までの距離d_wである．傾きは，左折の場合は負，右折の場合は正の値をとる．

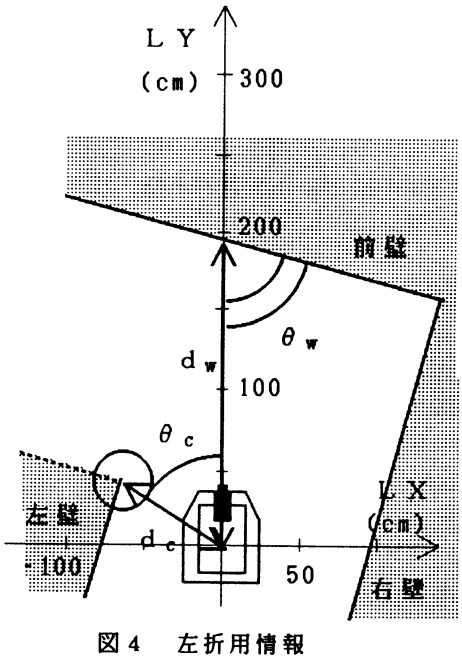


図4　左折用情報

走行可能範囲

これを基に，ロボットの動作のシミュレーションを行い，壁や障害物に衝突するか調べる．一定範囲内（左右150cm，前方300cm）での壁，障害物の位置から求めるが，障害物が存在する場合は，壁との距離を求め，ロボットの幅を考慮して通過可能な領域を示す．また，現段階では走行可能でも，後の段階で明らかに壁，障害物に衝突することが予想され，身動きが取れなくなる領域（障害物手前など）は除外している．

4．ファジイ制御ルール

4．1　走行制御ルール

走行制御ルールの前件部と後件部はファジイ集合で表されており，その推論方法には，簡略法を用いている．ルールは道路の形態とロボットの動作に応じて，①直進用ルール，②左折用ルール，③右折用ルールに分けられる．

通常は，直進用ルールを用いて走行しているが，分岐点を認識できたなら，ロボットの動作に応じて，上記のどのルールを用いて走行させるのかを決定する．

分岐点までの距離が一定値（150ｃｍ）以下になれば，分岐点に接近できたとして，直進用ルールから，左折または右折用ルールの切り替えを行なう．

左折用ルール

左折する場合の制御目的は以下の2つである．

①コーナーの近くを，衝突しないように，曲がる．

②前壁に沿って，衝突しないように，曲がる．

制御情報は，コーナーの方向θ_c，コーナーまでの距離d_c，前壁に対する傾きθ_w，前壁までの距離d_wで，各々の制御目的のためのルールを表1に示す．

表1　左折用ルール

①に対するルールテーブル

		θ_c		
		N	Z	P
d_c	S	PB	PS	NS
	M	PM	ZO	NM
	B	PS	NS	NB

②に対するルールテーブル

		θ_w		
		N	Z	P
d_w	S	PB	PS	NS
	M	PM	ZO	NM
	B	PS	NS	NB

N :Negative
Z :Zero
P :Positive
S :Small
M :Medium
B :Big

NB :Negative Big
NM :Negative Medium
NS :Negative Small
ZO :Zero
PS :Positive Small
PM :Positive Medium
PB :Positive Big

4．2　予見ファジイ制御方式

走行制御ルールにより決定された進路で実際にロボットを走行させた場合に，「ロボットが壁や障害物に衝突することなく安全に走行する」という評価基準を満たすかどうかを予測する．この評価基準を満たしていれば，その進路をそのまま実行し，評価基準を満たしていなければ，進路を変更する．

ロボット走行制御における予見ファジイ制御の適用

まず，環境認識により求めた走行可能範囲上で，全ての進路でロボットが走行した場合の走行軌跡を，10cm間隔で，各進路毎の走行距離の2倍までシミュレーションを行う．もし走行軌跡が走行可能範囲外に抜け出せば，その進路では走行できないとし，範囲内であれば通行可能とする．これにより，各進路を走行できる進路と，走行できない進路に分ける．

この結果より，進路に対する走行可能範囲を設定し，それをファジイ化する．この走行可能範囲に対して，走行制御ルールで求めた進路の適合度を求める．適合度は，走行可能範囲と進路のファジイ集合の共通集合を表すメンバシップ関数の最大値とする．ここで，適合度が1であれば，その進路はそのままで実行され，適合度が1より小さければ，その適合度をとる進路に変更する．適合度が0であれば，走行制御ルールから求めた進路に最も近い走行可能範囲内の進路に変更する．

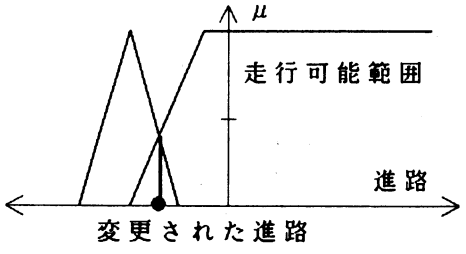


図5　進路の評価

5．　自律走行実験

L字路の分岐点手前，左壁寄りに，障害物がある場合に左折を実行した．図6に走行軌跡を示す．

③において分岐点発見と同時に障害物に対する回避を行っている．④から左折を開始し⑦で終了している．障害物を回避しながの左折に成功しているが，そのため大回りをしている．その結果，前壁にかなり接近しているが，⑤において進路をもう少し左にとるようにルールを修正すればよい．なお，多の経路の実験結果も良好であった．

6．　結論

今回のL字路上での走行実験により，走行制御ルールの作成，修正が容易である制御システムの構築が可能であり，まだルールの修正が必要であるが，ロボットの動作としては実際の自動車のようななめらかな動きが達成できたといえる．また，画像入力から制御出力までに約3～5秒で，リアルタイム処理に近づけることができた．

今後の課題について述べる．ロボットやカメラと制御装置は，ビデオ送信機とワイヤレスコネクターにより無線で結合しており，照明や様々の電子機器のノイズの影響を受けやすいので，このノイズ対策を強化する必要がある．また，カメラの視野外の部分は内部に作成した地図を利用して過去に行った動作から予測しているが，ロボットの進路や移動距離の誤差により十分とは言えない．カメラを可動式にして周囲を見渡せるようにした方が確実に認識できるであろう．カーブやY字路などのより複雑な道路状況に対処できるシステムも必要である．最後に，今回のロボットの進行方向，走行距離は，実際にロボットを動かして実験を繰り返し，最適量を走行制御ルールの出力としたが，本研究で用いた予見制御によりルールの自動修正が可能であるので，この機能持たせる必要がある．

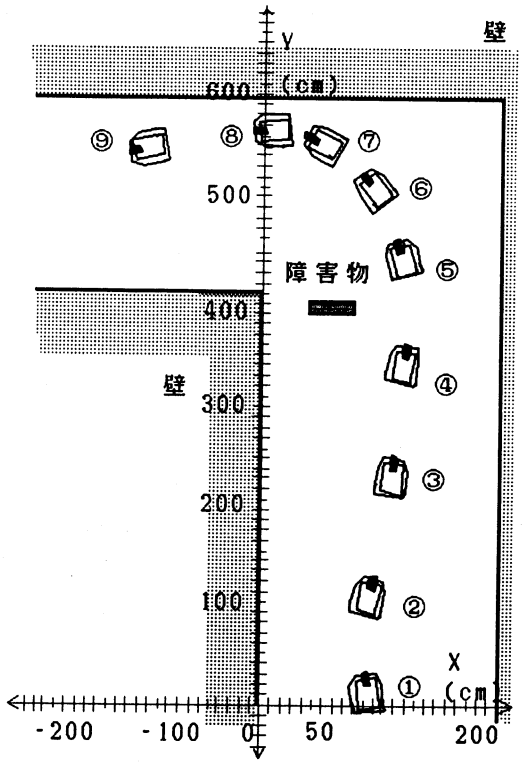


図6　T字路における走行軌跡

参考文献

（1）前田靖，前田幹夫，村上周太：自律型移動ロボットのファジイ走行制御，計測自動制御学会講演会予稿集，102/105　(1988)

（2）安原誠二：ファジイ推論を利用した列車自動運転，九州産学官協力会議　ファジイシステム応用分科会資料，No.9，11/16　(1989)

（3）菅野道夫：口頭指示による模型自動車の制御，第3回ファジイシステムシンポジウム，49/54 (1987)

（4）竹内倶佳：自律型移動ロボット，日本ロボット学会誌，Vol.6，No.6，549/556　(1987)

TA4-1

あいまいな教師信号を用いるニューラルエキスパートシステム

A Neural Expert System Using Fuzzy Teaching Input

林 陽一　　井村 敦
Yoichi Hayashi and Atsushi Imura
茨城大学工学部情報工学科
Department of Information Science, Ibaraki University

Abstract: We have proposed a Fuzzy Neural Expert System (FNES) and described a method to extract automatically *fuzzy* `If-Then` rules from a trained neural network. This paper extends the previous work and proposes a neural expert system using "*fuzzy teaching input*". The expert system has the following two functions:

1. Generalization of the information derived from the training data with fuzzy teaching input and embodies knowledge as a neural network. Here, the fuzzy teaching input is subjectively given by domain experts.
2. Extraction of *fuzzy* `If-Then` rules with *linguistic relative importance* of each proposition in an antecedent (`If`-part) from a trained neural network.

This paper also shows a method to extract automatically the *fuzzy* `If-Then` rules from a neural network generated by training data with fuzzy teaching input. To prove the effectiveness and validity of the proposed neural expert system, results of numerical experiments are given.

1. はじめに

近年，学習によって生成されたニューラルネットワークに内包される知識と IF-THENルールの対応に関する研究が盛んである[4][7][8][9][12][14]．

一方，ニューラルネットワークを医療診断[15]，工業用画像処理[11]等の実際問題に適用することを考えると，ニューラルネットワークにおいて各種のあいまいさを含んだ複雑な情報(知識)を扱えることが必要となってきている．一般に，ニューラルネットワークに提示されるデータは，主観的なあいまいさ，ノイズ等を内包している場合が数多くあると考えられる．ここで，このようなあいまいな入力データから得られる（決定される）結論にもあいまいさが内包されている場合があると考えられる．例えば，「・・・であるかもしれない」のような結論である．

林らは，不確実な環境下での，ニューラルネットワークの学習能力を用いたエキスパートシステム（これをニューラル・エキスパートシステムと呼ぶ）の一実現法を提案している[7][9]．提案したニューラル・エキスパートシステムは以下に示す2つの機能をもっている．(1)各種のあいまいさを含むデータを学習し，得られた情報を一般化し，ニューラルネットワークとして知識を具体化して診断及び識別を行う．(2)生成されたニューラルネットワークから前件部の各命題に言語的な相対的重要度(LRI:Linguistic Relative Importance)をもつファジィIF-THENルール[6]を自動抽出する．さらに，上記のエキスパートシステムの有効性を評価するため，9種類の血液生化学検査成績と性別だけから識別が一般に困難な 4種類の肝胆道系疾患の診断を行うと共に，その根拠となる一般的な診断ルールを自動抽出する機能をもつ肝胆道系疾患の診断のためのニューラル・エキスパートシステムを作成した．そして，判別関数分析による診断結果と比較することによって，提案したニューラル・エキスパートシステムの有効性を示している．

本研究では，上記のニューラル・エキスパートシステムを拡張して，あいまいな教師信号及び結論を扱うことができるニューラル・エキスパートシステムを提案する．本研究で提案するニューラル・エキスパートシステムは次の二つの機能をもつ．(1)各種のあいまいさを含む入力とそれに基づいて対象領域の専門家によって主観的に与えられた”あいまいな教師信号”からなるデータを学習し，得られた情報を一般化し，ニューラルネットワークとして知識を具体化してあいまい性を含むデータの診断及び識別を行う．(2)生成されたニューラルネットワークから前件部の各命題に言語的な相対的重要度をもつファジィIF-THENルールを自動抽出し，知識の本質的な内容を解析すると共にルールとして具体的に表現する．さらに，簡単な例題によって，提案したニューラル・エキスパートシステムの有効性を示す．

2. あいまいな教師信号

一般に，ニューラルネットワークに提示されるデータは，主観的なあいまいさ，測定誤差，矛盾，ノイズ等を内包している場合が数多くあると考えられる．従って，あいまいな入力データか得られる（決定される）結論にもあいまいさが内包している（”あいまいな結論”）場合があると考えられる．例えば，「・・・であるかもしれない．」のような結論である．

このような状況を考えると，学習時に，ニューラルネットワークの出力層に，”あいまいな結論”に対応する”あいまいな教師信号”を提示するする必要がある．本研究では，”あいまいな結論”として，例えば，「・・・であることが非常に真である」等が対象領域の専門家の経験によって主観的に与えられるとする．また，”あいまいな結論”に対応する”あいまいな教師信号”を表現するために，6つの出力セルが用いられる．ここでは，出力項目を表現している6つの出力セルの集まりをセル・グループと呼び，(+1, +1, +1, +1, +1, +1), (+1, +1, +1, +1, +1, -1), (+1, +1, +1, +1, -1, -1), (+1, +1, +1, -1, -1, -1), (+1, +1, -1, -1, -1, -1), (+1, -1, -1, -1, -1, -1), (-1, -1, -1, -1, -1, -1)の7段階で表現している．これらは，それぞれC.T. (Completely True)，V.V.T. (Very Very True)，TRUE，UNKNOWN，FALSE，V.V.F. (Very Very False)，C.F. (Completely False)に対応しているとする．このセル・グループ表現は，UNKNOWNを基準にして，値が+1である出力セルの数が多いほど，あるいは少ないほど結論のあいまいさは減少している．

3. ニューラル・エキスパートシステム

本章では，まず，本研究で用いている分散ニューラルネットワーク[3][5]について述べる．次に，入力層においてあいまいさを含むデータと含まないデータが混在するデータ，さらに，出力層においてあいまいさを内包するデータを扱うことができるニューラルネットワークを提案する．

ニューラル・エキスパートシステムは分散ニューラルネットワークのもつ認識能力を推論エンジンとし，学習能力を知識の自動生成及びチューニングに利用したものである．なお，学習アルゴリズムにはポケットアルゴリズム[2]を用いている．

3.1 分散ニューラルネットワーク

ニューラルネットワークには各種のものがあるが，本研究では，3層(入力層，中間層，出力層)でフィードフォワード型の線形識別ネットワーク[4]の一種と考えられる分散ニューラルネットワーク[3][5]を用いる．分散ニューラルネットワークは 図1に示すようにセルと呼ばれる自律的なプロセッシングユニット（頂点）と整数値の重みの付いたコネクションと呼ばれるセルどうしをつなぐ辺からなる．セルの値（活性度）は+1, 0, -1の3値のいずれかをとる．+1, -1はそれぞれ2値論理のC.T., C.F.に対応しており，0はC.T.でもC.F.でもない状態を表している．入力セルI_i（i=1, ・・・, p：pは入力セル数)の値は通常外部から入力データとして与えられ，中間セルH_j（j=1, ・・・, q：qは中間セル数)及び出力セルO_k（k=1, ・・・, r：rは出力セル数)の各値は(3.1)～(3.4)によって求められる．

$$SH_j = \sum_{i=0}^{p} w_{ji} I_i \qquad (3.1)$$

$$H_j = \begin{cases} +1 & , \text{if } SH_j > 0 \\ 0 & , \text{if } SH_j = 0 \\ -1 & , \text{if } SH_j < 0 \end{cases} \qquad (3.2)$$

$$SO_k = \sum_{i=0}^{p} u_{ki} I_i + \sum_{j=1}^{q} v_{kj} H_j \qquad (3.3)$$

$$O_k = \begin{cases} +1 & , \text{if } SO_k > 0 \\ 0 & , \text{if } SO_k = 0 \\ -1 & , \text{if } SO_k < 0 \end{cases} \qquad (3.4)$$

ここで，w_{ji}は入力セルI_iから中間セルH_jにつながるコネクションの重み，u_{ki}は入力セルI_iから出力セルO_kにつながるコネクションの重み，v_{kj}は中間セルH_jから出力セル O_kにつながるコネクションの重みである．セル間にコネクションがないときその重みの値は 0とする．また，セルI_0の値は常に+1であり，中間層，出力層の全てのセルとの間にコネクションをもち，このコネクションの重みは一般にバイアスと呼ばれる．

分散ニューラルネットワーク[5]の構造は以下の3つの点で3層パーセプトロンと異なっている[9]．(1)入力セルと中間セルがコネクションを介して 有向な完全2部グラフ$K_{p,q}$を構成している．(2)入力層から中間層へのコネクションの重みw_{ji}は適当な範囲の乱数($|w_{ji}| \leq L$: Lは任意の正の整数であり，本論文の実験では，L=10としている．)を用いて生成され固定されている．(3)入力層から出力層へ学習可能なコネクションをもつ．

3.2 あいまいさを扱える分散ニューラルネットワーク

本研究で用いている分散ニューラルネットワークでは，入力層と出力層においてあいまいさを扱うことができる．

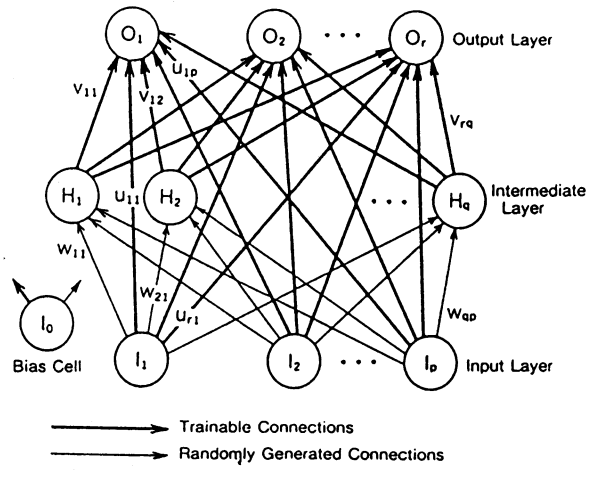


図1 分散ニュールネットワーク

入力層では，ファジィ集合のレベル集合表現[1]を用いることによって，あいまいさを含むデータをファジィ・セル・グループとして，あいまいさを含まないデータをクリスプ・セル・グループとして，3個の入力セルの値で表現している[7][8]．本研究では，出力層でもあいまいさを扱えるようにした（図2）．第2章で述べたように，あいまいさを内包する結論（出力項目）を 6つの出力セル（セル・グループ）で表現している．これによって，「・・・だろう．」や「かなり・・・だ」のようなあいまいさを含んだ学習データも扱うことが可能となる．

4. ニューラルネットワークを用いたファジィIF-THENルールの自動抽出

本章では，学習によって生成されたニューラルネットワークから前件部の各命題に言語的な相対的重要度をもつファジィIF-THENルール[6]を抽出する方法を提案する．この抽出法は提案しているニューラル・エキスパートシステムの後半の機能を実現している．

次の手順でファジィIF-THENルールを抽出する．

(1) IF-THENルールのフレームを抽出する．

(2) 抽出したルールにその確からしさを表す言語的真理値(LTV:Linguistic Truth Value)を与える．本研究では，言語的真理値を V.V.T.(very very true)， V.T.(very true)， TRUE， R.T.(rather true)， P.T.(possibly true)の5段階で表現している[7][9]．

(3) 抽出したルールの前件部の各命題に言語的な相対的重要度を与える．本研究では，言語的な相対的重要度を V.I.(very important)， IMPORTANT， R.I.(rather important)， F.I.(fairly important)， M.I.(moderately important)の5段階で表現している[7][9]．

4.1 IF-THENルールのフレーム抽出（前件部の命題の選択）

ニューラルネットワークからファジィIF-THENルールを抽出する場合には，結論を得るために入力層の必要最小限のセル・グループに関する入力項目だけを抽出して前件部とする． 入力層の各セル・グループは3個の入力セルで構成されているため，ファジィ・セル・グループの値は(+1, -1, -1), (+1, +1, -1), (+1, +1, +1)の3パターン，クリスプ・セル・グループの値は(+1, +1, +1), (-1, -1, -1)の2パターンである．

線形識別ネットワークでは，部分的な入力情報だけでセルの値を確定できる．例えば，分散ニューラルネットワークの中間セルH_jの値は次式で確定できる．

$$H_j = \begin{cases} +1 & ,\text{if } |SH_j| > USH_j \text{ and } SH_j > 0 \\ 0 & ,\text{if } |SH_j| \leq USH_j \\ -1 & ,\text{if } |SH_j| > USH_j \text{ and } SH_j < 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

同様に，出力セルO_kの値は次式で確定できる．

$$O_k = \begin{cases} +1 & ,\text{if } |SO_k| > USO_k \text{ and } SO_k > 0 \\ 0 & ,\text{if } |SO_k| \leq USO_k \\ -1 & ,\text{if } |SO_k| > USO_k \text{ and } SO_k < 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

ただし，

$$USH_j = \sum_{j:I_i=0} |w_{ji}| \quad (4.3)$$

$$USO_k = \sum_{i:I_i=0} |u_{ki}| + \sum_{j:H_j=0} |v_{kj}| \quad (4.4)$$

文献(8)及び(9)では，出力項目があいまいさを含んでいなかったため，それに対応する一つの出力セルO_kの値が+1あるいは-1となるように入力層のセル・グループの値を確定し，確定したセル・グループに対する入力項目(命題)をルールの前件部に取り入れていた．

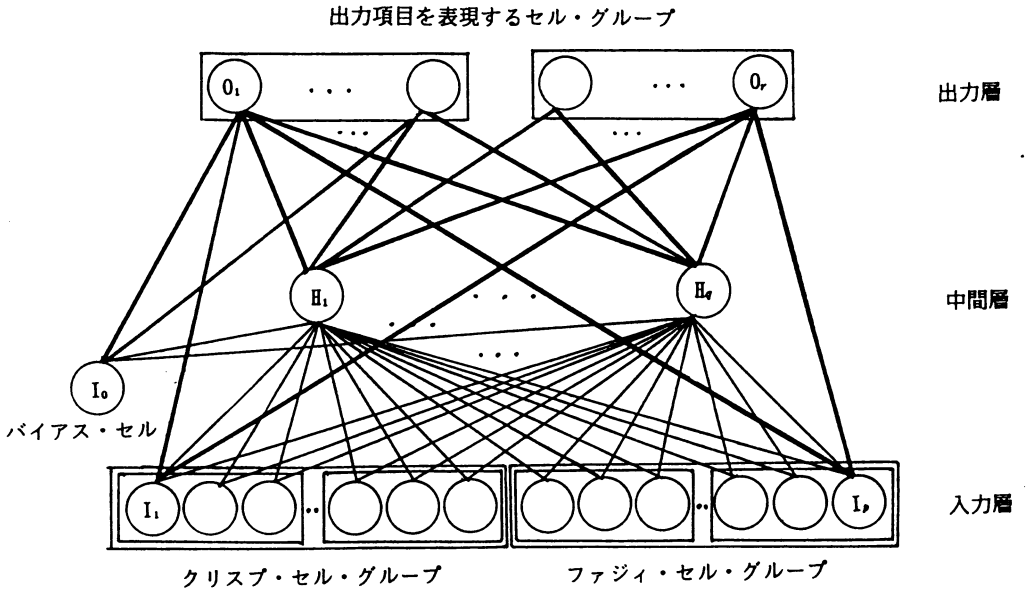


図2 あいまいさを扱えるニュールネットワーク

本研究では，出力項目があいまいさをもっている場合を考えており，それはセル・グループとして6つの出力セルで表現されている．従って，出力項目を表現しているセル・グループの値が (+1, +1, +1, +1, +1, +1)，(+1, +1, +1, +1, +1, -1)，(+1, +1, +1, +1, -1, -1)，(+1, +1, +1, -1, -1, -1)，(+1, +1, -1, -1, -1, -1)，(+1, -1, -1, -1, -1, -1)，(-1, -1, -1, -1, -1, -1)のいずれかになるように入力層のセル・グループの値を確定し，確定したセル・グループに対応する入力項目（命題）をルールの前件部に取り入れることにする．以下に，自動抽出アルゴリズムを示す．

［ステップⅠ］

出力項目を一つだけ選択する．

［ステップⅡ］

［ステップⅠ］で選択した出力項目を表現する６つの出力セルのから出力セルO_kを一つだけ選択する．

［ステップⅢ］

入力層のセル･グループを一つだけ選択する．

［ステップⅣ］

［ステップⅢ］で選択したセル･グループがファジィ･セル･グループならばその値として (+1, -1, -1)，(+1, +1, -1)，(+1, +1, +1)のいずれかを設定し，クリスプ･セル･グループならばその値として(+1, +1, +1)，(-1, -1, -1)のいずれかを設定する．そして，選択されなかった全てのセル･グループの値として (0, 0, 0)を設定する．

［ステップⅤ］　前向き探索

現在の入力パターンをニューラルネットワークの入力層に提示することによって，全ての中間セルH_jの値を(4.1)式，さらに，出力セルO_kの値を(4.2)式で確定する．もし出力セルの値が +1あるいは-1ならば［ステップⅦ］に行き，0であれば［ステップⅥ］に行く．また，全てのセル・グループが前件部に取り入れられているにもかかわらず，出力セルの値が 0である場合は，ルールは取り出せなかったので［ステップⅧ］に行く．

［ステップⅥ］　後向き探索

出力セルO_kと値が0である中間セルH_jの間のコネクションの重みの絶対値$|v_{kj}|$の最大値をv^*とする．また，出力セルO_kと 値が0である入力セルI_iの間のコネクションの重みの絶対値$|u_{ki}|$の最大値をu^*とする．$u^* \geqq v^*$あるいは全ての中間セルの値が確定しているとき［ステップⅥ-1］，その他のとき［ステップⅥ-2］に行く．

［ステップⅥ-1］

u_{ki} ($|u_{ki}|=u^*$)につながる入力セルI_iについて，それを含むセル・グループがファジィ・セル・グループならば［ステップⅥ-1-F］，クリスプ・セル・グループならば［ステップⅥ-1-C］をそれぞれ行って各セル・グループの値を与え，［ステップⅦ］に行く．

［ステップⅥ-1-F］

$SO_k \geqq 0$ならば，3パターン(+1, -1, -1)，(+1, +1, -1)，(+1, +1, +1)の中でSO_kの値を最大にするものを選ぶ．また，$SO_k < 0$ならば，3パターンの中でSO_kの値を最小にするものを選ぶ．

［ステップⅥ-1-C］

$SO_k \geqq 0$ならば，2パターン(+1, +1, +1)，(-1, -1, -1)の中でSO_kの値を最大にするものを選ぶ．また，$SO_k < 0$ならば，2パターンの中でSO_kの値を最小にするものを選ぶ．

［ステップⅥ-2］

v_{kj} ($|v_{kj}|=v^*$)につながる中間セルH_jと値が0である入力セルI_iの間のコネクションの重みの絶対値$|w_{ji}|$が最大であるコネクションにつながる入力セルI_iを選ぶ．このセルを含むセル・グループがファジィ・セル・グループならばステップ［Ⅵ-2-F］，クリスプ・セル・グループならば［ステップⅥ-2-C］をそれぞれ行って各セル・グループの値を与え，［ステップⅦ］に行く．

［ステップⅥ-2-F］

$SH_j \geqq 0$ならば，3パターン(+1, -1, -1)，(+1, +1, -1)，(+1, +1, +1)の中でSH_jの値を最大にするものを選ぶ．また，$SH_j < 0$ならば，3パターンの中でSH_jの値を最小にするものを選ぶ．

［ステップⅥ-2-C］

$SH_j \geqq 0$ならば，2パターン(+1, +1, +1)，(-1, -1, -1)の中でSH_jの値を最大にするものを選ぶ．また，$SH_j < 0$ならば，2パターンの中でSH_jの値を最小にするものを選ぶ．

［ステップⅦ］　ルールのフレーム抽出

出力セルO_kの値が確定していれば，確定したセル・グループに対応する入力項目を前件部の命題として取り出す．このとき，確定している入力情報を基に，［ステップⅡ］で選択した出力セル以外の 5つの出力セルの値を求め，出力項目を表現している 6つのセルの値が(+1, +1, +1, +1, +1, +1)，(+1, +1, +1, +1, +1, -1)，(+1, +1, +1, +1, -1, -1)，(+1, +1, +1, -1, -1, -1)，(+1, +1, -1, -1, -1, -1)，(+1, -1, -1, -1, -1, -1)，(-1, -1, -1, -1, -1, -1)のいずれかと一致すれば，そのセル・グループに対応する言語的真理値を与え，後件部（結論部）とする．また，一致しなければ，ルールは取り出せなかったとする．また，全く同じファジィIF-THENルールのフレームが得られた場合，いずれか一つを採用する．また，出力セルO_kの値が確定していなければ，［ステップⅤ］に行く．

［ステップⅧ］　出力セルO_kに関する抽出アルゴリズムの終了条件

出力セルO_kに対して，［ステップⅢ］で選択していないセル・グループがあれば［ステップⅢ］，［ステップⅣ］で選択されたセル・グループにその値として設定していないパターンがあれば［ステップⅣ］に行き，それ以外のとき［ステップⅨ］に行く．

［ステップⅨ］　出力項目に関する抽出アルゴリズムの終了条件

［ステップⅡ］で選択した出力セル以外に選択されていない出力セルがあれば［ステップⅡ］に行き，なければ［ステップⅩ］に行く．

［ステップⅩ］　抽出アルゴリズム全体の終了条件

［ステップⅡ］～［ステップⅨ］の繰り返しを行っていない（IF-THENルールのフレームの抽出の対象となっていない）出力項目があれば［ステップⅠ］に行き，なければアルゴリズムは終了する．

最後に，上記のアルゴリズムによって抽出されたルールに対して，順に通し番号を付ける．

4.2 抽出したルールにその確からしさを表す言語的真理値を与える方法

一般に，IF-THENルール自身の確からしさはそれぞれ異なると考えられ，対象領域の専門家の経験に基づいて主観的に決められることが多い．ルール自身の確からしさとして，言語的真理値があいまいさを扱うエキスパートシステムにおいてしばしば用いられる．

本研究では，入力層と出力層であいまいさを扱える分散ニューラルネットワークを用いて，ルール自身の確からしさを表す言語的真理値を求める方法を提案する．

本研究で用いているニューラルネットワークにおける出力（出力層のセルの値）は，+1,0,-1の3値である．しかし，異なる二つの入力パターンの提示に対して，例えば，+1という出力がニューラルネットワークの一つの出力セルの値として得られたとしても，その”+1”の意味するもの（肯定する強さ）が等しいとは言い切れない．ここでは，出力セルO_kに於ける(3.3)式の値SO_k（以後，出力セルO_kの加重和と呼ぶ）を上記の強さの基準とする．

本研究では，出力項目は一つの出力セルではなく，セル・グループとして6つの出力セルで表現している．そこで，ルール自身の確からしさの基準として，出力セルの加重和の絶対値の総和を採用する．次に，具体的に言語的真理値を求める方法を提案する．

［ステップⅠ］

出力項目を一つ選択する．

［ステップⅡ］

［ステップⅠ］で選択した出力項目に対して抽出したルールの内から一つだけルール（通し番号 i）を選択する．

［ステップⅢ］

［ステップⅡ］で選択したルールの前件部と全く同じ前提であるパターンをニューラルネットワークに提示することによって，［ステップⅡ］で選択された出力項目に関して出力セルの加重和の絶対値の総和（確信度）T_iを求める．

［ステップⅣ］

選択していないルールがあれば［ステップⅡ］，なければ［ステップⅤ］に行く．

［ステップⅤ］

［ステップⅢ］で求めた確信度をそれらの最大値で[0,1]内の実数値に正規化し，相対的な確信度T_i'を求める．

［ステップⅥ］

相対的確信度T_i'に応じて，各ルールに言語的真理値LTV_iを与える[7][9]．

［ステップⅦ］

選択していない出力項目があれば［ステップⅠ］，なければアルゴリズムは終了する．

4.3 抽出したルールの前件部の各命題に言語的な相対的重要度を与える方法

ここでは，ニューラルネットワークを用いて，抽出したルールの前件部の各命題の言語的な相対的重要度を定める方法を提案する．

［ステップⅠ］

ルールを一つだけ選択する（ルールの通し番号 i）．

［ステップⅡ］

前件部の命題を一つだけ選択する（命題番号 j）．

［ステップⅢ］

前件部と全く同じ前提である入力パターンと，［ステップⅡ］で選択した命題をUNKNOWNすなわち(0,0,0)とした入力パターンをニューラルネットワークに提示することによって，ルールの結論部に対応する出力項目の各出力セルの加重和の絶対値の差を求め，さらにその総和（重要度）v_{ij}を求める．

［ステップⅣ］

選択していない命題があれば［ステップⅡ］，なければ［ステップⅤ］に行く．

［ステップⅤ］

［ステップⅢ］で求めた重要度をそれらの最大値で[0,1]内の実数値に正規化し，相対的重要度v_{ij}'を求める．

［ステップⅥ］

相対的重要度v_{ij}'に応じて，ルールの前件部の各命題に言語的な相対的重要度LRI_{ij}を与える[7][9]．

［ステップⅦ］

選択していないルールがあれば［ステップⅠ］，なければアルゴリズムは終了する．

5. 数値実験

本研究では，簡単な例題を用いて，提案したニューラル・エキスパートシステムの有効性を示す．まず，学習が終了したニューラルネットワークの認識（診断）精度を調べ，次に，ファジィIF-THENルールを抽出し，そして，抽出したルールを用いて実際にファジィ推論を行ってみた．

5.1 判定基準

学習が終了したニューラルネットワークの性能評価には，正しく識別されたかを決定する判定基準が必要とされる．ここでは，本研究で用いた判定基準を示す．

ある入力パターンをニューラルネットワークに提示したとき，得られた結果が，対象領域の専門家によって主観的に与えられたあいまいな教師信号に応じて以下の基準に当てはまる場合，”正しく診断された”とする．

（1） ”あいまいな教師信号”と”ニューラルネットワークによって得られた結果”が合致している場合

（2） ”あいまいな教師信号”と”ニューラルネット

ワークによって得られた結果”が同じtrue系あるいは同じfalse系の言語的真理値である場合

ここで，true系の言語的真理値とはC.T.，V.V.T.，TRUE，false系の言語的真理値とはC.F.，V.V.F.，FALSEである．

5.2 実験

5.2.1 実験例

簡単な例題として，3入力（x_1，x_2，x_3）1出力（y）のシステムを考える．3入力のうち，x_1はあいまいさを含まないデータであり，他の2入力x_2，x_3はあいまいさを含んでいる数値データとする．表1に示すカットオフ値を用いて，x_2，x_3はファジィ・セル・グループで与えられるとする．また，出力yは，主観的にC.T.，V.V.T，TRUE，UNKNOWN，FALSE，V.V.F.，C.F.の7段階で与えられるとする．すなわち，x_1を入力セルI_1，I_2，I_3，x_2をI_4，I_5，I_6，x_3をI_7，I_8，I_9で表現し，yをO_1，・・・，O_6で表現する．図3にニューラルネットワークの構成を示す．本研究では，これらの設定を基に表2に示すような4つのデータを作り，実験に用いた．

表1 カットオフ値

入力	1	2
x_1	40	100
x_2	60	100

表2 本研究で用いたデータ

データ番号	入力			出力
	x_1	x_2	x_3	y
1	C.T.	30	40	V.V.T.
2	C.F.	180	30	FALSE
3	C.F.	150	150	V.V.F.
4	C.T.	20	170	TRUE

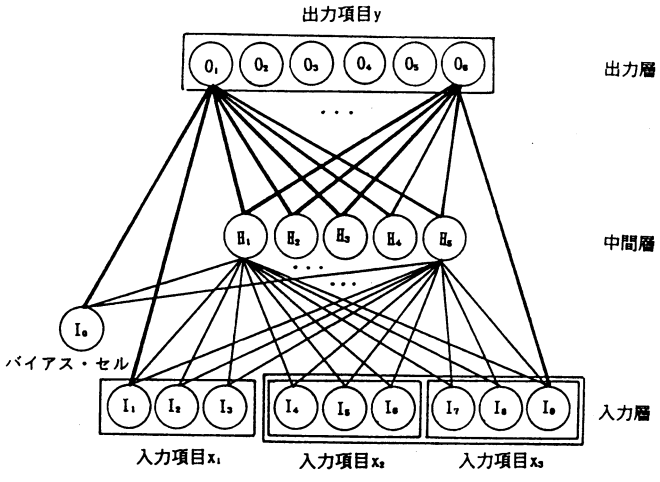


図3 実験で用いたニュールネットワーク

5.2.2 学習（知識ベース作成）

学習アルゴリズムとして，Gallant,S.I.によって提案されたポケットアルゴリズム[2]を用いる．ここで，学習回数を50回，中間層のセル数を5個に設定した．学習終了後のニューラルネットワークに学習に用いた4つのデータを提示したところ，全てが5.1節で示した判定基準1により正解となった（100.0%）．

5.2.3 抽出したルールによるファジィ推論

第4章に示したファジィIF-THENルールの自動抽出アルゴリズムを用いて，最終的に表3に示す8個の前件部の各命題に言語的な相対的重要度を抽出することができた．

抽出したルールの評価を行うため，抽出した8個のファジィIF-THENルールによるファジィ推論を行った．なお，前件部の各命題に言語的な相対的重要度をもつファジィIF-THENルール[6]を用いた推論法が3種類提案されており，本研究では，推論法Iを用いた．

実際に，学習に用いた4つのデータを前提として与えて，ファジィ推論を行ってみたところ，どのデータに対しても妥当な結果を推論することができた．表4にその推論結果を示す．

表4 ファジィ推論による推論結果

データ番号	主観的に与えられた結論	ファジィ推論の推論結果
1	V.V.T.	V.V.T.
2	FALSE	R.F.
3	V.V.F.	V.V.F.
4	TRUE	R.T.

表3 抽出したファジィIF-THENルール

ルール番号	前件部の各命題のファジィ集合とLRI							結論部のファジィ集合	ルール自身のLTV
	x_1 / LRI_1	$x_2 \leq 40$ / LRI_2	$40 < x_2 \leq 100$ / LRI_3	$100 < x_2$ / LRI_4	$x_3 \leq 60$ / LRI_5	$60 < x_3 \leq 100$ / LRI_6	$100 < x_3$ / LRI_7		
1	C.T. / F.I.	C.T. / M.I.	C.F. / M.I.	C.F. / M.I.	C.T. / V.I.	C.F. / V.I.	C.F. / V.I.	V.V.T.	V.V.T.
2	C.F. / F.I.	C.T. / F.I.	C.F. / F.I.	C.F. / F.I.	C.T. / V.I.	C.F. / V.I.	C.F. / V.I.	V.V.T.	P.T.
3	C.T. / M.I.				C.T. / V.I.	C.F. / V.I.	C.F. / V.I.	V.V.T.	TRUE
4	C.F. / F.I.	C.F. / V.I.	C.F. / V.I.	C.T. / V.I.	C.F. / M.I.	C.T. / M.I.	C.F. / M.I.	V.V.F.	P.T.
5	C.T. / F.I.	C.T. / V.I.	C.F. / V.I.	C.F. / V.I.	C.F. / V.I.	C.F. / V.I.	C.T. / V.I.	TRUE	R.T.
6	C.F / F.I.	C.F. / R.I.	C.F. / R.I.	C.T. / R.I.	C.F. / V.I.	C.F. / V.I.	C.T. / V.I.	V.V.F.	R.T.
7	C.F. / F.I.	C.F. / R.I.	C.F. / R.I.	C.T. / R.I.	C.T. / R.I.	C.F. / R.I.	C.F. / R.I.	FALSE	P.T.
8	C.T. / V.I.	C.F. / V.I.	C.F. / V.I.	C.T. / V.I.	C.F. / F.I.	C.T. / F.I.	C.F. / F.I.	TRUE	P.T.

6. おわりに

本研究では，入力層と出力層であいまいさを内包するデータを扱うことができるニューラルネットワークの形式及び，その学習能力を用いたニューラル・エキスパートシステムを提案した．また，ニューラルネットワークを用いて，前件部の各命題に言語的な相対的重要度をもつファジィIF-THENルールを自動抽出する方法を提案した．さらに，簡単な例題を用いて，提案したニューラル・エキスパートシステムの有効性を示した．

提案したニューラル・エキスパートシステムでは，あいまいさを内包した教師信号，すなわち，「かなり・・・だろう」のようなあいまいな教師信号を用いることが可能であるため，現実問題への応用の可能性が大きいと考えられる．

参考文献

(1) Frydenberg, M and Gallant, S. I. : Fuzziness and Expert System Generation, Uncertainty in Knowledge-Based Systems (B. Bouchon and R. R. Yager (Eds.)), LectureNotes in Computer Science, Vol. 286, 137/143, Springer-Verlag, 1987

(2) Gallant, S. I. : Optimal Linear Discriminants, Proc. of the 8th Int. Conf. on Pattern Recognition, 849/852, 1986

(3) Gallant, S. I. and Smith, D. : Random Cells : An Idea Whose Time has Come and Gone .. And Come Again ?, Proc. of IEEE Inf. Conf. on Neural Networks, Vol. 2, 671/678, 1987

(4) Gallant, S. I. : Connectionist Expert System, Communications of the ACM, vol. 31, No. 2, 152/169, 1988

(5) Gallant, S. I. : Perceptron-Based Learning Algorithms, IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 1, No. 2, 179/191 , 1990

(6) 林 陽一，中井 正人 ： 前件部の各命題に相対的重要度をもつファジィプロダクションルールによる推論，電気学会論文誌C, Vol. 109-C, No. 9, 661/668, 1989

(7) 林 陽一，吉田 勝美，井村 敦 ： ファジィ・ニューラル・エキスパートシステムとその医療診断への応用，第5回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，473/480, 1989

(8) 林 陽一，井村 敦，吉田 勝美 ： 不確実な環境下でのニューラル・エキスパートシステムの一実現法とその評価，第11回知識・知能システムシンポジウム資料，13/18, 1990

(9) 林 陽一，中井 正人 ： ニューラルネットワークを用いたファジィIF-THENルールの自動抽出，電気学会論文誌C, Vol. 110-C, No. 3, 198/206, 1990

(10) 林 陽一，坂田 正輝，中尾 隆司，大橋 新悟 ： 分散法による英数字の認識能力，電気学会論文誌C, Vol. 110-C, No. 3, 156/165, 1990

(11) Hayashi, Y., Sakata, M. and Gallant, S. I. : Multi-Layer Versus Single-Layer Neural Networks and an Application to Reading Hand-Stamped Characters, Proc. of Int. Neural Network Conf. (INNC 90), Paris, 1990(to appear)

(12) 北村 新三，田中 克己 ： ニューラルネットワークとプロダクションルール表現，計測自動制御学会第9回知識工学シンポジウム資料，35/38, 1989

(13) Negoita, C. V. : Expert Systems and Fuzzy Systems, Benjamin Cummings Publishing, 1985

(14) Saito, K and Nakano, R : Medical Diagnostic Expert Sysytem Based on PDP Model, Proc. of IEEE Int. Conf. on Neural Networks, Vol. 1, 255/262, 1988

(15) Yoshida, K., Hayashi, Y. and Imura, A. : A Connectionist Expert System for Diagnosing Hepatobiliary Disorders, MEDINFO89 (Proc. of the 6th World Congress on Medical Informatics), Beijing & Singapore, North-Holland, 116/120, 1989

問い合わせ先：〒316 日立市中成沢町4-12-1
茨城大学工学部情報工学科
林 陽一
TEL 0294-35-6101, 内線 392
FAX 0294-34-3254

TA4-2

ファジィニューラルネットワークの構成法とその性能評価

Composition Methods of Fuzzy Neural Networks and Their Performance Evaluation

堀川 慎一 Shin-ichi HORIKAWA　古橋 武 Takeshi FURUHASHI　大熊 繁 Shigeru OKUMA　内川 嘉樹 Yoshiki UCHIKAWA

名古屋大学 工学部
Fuculty of Engineering, Nagoya University

Abstract : A fuzzy neural network (FNN) is a system which applies the neural network (NN) to the fuzzy reasoning. Although the fuzzy reasoning can quantitatively deal with such fuzzy algorithms as human's judgements, it is very difficult to identify the rules of the judgements and tune the parameters of the membership functions. So several reserches have been done on the FNN, expecting automatic identification/tuning. There has been no FNN which can identify the fuzzy rules and tune the membership functions simultaneously.

This paper presents three new composition methods of FNNs. The new FNNs can automatically identify fuzzy rules and tune the membership functions. Their performances on fuzzy modeling are evaluated using simple numerical data. The results show that the FNNs can identify nonlinear systems to the same extent of precision as the conventional fuzzy modeling methods do.

1 はじめに

ファジィニューラルネットワーク (Fuzzy Neural Network : FNN) は、ファジィ推論[1]にニューラルネットワーク (Neural Network : NN)[2]を応用したものである。ファジィ推論は、人間の判断のようにあいまいさを含むアルゴリズムを定量的に取り扱うことができ、制御の分野において応用が進められている[3]。しかし、ファジィ推論におけるファジィルールやメンバシップ関数等のパラメータを決定することは極めて困難であり、多大な労力を必要とすることが多い。そのため、NN の学習機能によりファジィルールの同定やメンバシップ関数の調整を自動的に行うことのできる FNN の構成法が提案された[4][5][6]が、ファジィルールの同定とメンバシップ関数の調整を同時に行えるものはこれまで報告されていない。

本稿では、ファジィルールの同定とメンバシップ関数の調整を自動的にしかも同時に行うことが可能な 3 つのタイプの FNN の構成法を提案する。そして、簡単な数値例を用いたファジィモデリング[7]により性能評価を行い、従来のファジィモデリングと同等の性能を持ち得ることを示す。

2 構成法

2.1 前件部

提案する FNN は、ファジィ推論において決定すべきパラメータを NN の結合荷重で表現し、バックプロパゲーションアルゴリズム[2]を用いてそれらを同定・調整するものである。本稿では 3 つのタイプの FNN の構成法を提案するが、ファジィルールの前件部の構成は共通である。

図 1 は、2 入力 (x_1,x_2)3 前件部メンバシップ関数の場合における本 FNN の前件部の構成例を示す。図中の丸印はユニット、ユニット間の記号 ws,wc,wg および 1,−1 は結合荷重を表し、ws,wc,wg は学習によって変化する。また、Σ,Π の記号を持つユニットは、それぞれ入力の線形和および線形積を出力し、f の記号を持つ (D) 層のユニットにおいては、その入力 x に対する出力 $f(x)$ が次式のシグモイド関数で定義される。

$$f(x)=\frac{1}{1+e^{-x}} \tag{1}$$

記号のないユニットは、単に入力を出力に分配している。

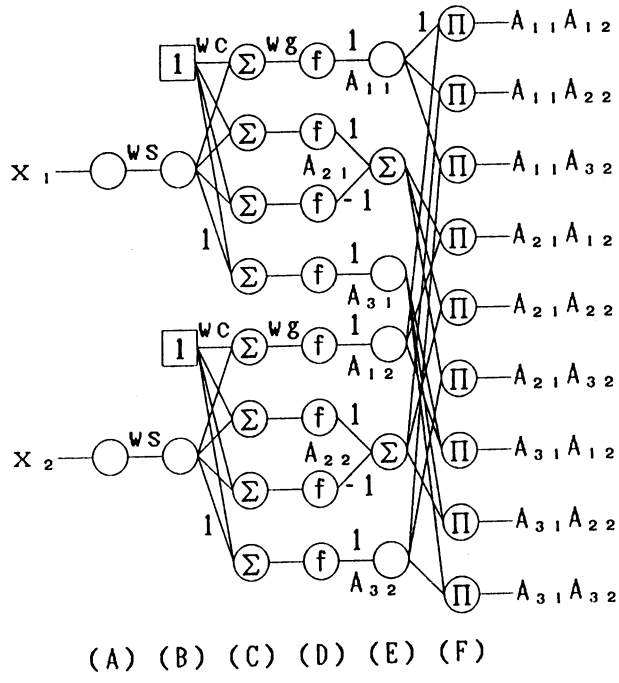


図 1 前件部の構成例

まず、(A) 層に加えられた入力 $x_j(j=1,2)$ は、結合荷重 ws によって規格化される。この規格化された入力に対し、(C) 層においてバイアスである結合荷重 wc が加えられ、それに wg を掛けたものが (D) 層のシグモイド関数の入力となる。すなわち、結合荷重 wc,wg は、それぞれ規格化された台集合上におけるシグモイド関数の中心の位置および傾きを定めるものである。これらの結合荷重を事前に適当な値に設定することにより、(E) 層の出力は図 2 に示すような前件部メンバシップ関数 $A_{ij}(i=1,2,3)$ となる。ただし、擬似台形型メンバシップ関数 A_{2j} は、図 3 のように点線で示される 2 つの符号の異なるシグモイド関数の和で構成される。wc の値によっては $A_{2j}(x_j)<0$ となることもあり得るが、その場合には $A_{2j}(x_j)=0$ とする。(F) 層においては、異なる入力に対する前件部メンバシップ関数同士のグレードの積が求められる。これは、後述するように各ファジィルールの前件部適合度となる。なお、(F) 層のユニットの数 n_F は、前件部メンバシップ関数の組み合わせと等しくなるため、一般に前件部メンバシップ関数の種類数を m 、本 FNN の入力数を n_{in} とすると $n_F=m^{n_{in}}$ 個（図 1 の場合 $3^2=9$ 個）である。

本 FNN では、結合荷重 ws,wc,wg により前件部メンバシップ関数を図 2 のようにあらかじめ適当に配置し、ws,wc,wg を学習で変化させることによってその調整を行う。

2.2 Type I (後件部 : 定数)

Type I では、ファジィルールの後件部を定数で表現[8]し、前件部適合度を乗算で、推論値を前件部適合度と後件部定数との積和で求める簡略化したファジィ推論を用いる。この推論法は、2 入力 (x_1,x_2)1 出力 (y) の場合には次のように表される。

$$R^i\text{:If } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ then } y=f_i \quad (i=1,2,\cdots,n) \quad (2)$$

$$y^*=\sum_{i=1}^{n}\mu_i f_i, \quad \mu_i=A_{i1}(x_1)A_{i2}(x_2) \quad (3)$$

ここで、R^i は i 番目のファジィルール、A_{i1},A_{i2} はファジィ変数、f_i は定数、n はルール数、y^* は推論値、μ_i は R^i の前件部適合度である。

図 4 は、2 入力 1 出力 3 前件部メンバシップ関数の場合の Type I の構成例を示す。図中の wf は後件部定数 f_i を意味する結合荷重である。(F) 層のユニットの出力は、前述のごとく異なる入力に対する前件部メンバシップ関数値の積であり、(3) 式からわかるように、これは各ファジィルールの前件部適合度 μ_i となる。(F) 層のユニットと結合荷重 wf の数は等しく $m^{n_{in}}$ 個（図 4 では $3^2=9$ 個）で、この数が (2) 式における Type I の同定可能なルール数 n を表す。従って、前件部適合度 μ_i と後件部定数 f_i を意味する wf との積和が推論値 y^* として (G) 層から出力されることにより、(2),(3) 式に基づくファジィ推論が実現される。

Type I では、結合荷重 wf をすべて 0 としてファジィルールが全く存在しない状態から学習を始め、wf を変化させることによりその同定を行う。

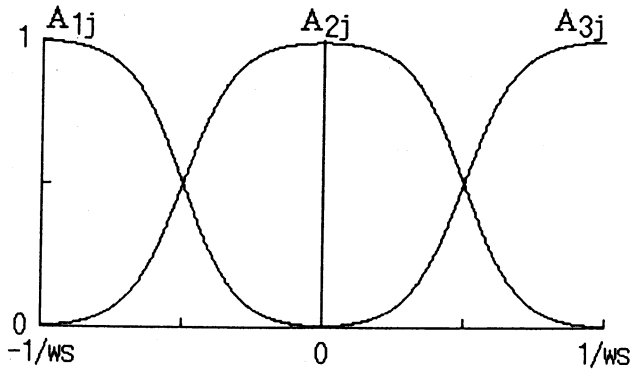


図 2 前件部メンバシップ関数

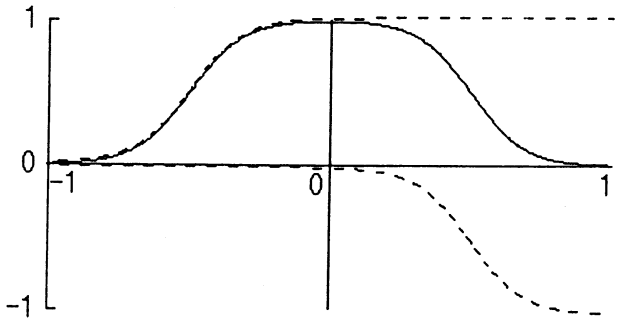


図 3 擬似台形型メンバシップ関数 A_{2j} の構成法

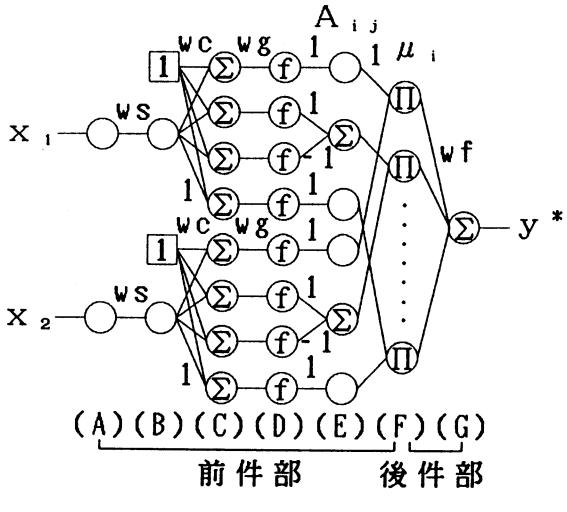


図 4 Type I の構成例

2.3 Type II (後件部：一次式)

Type II で用いる推論法においては、ファジィルールの後件部が入力変数の一次式で表され、前件部適合度と後件部一次式との積和により推論値が求められる。この方法は、2入力1出力の場合次のように表される。

$$R^i\text{:If } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ then } y=f_i(x_1,x_2) \quad (i=1,2,\cdots,n) \tag{4}$$

$$y^*=\sum_{i=1}^{n}\mu_i f_i(x_1,x_2), \quad \mu_i=A_{i1}(x_1)A_{i2}(x_2) \tag{5}$$

ここで、

$$f_i(x_1,x_2)=a_0+a_1x_1+a_2x_2, \qquad a_j(j=0,1,2):\text{定数} \tag{6}$$

である。(4)式の後件部は、Type I の後件部における定数が入力変数によって補正されたものと考えることができる。また、各ファジィルールの前件部適合度μ_iはType I と同様であり、同定可能なルール数 n も $m^{n_{in}}$個となる。

図5は、図4と同様2入力1出力3前件部メンバシップ関数の場合における Type II の構成例を示す。図中の結合荷重$wa_j(j=0,1,2)$は、(6)式の係数a_jを意味する。図5の(A)~(F)層においては、Type I と同じく前件部適合度μ_iが計算されるが、後件部一次式$f_i(x_1,x_2)$の値は、(G)~(J)層のような構成により求めることができる。従って、(K)層の出力は、各ファジィルールの推論値である$\mu_i f_i(x_1,x_2)$となり、それらの和で表されるファジィルール全体の推論値y^*が(L)層より出力される。ただし、(F),(J),(K)層のユニットの数は、ルール数nと等しいことから$m^{n_{in}}$個である。以上の構成によって、(4)~(6)式に基づくファジィ推論が実現される。

Type II の推論法は、後件部が入力変数の一次式で表されるため、学習により獲得されたファジィルールの意味は Type I や通常のファジィ制御器等におけるものよりがわかりにくいが、ファジィ推論の記述能力の点では大変優れている[9]。

Type II では、結合荷重wa_jの初期値をすべて0に設定し、学習によりファジィルールの同定を行う。

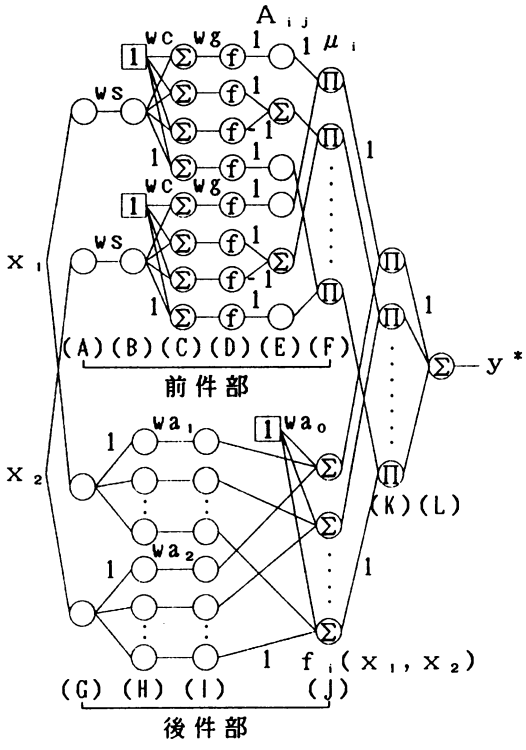


図5 Type II の構成例

2.4 Type III (後件部：ファジィ変数)

Type III で用いられる推論法の一般式は、次のように表される。

$$R^i\text{:If } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ then } y=r_{ij}Bj \quad (i=1,2,\cdots,n;j=1,2) \tag{7}$$

$$y^*=\sum_{j=1}^{2}\mu'_j B_j^{-1}(\mu'_j), \quad \mu'_j=\sum_{i=1}^{n} r_{ij}\mu_i, \quad \mu_i=A_{i1}(x_1)A_{i2}(x_2) \tag{8}$$

上式は2入力1出力の場合のもので、B_jはファジィ変数、r_{ij}は[0,1]の定数、B_j^{-1}はB_jの逆関数、μ'_jはB_jの(後件部)適合度である。(7)式のr_{ij}はB_jの述語修飾演算子の一種であると考えることができ、例えばr_{ij}=0.3の場合には「ややB_j」、r_{ij}=0.9の場合には「ほとんどB_j」という意味を表す。(8)式の後件部適合度μ'_jは、現在の入力に対しB_jを出力すべき度合を示すものである。ただし、B_jは2種類に限られており、出力として正負両方の値が必要なときには Negative と Positive 、正の値のみでよいときには Small と Big をそれぞれ用いる。

図6は、図4,5と同じ2入力1出力3前件部メンバシップ関数の場合の Type III の構成例を示す。図中の wr は修飾演算子r_{ij}を意味する結合荷重であり、ws',wc',wg' は ws,wc,wg と同様に後件部メンバシップ関数を定めるものである。また、(H)層のgの記号を持つユニットは、その入出力関係が次式で定義される。

$$g(x)=\ln\frac{x}{1-x} \tag{9}$$

(9)式は、(1)式のシグモイド関数$f(x)$の逆関数である。図6の(G)層の出力は、修飾演算子r_{ij}と前件部適合度μ_iとの積和で表される後件部適合度μ'_jとなるが、このμ'_jが(H)層の$g(x)$に入力される。後件部の(H),(I),(K),(L)層は前件部の(D),(C),(B),(A)層と対称になっており、従って、(I)層からはμ'_jに対応する後件部メンバシップ関数B_jの規格化された台集合上における値が出力されることになる。(J)層においてはその値とμ'_jの積が求められ、これらの和に後件部規格化定数を意味する結合荷重 ws' を掛けたものが(L)層の出力であるy^*となる。以上により、(7),(8)式に基づくファジィ推論が実現される。

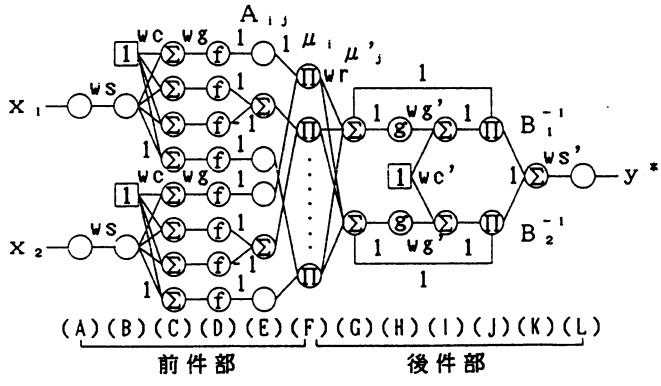


図6 Type III の構成例

Type III の推論法は、後件部が一般的なファジィ制御器のようにファジィ変数で表されるので、Type I , II よりも定性的にわかりやすいファジィルールを同定することができる。

Type III では、前件部と同様に後件部のメンバシップ関数をあらかじめ適当に配置した上で学習を始め、結合荷重 ws',wc',wg' によりその微調整を行う。また、wr の初期値は、(9) 式のシグモイド関数の逆関数 $g(x)$ の定義域を考慮してすべて 0.5 とし、等価的にファジィルールを持たない状態から学習によりルールを同定する。

3 学習法

前章で述べたように、本 FNN では、特定の意味を持つ各結合荷重を学習によって変化させることにより、ファジィルールの同定およびメンバシップ関数の微調整を行う。その学習アルゴリズムには、次のようなバックプロパゲーションアルゴリズムを用いる。

$$\text{出力層}: \delta_j^{(n)} = (t_j - o_j^{(n)}) f'(i_j^{(n)}) \tag{10}$$

$$\text{中間層}: \delta_j^{(n)} = f'(i_j^{(n)}) \sum_k \delta_k^{(n+1)} w_{kj}^{(n+1)} \tag{11}$$

ここで、添え字 (n),j はそれぞれ第 n 層、第 j ユニットを意味し、t は出力層の教師信号、i,o は各ユニットの入力および出力、f' はユニットの内部関数の導関数、$w_{kj}^{(n+1)}$ は第 n 層第 j ユニットから第 $n+1$ 層第 k ユニットへの結合荷重である。ただし、前件部 (E) 層および Type II の前件部 (F) 層、後件部 (J) 層においては、次の層で乗算が行われることから

$$\delta_j^{(n)} = f'(i_j^{(n)}) \sum_k \delta_k^{(n+1)} w_{kj}^{(n+1)} (\prod_{i \neq j} w_{ki}^{(n+1)} o_i^{(n)}) \tag{12}$$

のように計算する。上式は、次層 (第 $n+1$ 層) の入力が

$$i_k^{(n+1)} = \prod_i w_{ki}^{(n+1)} o_i^{(n)} \tag{13}$$

と表されることに注意して、(11) 式を求める過程と同様にして導出できる。また、Type III の後件部 (G) 層の $\delta_j^{(n)}$ は、(11),(12) 式の和で求められる。なお、前件部 (D) 層および Type III の後件部 (H) 層以外のユニットはすべて線形ユニットであるため、常に $f'(i_j^{(n)})$=1 となる。

結合荷重は、(10)~(12) 式の結果を用いて

$$w_{ji}^{(n)}(m+1) = w_{ji}^{(n)}(m) + \eta \delta_j^{(n)} o_i^{(n-1)} \tag{14}$$

と更新する。ここで、m は更新回数、η は学習率である。ただし、前件部の ws については、

$$w_{ji}^{(n)}(m+1) = w_{ji}^{(n)}(m)(1 + \eta \delta_j^{(n)} w_{ji}^{(n)}(m) o_i^{(n-1)}) \tag{15}$$

により更新を行う。これは、入力変数によって、前件部 (A) 層のユニットの出力 $(o_i^{(n-1)})$ とその規格化定数である ws$(w_{ji}^{(n)})$ が大きく異なることがあり、ws の更新に (14) 式を用いるとその変化率が一様にならず学習率を個別に設定する必要が生じるためである。(15) 式では、$o_i^{(n-1)}$ は $w_{ji}^{(n)}$ によって規格化されており、$w_{ji}^{(n)}$ の変化率を $o_i^{(n-1)}$ および $w_{ji}^{(n)}$ の値によらず一様にできるので、学習率の設定を簡単化できる。また、Type III の wr については、初期値をすべて 0.5 に設定するため

$$w_{ji}^{(n)}(m+1) = w_{ji}^{(n)}(m)(1 - \beta + \eta \delta_j^{(n)} w_{ji}^{(n)}(m) o_i^{(n-1)}) \tag{16}$$

のように更新する。ここで、β は減衰率であり、これにより不必要なファジィルールを学習回数に応じて減衰させることができる。(15),(16) 式は、結合荷重をその符号を反転させることなく更新可能であるという利点を持つ。

4 性能評価

本 FNN の有用性を示すため、文献 (4) と同様に、文献 (7) のファジィモデリングで用いられた簡単な数値例により性能評価を行った。

性能評価のためのモデリングの対象として用いたのは、次式で表される 3 入力 (x_1,x_2,x_3)1 出力 (y) の非線形システムである。

$$y = (1 + x_1^{0.5} + x_2^{-1} + x_3^{-1.5})^2 \tag{17}$$

表 1 は、(17) 式より採取した 40 個の入出力データを示す[4]。ただし、No.1~20 は同定用データ、No.21~40 は評価用データであり、入力変数 x_4 は (17) 式と無関係なダミー変数である。本 FNN における学習は、20 個の同定用データを順次ネットワークに入力することによって行い、データの一巡をもって学習回数 1 回とした。また、各結合荷重に対する学習率・減衰率は、入出力データの値および学習時のメンバシップ関数の変化から、それぞれのタイプにおいて表 2 のように設定した。本 FNN に

表 1 入出力データ

No.	x_1	x_2	x_3	x_4	y	No.	x_1	x_2	x_3	x_4	y
1	1	3	1	1	11.110	21	1	1	5	1	9.545
2	1	5	2	1	6.521	22	1	3	4	1	6.043
3	1	1	3	5	10.190	23	1	5	3	5	5.724
4	1	3	4	5	6.043	24	1	1	2	5	11.250
5	1	5	5	1	5.242	25	1	3	1	1	11.110
6	5	1	4	1	19.020	26	5	5	2	1	14.360
7	5	3	3	5	14.150	27	5	1	3	5	19.610
8	5	5	2	5	14.360	28	5	3	4	5	13.650
9	5	1	1	1	27.420	29	5	5	5	1	12.430
10	5	3	2	1	15.390	30	5	1	4	1	19.020
11	1	5	3	5	5.724	31	1	3	3	5	6.380
12	1	1	4	5	9.766	32	1	5	2	5	6.521
13	1	3	5	1	5.870	33	1	1	1	1	16.000
14	1	5	4	1	5.406	34	1	3	2	1	7.219
15	1	1	3	5	10.190	35	1	5	3	5	5.724
16	5	3	2	5	15.390	36	5	1	4	5	19.020
17	5	5	1	1	19.680	37	5	3	5	1	13.390
18	5	1	2	1	21.060	38	5	5	4	1	12.680
19	5	3	3	5	14.150	39	5	1	3	5	19.610
20	5	5	4	5	12.680	40	5	3	2	5	15.390

表 2 学習率・減衰率の設定

Type I		Type II		Type III	
結合荷重	学習率	結合荷重	学習率	結合荷重	学習率
ws	2×10^{-5}	ws	2×10^{-5}	ws	2×10^{-5}
wc	1×10^{-5}	wc	1×10^{-5}	wc	5×10^{-6}
wg	5×10^{-3}	wg	5×10^{-3}	wg	5×10^{-3}
wf	1×10^{-1}	wa_0	1×10^{-1}	wr	1×10^{-3}
		$wa_j(j\neq0)$	5×10^{-4}	ws'	5×10^{-4}
				wc'	2×10^{-6}
				wg'	5×10^{-7}
				結合荷重	減衰率
				wr	1×10^{-4}

より同定したファジィモデルの精度は、2000回学習後に次式で評価した。

$$E = \frac{1}{20}\sum_{i=1}^{20}\frac{|y_i - y_i^*|}{y_i} \times 100\ (\%) \qquad (18)$$

ここで、yは表1の出力データ、y^*は本FNNの推論値である。性能評価は以下の手順で行った。

(1) 前件部構造の決定

各入力に対する前件部メンバシップ関数の種類数を決定する。本FNNの構成が4入力1出力で前件部メンバシップ関数が2,3,4,5種類の場合について、同定用データの$x_1 \sim x_4$をFNNの入力、yをFNNの教師信号として学習を行った。その結果を表3に示す。

Type I, IIでは、前件部メンバシップ関数が2種類のときにE_1が最も大きな値となり、E_2は前件部メンバシップ関数の種類数の増加とともに大きくなっている。モデリングにおいては、限られた入出力データからいかにそのシステムの特性を表すモデルを同定するかが重要である。従って、この場合には、学習に用いた同定用データに対する精度E_1だけでなく、評価用データに対する精度E_2も重視され、最適な前件部メンバシップ関数の種類数は2であると判断できる。一方、Type IIIでは、3種類のときにE_2が最も小さくなっており、E_1も比較的小さな値であるのでこの場合が最適であると思われる。しかし、Type I, IIのように種類数による差は大きくなく、以下の手順では、Type IIIにおいても前件部メンバシップ関数を2種類とした。

表3 前件部構造の選択

種類数	Type I		Type II		Type III	
	E_1	E_2	E_1	E_2	E_1	E_2
2	0.95	19.59	0.48	21.36	3.31	37.16
3	0.00	29.73	0.00	31.29	1.05	30.74
4	0.00	52.44	0.00	53.26	3.25	41.10
5	0.00	55.76	0.00	55.74	0.88	46.66

(2) 入力変数の選択

手順(1)では、表1における全入力変数を用いたが、一般に与えられたデータにおける入力変数がすべて有効であるとは限らない。そこで、入力変数の選択を行うため、本FNNを3入力1出力2前件部メンバシップ関数の構成とし$x_1 \sim x_4$のどれか1つを取り除いた状態で学習を行った。その結果を表4に示す。

3入力変数の場合には、どのタイプにおいてもx_4を含まないときにE_1,E_2が最も小さくなっている。また、E_2については4入力変数の場合よりもはるかに小さな値が得られている。有効な入力変数は$x_1 \sim x_3$でx_4は不要であることが判定できる。

表4 入力変数の選択

入力変数	Type I		Type II		Type III	
	E_1	E_2	E_1	E_2	E_1	E_2
x_1,x_2,x_3,x_4	0.95	19.59	0.48	21.36	3.31	37.16
x_2,x_3,x_4	20.44	52.38	19.54	52.53	19.52	52.01
x_1,x_3,x_4	11.72	27.63	11.21	28.39	12.18	26.04
x_1,x_2,x_4	8.76	29.44	8.36	24.65	8.45	26.65
x_1,x_2,x_3	0.82	1.84	0.60	1.80	1.38	2.00

(3) モデルの比較

本稿では、手順(2)により得られた結果を文献(4),(7)において同定されたモデルと比較することにより性能評価を行った。各手法によるモデルの精度を表5に示す。

本FNNの同定したモデルは文献(4),(7)におけるモデルと同程度の精度を示しており、本FNNが他のファジィシステムと同等の性能を持ち得ることがわかる。

本FNNの学習前後のメンバシップ関数を図7に、本FNNの同定したファジィルールを表6にそれぞれ示す。本FNNでは、各結合荷重が特定の意味を持っているため、明確な形でファジィ推論を表すことができる。図7の破線が学習前、実線が学習後のメンバシップ関数を表している。前件部メンバシップ関数はタイプによらずほぼ同様な調整がなされている。ファジィルールについては、各タイプごとに特徴的なルールが同定されている。

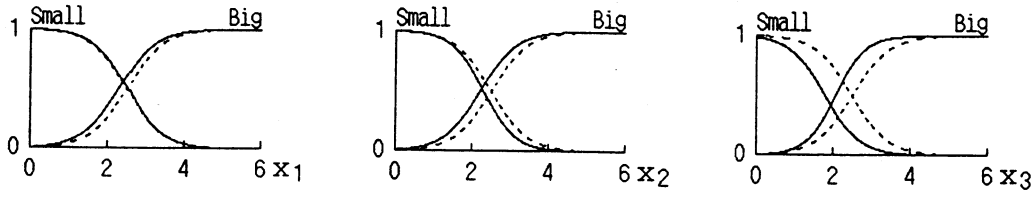
表5 モデルの比較

手法		E_1	E_2
FNN	Type I	0.82	1.84
	Type II	0.60	1.80
	Type III	1.38	2.00
菅野ファジィモデリング[7]	モデルI	1.5	2.1
	モデルII	1.1	3.6
NN駆動型ファジィ推論[4]		0.47	4.79

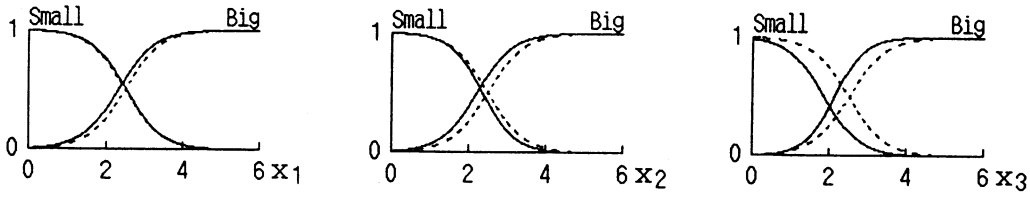
5 まとめ

本稿では、異なる推論法に基づく3種類のFNNの構成法を提案し、その有用性を簡単な数値例を用いたファジィモデリングにより示した。本FNNにおいては、ファジィルールの同定とメンバシップ関数の調整を、同時にかつ自動的に行うことができる。

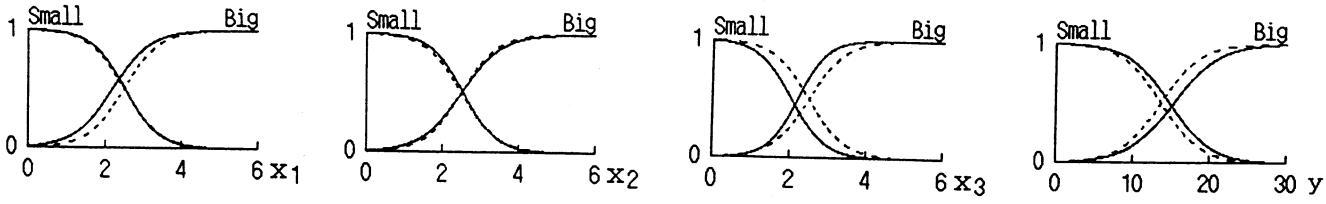
今後は、これらの構成法についてさらに検討を加え、制御への応用を検討していく予定である。



(a) Type I



(b) Type II



(c) Type III

図7 ファジィモデルにおけるメンバシップ関数(FNN)

表6 同定されたファジィルール(FNN)

前件部			後件部		
x_1	x_2	x_3	Type I	Type II	Type III
Small	Small	Small	18.32	$16.90+0.087x_1+0.186x_2+0.149x_3$	0.201Small 0.624Big
Small	Small	Big	8.76	$9.03+0.047x_1+0.021x_2-0.030x_3$	0.121Small 0.413Big
Small	Big	Small	10.06	$10.42+0.054x_1-0.153x_2-0.080x_3$	0.057Small 0.503Big
Small	Big	Big	4.62	$3.83+0.020x_1+0.195x_2-0.010x_3$	0.240Small 0.048Big
Big	Small	Small	30.82	$27.07+0.659x_1+0.097x_2+0.202x_3$	0.471Small 0.955Big
Big	Small	Big	18.92	$16.09+0.395x_1+0.103x_2+0.174x_3$	0.071Small 0.828Big
Big	Big	Small	22.24	$17.14+0.419x_1+0.575x_2-0.046x_3$	0.016Small 0.955Big
Big	Big	Big	12.57	$9.66+0.238x_1+0.141x_2+0.247x_3$	0.161Small 0.582Big

参考文献

(1) 寺野、他：「ファジィシステム入門」、オーム社、1987
(2) Rumelhart, et al. : "PARALLEL DISTRIBUTED PROCESSING", The MIT Press
(3) 廣田、他：「ファジィシステムの実用化基礎理論と応用事例」、経営開発センター出版部、1989
(4) 林、高木：「神経回路網モデルによるファジィ推論の定式化」、第4回ファジィシステムシンポジウム、55/60、1988
(5) 西口：「ニューラルネットワークによるファジィメンバーシップ関数の自動調整」、第15回システムシンポジウム・第10回知識工学シンポジウム合同シンポジウム、261/266、1989
(6) 山口、他：「連想記憶によるファジィルールの推論・学習方式」、電気学会論文誌C、110-3、207/215、1990
(7) 姜、菅野：「ファジィモデリング」、計測自動制御学会論文集、23-6、106/108、1987
(8) 市橋、田中：「PIDとFUZZYのハイブリット型コントローラー」、第4回ファジィシステムシンポジウム、97/102、1988
(9) 菅野：「ファジィ制御」、日刊工業新聞社、1988
(10) 堀川、他：「ニューラルネットワークによる学習型ファジィ制御器の構成」、平成2年電気学会全国大会講演論文集、13、73/74、1990

問い合わせ先：〒464-01 名古屋市千種区不老町
名古屋大学工学部電子機械工学科 内川研究室
堀川 慎一
Tel. 052-781-5111 ext.2792
Fax. 052-781-9263

TA4-3

ニューラルネットワークを用いた自己組織化的ファジィ制御器の構成

Cnstruction of Self-Organizing Fuzzy Controllers by Neural Networks

采原敬三* 高木敏幸* 後藤泰之** 中西祥八郎*
Keizo UNEHARA, Toshiyuki TAKAGI, Yasuyuki GOTOH and Shohachiro NAKANISHI

＊ 東海大学 工学部
Faculty of Engineering, TOKAI University
＊＊ 名古屋大学 工学部
Faculty of Engineering, NAGOYA University

Abstract

The authors propose a system integrating the fuzzy controller which is automatically formed by means of two neural networks. One of these neural networks acts as a classifier of the output of a controlled object, and the other one is used as knowledge for the dynamic response of the object system. The fuzzy control rules in the controller are automatically integrated from the information based on the neural networks. Moreover, a self-tuning mechanism by fuzzy inference is used in the system to adequately control the object system. Finaly, the system is applied to a frequency control of the power systems, and the effectuality of the system is shown by this application.

1．はじめに

現在の工学が対象とするシステムは大規模・複雑化の傾向を呈しており、そこで用いられる制御も多様化してきている。なかでも、その中にあいまいさを内包していて数学的モデルで記述することが困難なシステムや、熟練者によって操作されていて従来自動化が困難であった複雑なシステムの制御に対する関心はきわめて高くなってきている。このようなシステムに対してファジィ制御[1]の手法はきわめて有効であることが立証されており、各方面からその応用に関して注目を浴びている。ファジィ制御器を構成する方法の一つとして、専門家あるいは熟練者の知識や経験に基づいて構成する方法があるが、これはあくまで人間が制御器を構成しなければならない。しかし、現実にはシステムの挙動が人間の応答より早くて、その制御に関する熟練者を育成することができない場合や、人材の不足などにより専門家を養成することができない場合などがある。このような状況下では専門家や熟練者の知識や経験を用いることができない。しかしながら、このようなシステムや対象に対してもファジィ制御を用いる要請は高く、また必要性が生じている。

一方、ニューラルネットワーク[2),3)]は生体の脳、神経系が持つ高度な情報処理の機能や原理に学んだ、新しい工学的情報処理システムである。このニューラルネットワークは人間の特性を活かしたシステムであり、その顕著な特徴として学習機能を有している。本稿はこのニューラルネットワークの学習機能に着目し、システムや制御対象の動作などをニューラルネットワークに学習させる。そして、その学習知識と高度な専門的知識をもたないような人にでも容易に判断できるシステムに関する初等的知識に基づいてファジィ制御器を自動的に構成するシステムを提案する。また、本システムではファジィ制御規則の中のファジィ変数を表すメンバーシップ関数に関する規格化定数をファジィ推論によってチューニングしている。さらに、本システムを単独の電力系統の周波数制御に応用し、その有効性を示す。

2．自己組織化的ファジィ制御器の構成

本システムの概略を図1に示す。また、ここで使用するファジィ制御器の制御規則は

If E is A_{i1} and ΔE is A_{i2} then U is B_i (1)

のような形をしているものとする。ここで、Eは制御対象の出力の目標値からの偏差、ΔEはその変化分、Uは制御量を表している。また、ファジィ変数A_{i1}, A_{i2}, B_i を表すメンバーシップ関数を図2に示す。

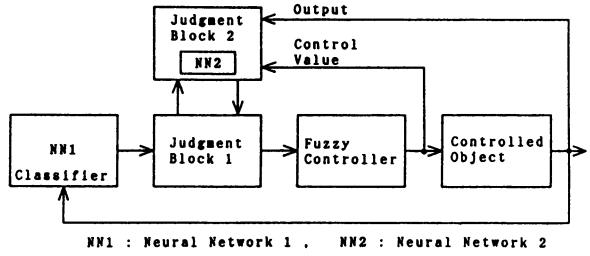


図1．システム概略図

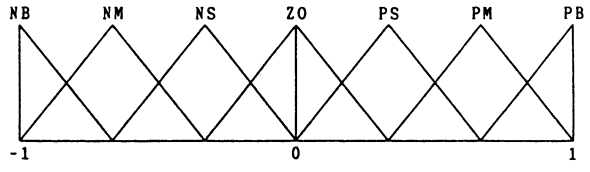


図2．ファジィ変数のメンバーシップ関数

2．1 各部の機能

本システムの各部の機能および役割について詳細な内容を次に述べる。

（1）ニューラルネットワーク1

制御対象の出力波形を高度な専門的知識を持たないような人にでも容易に分けられる波形に分類する。その波形としてつぎのように大まかに7個のパターンに分類し、波形パターンをＮＮ1に学習（誤差逆伝播学習）させる。任意の波形が入力されたとき、学習済みのＮＮ1は入力波形を学習したパターンに類別するか、あるいはいずれのパターンにも属さないと判断する。

1) Ａタイプ波形：目標値に対してわずかの定常偏差および振動を許容するがほぼ理想に近い出力波形。
2) Ｂタイプ波形：振動的で発散している出力波形。
3) Ｃタイプ波形：目標値に対して振動的に収束しているが、その収束時間が遅い出力波形。

4) Dタイプ波形：目標値に対して漸近的に収束しているが、その収束時間が遅い出力波形。
5) Eタイプ波形：目標値に対して大幅に越している定常偏差が存在する出力波形。
6) Fタイプ波形：目標値に対して大幅に達しない定常偏差が存在する出力波形。
7) Gタイプ波形：その他

学習を終了したＮＮ１は制御対象の出力波形の波形分類器として作動し、出力波形から現在の大まかな制御内容あるいは制御対象の大まかな状態を分類する。また、分類結果は判断機構１に送られる。

（２）ニューラルネットワーク２

制御対象の入力波形と出力波形を用いて制御対象の動特性をＮＮ２に学習させる。学習を終了したＮＮ２は制御対象の動特性のモデル化であり、これを判断機構２における制御対象の挙動に関する「知識」として用いる。すなわち、ＮＮ２を制御対象のシミュレータとして用いる。また、望ましい出力波形を得るのに必要な制御量を求めたりすることにも使用できる。

（３）判断機構１

判断機構１は主に制御規則の増設とチューニングを行うかどうかを判断する。

(3)-①：判断機構１ではファジィ制御規則の増設を行うかどうか、および増設するとすれば増設できるかどうかを判断する。制御規則の増設が決まると、制御規則の前件部ファジィ変数のラベルを決定し、判断機構２で決定された後件部ファジィ変数のラベルに基づいてファジィ制御規則を構成する。本システムでは、出力の偏差Ｅとその変化分ΔＥのどちらか一方もしくはその両方のファジィ変数のラベルがＺＯに属する場合の制御規則のみを構成する。ただし、初期の段階ではファジィコントローラには何もルールが存在しないので、判断機構１はある制御対象の状態で適当な初期の制御量U_0を設定する。

(3)-②：(3)-①の判断に基づいて構成されたファジィ制御器（最終段階に至るまでは未完成な制御器）によって制御された制御対象の出力波形は図１に示されているようにＮＮ１に送られる。この出力波形がＮＮ１でＡタイプ波形と分類されなければ、判断機構１はファジィ制御器のスケーリングに関するチューニングを行うように判断する。

(3)-③：(3)-②において、制御対象の出力波形がＮＮ１でＡタイプ波形と判断されると、判断機構１は現在構成されているファジィ制御規則以外の制御規則で、前件部ファジィ変数ＥとΔＥの内いずれか一つもしくはその両方の言語ラベルがＺＯとなるような次の制御規則を構成するように判断する。

（４）判断機構２

判断機構２では主に制御規則の後件部ファジィ変数の量規定とチューニングに関する量規定を行う。

(4)-①：本システムで構成される制御規則は (1)式に示されるような形をしている。また、ファジィ変数には図２に示されているようなメンバーシップ関数を用い、これらのファジィ変数のラベルを次のように数値化する。

PB=3, PM=2, PS=1, ZO=0, NS=-1, NM=-2, NB=-3 (2)

これらの数値を用いて後件部ファジィ変数のラベルを次のように決定する。

（Ｅのファジィ変数のラベルの数値）＋
（ΔＥのファジィ変数のラベルの数値）＝
uのファジィ変数のラベルの数値 (3)

ただし、｜uのファジィ変数のラベルの数値｜＞３の場合にはその符号に応じてＰＢかＮＢのラベルをとるものとする。

(4)-②：図１に示されているように、構成されたファジィ制御器によって制御された制御対象の入出力波形は判断機構２に送られる。このとき、制御対象の入出力波形は各サンプリング時刻t_i (i= 0, 1, …, n)で離散化される。この入出力波形から、各サンプリング時刻t_iにおける出力の目標値からの偏差E_i、その偏差の変化分ΔE_iおよび制御量の変化分ΔU_iを検出し、E_{max}, ΔE_{max}を次のように求める。

$$E_{max} = \max\{|E_i|\} \quad (4)$$

$$\Delta E_{max} = \max\{|\Delta E_i|\} \quad (5)$$

判断機構２はチューニング機構をその内部に持っているが、これに関する詳細を次に述べる。

（５）自己調整機構

本システムでは、ファジィ制御規則は(1)式のような形をしているものと仮定している。従って、前件部に関してはA_{i1}とA_{i2}、後件部に関してはB_iの合計３種類のファジィ変数に関するチューニングが必要になる。このチューニングはすべて図３に示すようなメンバーシップ関数を用いたファジィ推論によって行う。本システムにおけるチューニングは

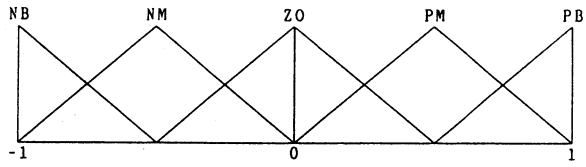


図３．チューニング用メンバーシップ関数

制御対象の出力波形が振動的な場合とそうでない場合、すなわちＢ，Ｃタイプ波形とＤ，Ｅ，Ｆタイプ波形の２つのグループに分けて考える。Ｂ，Ｃタイプ波形の場合には後件部ファジィ変数のチューニングを行い、Ｄ，Ｅ，Ｆタイプ波形の場合には前件部もしくは後件部のチューニングを行う。前件部のチューニングを行うか後件部のチューニングを行うかは、制御量が次の条件式を満たすかどうかによって判定する。

$$\frac{\Sigma|\Delta U_i|}{N} < \frac{\gamma U_0}{2} \quad (6)$$

ここで、Ｎはその時点で構成されている制御規則で制御対象を制御したとき、それらの制御規則による制御を終了するまでに使われた制御規則の使用回数を表す。すなわち、上式の左辺は１回の制御で使用される平均制御量を意味している。また、右辺は左辺の平均制御量がどれぐらいの量であるかを判定する指針として導入された量で、制御するときに使用した後件部ファジィ変数の規格化定数の半分の値を表している。この判定式は規格化されたファジィ変数の領域全体を適切に使用して制御するためのものである。また、本システムでのチューニングは１回のチューニング操作でチューニング操作を終了することを前提としないで、小量づつ数回のチューニング操作を行って全体のチューニングを終了する。なお、制御対象の出力波形がＡタイプ波形と分類された場合にはチューニングの必要はなく、Ｇタイプ波形と分類された場合にはＮＮ１に学習させる分類波形を増設する。

(5)-① ファジィ推論FT_1：このファジィ推論は制御対象の出力がＤ，Ｅ，Ｆタイプ波形と分類されたときの制御規則の前件部ファジィ変数に適応されるチューニングを表している。前件部ファジィ変数の規格化定数をそれぞれαE_{max}および$\beta \Delta E_{max}$とし、このスケーリングファクタαとβの変化分をファジィ推論によって求める。これらのファジィ推論のルールは次のような形である。

If E_{max} is X^1_p and $\Sigma|E_i|$ is X^2_p
then α is A_p (7)

If ΔE_{max} is Y^1_q and $\Sigma|\Delta E_i|$ is Y^2_q
then β is B_q (8)

ここで、前件部ファジィ変数X^1_p, X^2_p, Y^1_q, Y^2_qおよび後件部ファジィ変数A_p, B_qのラベルは図３に示すメンバーシップ関数のラベルを取るものとする。また、(7), (8)式に

よるファジィ推論の出力結果をそれぞれα，βに加えたときの数値を新しいスケーリングファクタα，βとし、これらの数値から新しい規格化定数αE_{max}，$\beta \Delta E_{max}$は決定される。

(5)-② ファジィ推論FT_2： このファジィ推論は制御対象の出力がD，E，Fタイプ波形と分類されたときの制御規則の後件部ファジィ変数に適応されるチューニングを表している。また、このファジィ変数に関する規格化定数をγU_0とし、このスケーリングファクタγの変化分を求めるファジィ推論のルールは次式のように表す。

$$\text{If } \Sigma \Delta U_i \text{ is } X^1_r \text{ and } \Sigma |E_i| \text{ is } X^2_r \quad \text{then } \gamma \text{ is } D_r \tag{9}$$

ここで、後件部ファジィ変数D_rのラベルは図3に示されているようなメンバーシップ関数のラベルを取るものとする。また、(9)式によるファジィ推論の出力結果をγに加えたときの数値を新しいスケーリングファクタγとし、この数値から新しい規格化定数γU_0は決定される。

(5)-③ ファジィ推論FT_3： このファジィ推論は制御対象の出力がB，Cタイプ波形と分類されたときの制御規則の後件部ファジィ変数に適応されるチューニングを表している。このファジィ変数に関するスケーリングは(5)-②のときと同じγU_0の形をとるものとし、このスケーリングファクタγの変化分を求めるファジィ推論のルールは次式のように表す。

$$\text{If } \Sigma |\Delta U_i| \text{ is } X^1_3 \text{ and } \Sigma |\Delta E_i| \text{ is } X^2_3 \quad \text{then } \gamma \text{ is } D_3 \tag{10}$$

また、(10)式によるファジィ推論の出力結果をγに加えたときの数値を新しいスケーリングファクタγとし、この数値から新しい規格化定数γU_0は決定される。

2．2 システムの構成手順

本システムの判断機構1は主としてNN1の情報に基づいて制御規則の構成を司り、判断機構2はチューニングも含めてシステム全体の量規定を行う。本システムの構成手順を両機構の機能や役割と共につぎに示す。

Step. 1 （判断機構1）： ファジィ制御器に制御規則が構成されていない初期の段階では、最初の規則を構成するために制御対象に適当な制御量U_0を与える。

Step. 2 （判断機構2）： 構成された制御規則（最初はU_0）によって制御された制御対象の出力波形から、(5),(6)式によって定められた量E_{max}，ΔE_{max}を求める。

Step. 3 （判断機構2）： 制御規則の中のファジィ変数のスケーリングを行う。ファジィ変数A_{i1}，A_{i2}，B_iの規格化定数は、E_{max}，ΔE_{max}，U_0にそれぞれスケーリングファクタα，β，γを掛けたαE_{max}，$\beta \Delta E_{max}$，γU_0とする。ただし、α，β，γの初期値はそれぞれ1とする。

Step. 4 （判断機構1）： ニューラルネットワーク1の出力を判断し制御規則を構成する。制御規則の構成は次に述べる①，②の順に交互に行うが、この順番は該当する①もしくは②がない場合にはそれをとばして他方の処理を行う。

① ΔE_iに対応する言語ラベルがZOであり、そのとき$|E_i|$が最大となる対（E_i，ΔE_i）を捜す。また、このE_iに対応する言語ラベルも見つける。さらに、いままでに構成されたファジィ制御規則の中に、この対（E_i，ΔE_i）の言語ラベルと同じ前件部をもつ制御規則がすでに構成されているかどうかを調べる。構成されていない場合には、対（E_i，ΔE_i）の言語ラベルの情報を判断機構2に送る。すでに構成されている場合には、ΔE_jの言語ラベルがZOで、そのとき$|E_i|$の次に最大となる$|E_j|$を捜す。この対（E_j，ΔE_j）に対して今までと同様のことを繰り返し、その情報を判断機構2に送る。

② E_iに対応する言語ラベルがZOであり、そのとき$|\Delta E_i|$が最大となる対（E_i，ΔE_i）を捜す。また、このΔE_iに対応する言語ラベルも見つける。さらに、いままでに構成されたファジィ制御規則の中に、この対（E_i，ΔE_i）の言語ラベルと同じ前件部をもつ制御規則がすでに構成されているかどうかを調べる。構成されていない場合には、対（E_i，ΔE_i）の言語ラベルの情報を判断機構2に送る。すでに構成されている場合には、E_jの言語ラベルがZOで、そのとき$|\Delta E_i|$の次に最大となる$|\Delta E_j|$を捜す。この対（E_j，ΔE_j）に対して今までと同様のことを繰り返し、その情報を判断機構2に送る。

Step. 5 （判断機構2）： Step. 4の情報に基づいて、後件部ファジィ変数B_iのラベルを(3)式を用いて決定する。

Step. 6 （判断機構1）： Step. 4とStep. 5の結果から制御規則を構成し、それを新たにファジィ制御器に付け加える。

Step. 7 ： Step. 6で構成されたファジィ制御器を用いて制御対象を制御する。また、不完全なファジィ制御器を用いて制御対象を制御することが困難であるならば、制御対象の動特性に関する知識を使用する。すなわち、NN2をシミュレータとして使用する。

Step. 8 （判断機構1）： Step. 7で制御した制御対象の出力波形をNN1に送り、その出力情報に基づいてファジィ制御器のチューニングを行うかどうかを次のように判断する。

①Aタイプ波形に分類された場合： 制御規則の前件部のファジィ変数E_iとΔE_iの内いずれか一方の言語ラベルがZOとなる制御規則の増設が可能ならばStep. 4に戻り、そうでないならば終了する。

②B，Cタイプ波形に分類された場合： Step. 9に述べるチューニングを行うように判断機構2に指示する。

③D，E，Fタイプ波形に分類された場合： Step. 10に述べるチューニングを行うように判断機構2に指示する。

Step. 9 （判断機構2）： 構成されている制御規則に対してファジィ推論FT_3によるチューニングを行い、Step. 7に戻る。

Step. 10 （判断機構2）： 構成されている制御規則に対してチューニングを行う。この場合には(6)式を満足する場合としない場合に分けてチューニングを行う。

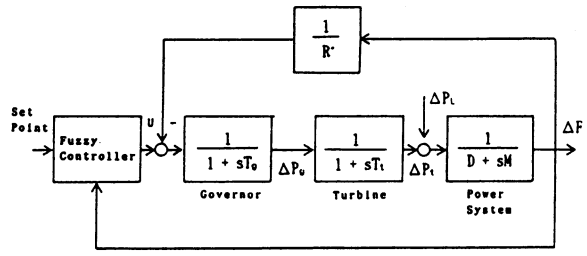
③-(1) (6)式の条件を満足する場合は、先に述べたファジィ推論FT_1によるチューニングを行い、Step. 7に戻る。

③-(2) (6)式の条件を満たさない場合は、ファジィ推論FT_2によるチューニングを行い、Step. 7に戻る。

④タイプG波形に分類された場合： NN1に記憶している分類波形を増やし、Step. 1に戻る。

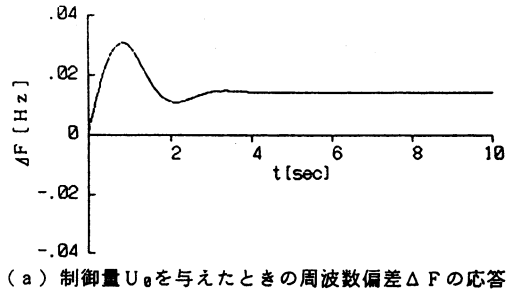
3．電力系統の周波数制御

本稿で提案したシステムの応用例として図4に示されるような電力系統モデル[4]を取り上げ、この系統に0.01[p.u.Mw]のステップ状負荷が生じた場合の周波数制御を行った。

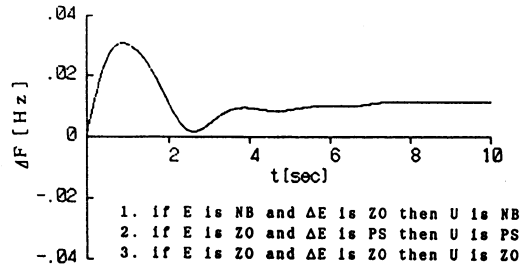


T_g : speed governor time constant (0.08)
T_t : turbine time constant (0.3)
M : inertia constant (1.1667)
D : load-frequency constant (0.00823)
ΔP_L : change in load demand (0.01)
U : control signal
ΔF : frequency deviation
ΔP_g : change in governor-value position
ΔP_t : change in steam turbine output
R : self-regulation of generator

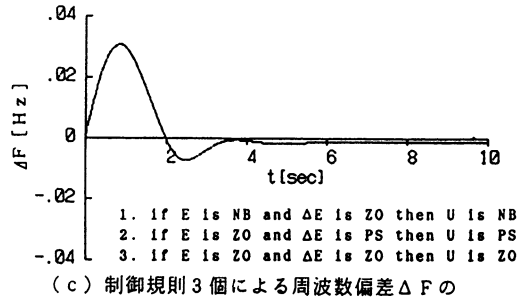
図4．単独系統の周波数制御モデル



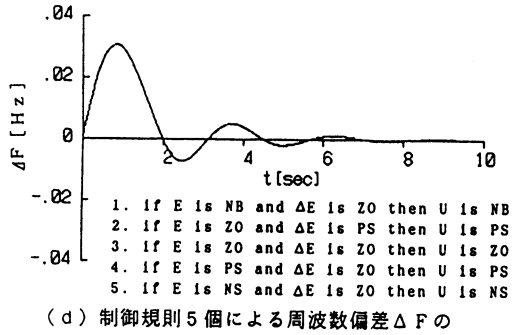
（ａ）制御量U_0を与えたときの周波数偏差ΔＦの応答



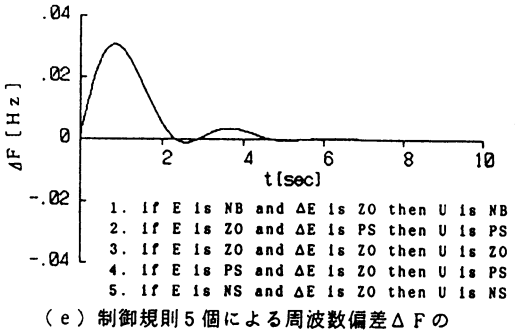
（ｂ）制御規則３個による周波数偏差ΔＦの
チューニング前の応答



（ｃ）制御規則３個による周波数偏差ΔＦの
チューニング後の応答



（ｄ）制御規則５個による周波数偏差ΔＦの
チューニング前の応答



（ｅ）制御規則５個による周波数偏差ΔＦの
チューニング後の応答

図５．周波数偏差ΔＦの応答

図５－（ａ）は、ファジィ制御器に制御ルールが存在しない一番初期の段階で、判断機構１により適当な制御入力U_0が与えられたときの周波数偏差ΔＦの応答を示している。

図５－（ｂ）は、３個目の制御規則をファジィ制御器に増設した直後に、この制御器を用いて電力系統の周波数制御を行った時のΔＦの応答である。チューニングは制御規則を増設した後に、その制御器で制御した後の出力波形を見て、その波形がＡタイプ波形と分類されるまで行われるので、この時点ではまだチューニングは行われていない。この出力波形は定常偏差もあり、良い制御とは言えない。

図５－（ｃ）は、構成された３個の制御規則に対してチューニングが終了した時点におけるΔＦの応答を示している。チューニングを行うためのファジィ推論に用いられているメンバーシップ関数のスケーリングは一回のチューニングで制御規則の各ファジィ変数のスケールの最大で１割がチューニングされるように本実験では設定されている。したがって、出力波形がＡタイプ波形と分類されるまで数回のチューニング操作が行われる。

図５－（ｄ）は最終の制御規則が増設されたときのファジィ制御器を用いて電力系統を制御したときのΔＦの応答を示している。この図からわかるように、出力波形はチューニング操作を行わなくても振動的ではあるが目標値に収束している。

図５－（ｅ）は最終の制御規則が増設された後、チューニング操作が修了したときのΔＦの応答を示している。この応答はかなりよい結果を示している。

４．まとめ

ニューラルネットワークを用いてファジィ制御器を自己組織化的に構成するシステムを構成した。本システムでは誤差逆伝播学習型ニューラルネットワークを二つ用い、一つはシステム全体を大きくみる頭脳として活用し、他の一つは制御対象の動特性に対する知識として働かせた。ニューラルネットワーク１に波形を学習させるときに初等的知識は必要となるが、それ以外に高度な専門的知識や熟練者の経験を必要とすることなくファジィ制御器を自動的に構成できることを示した。さらに、本システムはチューニング機構をその内部に備えており、構成された制御器を適切に働かせるように設計されている。また、本稿で提案したシステムの応用例として、電力系統の周波数制御を行い、その結果を示した。

参考文献

1) 菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社（1988）
2) R.P. Lippmann : An Introduction to Computing with Neural Nets, IEEE ASSP MAGAZINE, 4/22 (1987)
3) 麻生英樹：ニューラルネットワーク情報処理，産業図書（1988）
4) 水谷、後藤：発電電力の増加率制限を考慮した地域分割形負荷周波数制御，電気学会論文誌，105-B-4，399/405（1985）
5) 高木、中西、栄原、後藤：ニューラルネットワークを用いた自己組織化的ファジィ制御器の構成，計測自動制御学会論文集掲載予定

［問い合わせ先］
〒259-12 神奈川県平塚市北金目１１１７
東海大学 工学部 電気工学科
中西 祥八郎
TEL.0463-58-1211 EXT.4025
FAX.0463-58-1812

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

TB1-1 ファジィ測度に基づく多重様相意味論の一構成

A Formulation of the Semantics of Multimodal Logic Based on Fuzzy Measures

村井哲也[1)]　宮腰政明[2)]　新保　勝[2)]

Tetsuya MURAI[1)], Masaaki MIYAKOSHI[2)], and Masaru SHIMBO[2)]

1）札幌医科大学衛生短期大学部
School of Allied Health Professions, Sapporo Medical College
2）北海道大学 工学部
Faculty of Engineering, Hokkaido University

要旨　様相論理のクリプキ・モデルにファジィ測度による様相を導入し，多重様相論理の意味論を構成する．この枠組の中でファジィ測度による様相の性質を考察する．特に，ファジィ測度が単純性なる性質を持つとき通常の様相と一致することを示す．特別なファジィ測度として，確率測度およびDempster-Shaferの測度を取り上げる．前者の場合は分配公理は満たすが，必然公理が成り立たず，義務論理に対応する．また，後者の場合は分配公理に加え相互定義可能性さえ満たさない一方，測度の双対性が様相演算子に自然に移り，双対な二重様相が得られることを示す．

1．まえがき

様相論理体系は数多くの提案があり，通常それぞれ必然性，可能性を表現する様相演算子□，◇は体系によって義務，許容を意味するなど，解釈の多様性がある[1,2]．S.A.クリプキは可能世界意味論を展開し，様相命題の真理値は各世界から到達可能な世界の集合に依存するとした．ここでは到達可能世界を定める世界間の二項関係が重要な役割を果たし，その関係を制約する条件によって多様な様相論理体系に対応するモデルを得る．

可能世界意味論ではすべての到達可能な世界で命題Pが真であれば□Pは真である．到達可能世界な集合を全体集合とするとき，□Pが真であるためには命題Pが成り立つ世界がなす部分集合は全体に一致することが必要十分である．ここで，到達可能集合のべき集合上に確率測度，あるいは一般にファジィ測度[3]を一つ定めると，□Pが真ならばPが成り立つ世界の集合の測度は1になる．

本稿ではこの点に着目し，逆に命題Pが成り立つ世界の集合のファジィ測度を出発点にして新たに様相命題の真理値を定めることを提案する．すなわち，ファジィ測度が1のとき□Pは真とし，ファジィ測度が0のとき～◇Pは真（従って，測度＞0のとき◇Pが真）と定義する．この結果，通常の様相とファジィ測度による様相が同時に定義でき，多重様相が得られる．

ファジィ測度は提案した菅野自身が「およそ測度と呼べるぎりぎりのところ」[3]と述べるように，一般的な測度概念であり，確率測度，Dempster-Shaferの測度，分解可能測度などを特別な場合として包含する[4,5]．本稿ではまず，様相論理の基本的な性質を満たす条件を調べ，次に特殊なファジィ測度として確率測度とDempster-Shaferの測度を選び，それらによって定義される様相の性質を論じる．

以下では，対象言語の論理記号として，既出の□，◇に加え，次の記号を使用する：否定(～)，連言(∧)，選言(∨)，含意(→)，同値(↔)，全称(∀)，存在(∃)．尚，メタ言語では記述の簡略化のため，含意(⇒),同値(⇔)に加えて対象言語と同じ論理記号を使用する場合がある．

2．基本的考え方

2.1 準備

本節では可能世界意味論のクリプキ・モデルにおける様相命題の定義を述べ，標準的な様相論理体系の公理等との対応を略述する[1,2]．

可能世界意味論では，様相命題の各世界における真理値を定めるために，クリプキ・モデル

$$M=<W,R,v>$$

を導入する．ここで

$W(\neq\phi)$：集合，
$R(\subseteq W\times W)$：二項関係，
v：付値

である．Wの要素を(可能)世界と呼び，二項関係Rは各世界から到達可能な世界を定める（wからw'に到達可能なときwRw'と書く）．vは各世界における命題の真(1),偽(0)を与える．特に，様相命題の真偽は次の定義による．

【定義1】[1,2]

（1）$v(\Box P,w)=1$
$\Leftrightarrow \forall w'\in W\ (wRw'\rightarrow v(P,w')=1)$，

（2）$v(\Diamond P,w)=1$
$\Leftrightarrow \exists w'\in W\ (wRw'\wedge v(P,w')=1)$．■

命題Pが真である世界の集合をW_P，世界wから到達可能な世界の集合をW_wをする：

$W_P=\{w\mid v(P,w)=1\}$,
$W_w=\{w'\mid wRw'\}$.

この記号により定義1を書き換えて命題1を得る．

【命題1】

（1）$v(\Box P,w)=1 \Leftrightarrow W_P\cap W_w=W_w$,

（2）$v(\Diamond P,w)=1 \Leftrightarrow W_P\cap W_w\neq\phi$．■

標準的な様相論理体系を構成する公理等の中で，本稿で問題にするのは次である：

A0：$\Box P \leftrightarrow \sim\Diamond\sim P$（相互定義可能性）
$(\Diamond P \leftrightarrow \sim\Box\sim P)$
A1：$\Box(P\rightarrow Q)\rightarrow(\Box P\rightarrow\Box Q)$（分配公理）
A2：$\Box P\rightarrow\Diamond P$
A3a：$\Box P\rightarrow P$（必然公理）
A3b：$P\rightarrow\Diamond P$

このうち，相互定義可能性は標準的な様相論理では公理でなく定義である．これを認めるとA3aとA3bは同値となり，そのときA2が導ける．各公理と標準的な様相論理の対応は次の通りである：

体系K：A1
〃 D：A1∧A2
〃 T：A1∧A3a

各体系間には

K − D − T

という関係があり，より左にある体系の定理はより右の体系でも成り立つ．この意味で右にある体系ほど上位であるという．各公理とクリプキ・モデルにおけるRの制約条件との対応を記す：

A1：条件なし
A2：連鎖律 $\forall w\in W,\exists w'\in W,\ wRw'$
A3a：反射律 $\forall w\in W,\ wRw$

クリプキ・モデルは少なくとも体系Kのモデルである．

2.2 基本的考え方

以下ではクリプキ・モデル$M=<W,R,v>$を任意に一つ固定する．その上で各世界wの到達可能世界の集合W_wにファジィ測度を与え，通常の様相に加え，新たな様相を定義し，多重様相論理[2]を構成する．

ファジィ測度を導入するためには$W_w\neq\phi$でなければならない．

$U=\{w\mid W_w\neq\phi\}$，$V=W-U$

とおくとき，Uの元wについてのみファジィ測度

$m_w:\mathfrak{P}(W_w)\rightarrow[0,1]$

が導入できる．ここで，$\mathfrak{P}(W_w)$はW_wのべき集合である．混乱のない限りmの添字を省略する．

まえがきで説明した趣旨から次の定義をおく：

【定義2】$w\in U$に対し
(1) $v(\Box_m P,w)=1 \Leftrightarrow m(W_P\cap W_w)=1$，
(2) $v(\Diamond_m P,w)=1 \Leftrightarrow m(W_P\cap W_w)>0$．■

ファジィ測度で定義した様相であることを示すため様相演算子に添字mを付した．Uに属する世界wでは，A2は定義2から明らかに真である：

【命題2】
$w\in U \Rightarrow v(\Box_m P\rightarrow\Diamond_m P,w)=1$．■

【注】Vの元wに対しては通常の定義を踏襲する：
$v(\Box_m P,w)=v(\Box P,w)$（＝1），
$v(\Diamond_m P,w)=v(\Diamond P,w)$（＝0）．
Vに属する世界では連鎖性が成立せず，A2は偽である．しかし，分配公理A1は明らかに真である．■

以下，定義1による通常の様相を基本様相，定義2の様相をm様相と呼ぶ．

3．公理成立のための条件

本章では2.1のA0～A3a,A3bが成立する条件を調べる．成立に関与するファジィ測度の性質として次の二定義をおく．

【定義3】
(1) m：全体単純 $\Leftrightarrow \forall A\subseteq W_w\ (m(A)=1\rightarrow A=W_w)$，
(2) m：空単純 $\Leftrightarrow \forall A\subseteq W_w\ (m(A)=0\rightarrow A=\phi)$，
(3) m：単純 $\Leftrightarrow$ m：全体単純∧空単純．■

【定義4】[5]
m：自己双対 $\Leftrightarrow \forall A\subseteq W_w,\ m(A)+m(A^c)=1$．■

まず，m様相が基本様相と一致する条件を述べる（この場合は新たな様相の導入にならない）．

【定理1】
(1) m：全体単純 $\Leftrightarrow \Box_m P\leftrightarrow\Box P$，
(2) m：空単純 $\Leftrightarrow \Diamond_m P\leftrightarrow\Diamond P$，
(3) m：単純 $\Leftrightarrow$ m様相：基本様相と一致．

[証明] (1),(2)それぞれ
$m(W_P\cap W_w)=1 \Leftrightarrow W_P\cap W_w=W_w$
$m(W_P\cap W_w)>0 \Leftrightarrow W_P\cap W_w\neq\phi$
であるから，命題1，定義2より成り立つ．
(3) (1),(2)から明らかである．■

一般にファジィ測度mは単純でないので，m様相と基本様相の間には次の含意関係のみ成立する：

【定理2】
(1) $\Box P\rightarrow\Box_m P$，
(2) $\Diamond_m P\rightarrow\Diamond P$．

[証明] それぞれ
$W_P\cap W_w=W_w \Rightarrow m(W_P\cap W_w)=1$
$m(W_P\cap W_w)>0 \Rightarrow W_P\cap W_w\neq\phi$
による．■

次に，相互定義可能性A0，分配公理A1の条件をそれぞれ定理3，4で述べる．

【定理3】
m：単純∨自己双対 $\Rightarrow$ m様相：相互定義可能．

[証明] 単純であるときは明らか．自己双対のときは
$v(\sim\Diamond_m\sim P,w)=1 \Leftrightarrow v(\Diamond_m\sim P,w)=0$
$\Leftrightarrow m(W_{\sim P}\cap W_w)=0 \Leftrightarrow m(W_P{}^c\cap W_w)=0$
$\Leftrightarrow m(W_P\cap W_w)=1 \Leftrightarrow v(\Box_m P,w)=1$
より$\Box_m P\leftrightarrow\sim\Diamond_m\sim P$がいえる．
$\Diamond_m P\leftrightarrow\sim\Box_m\sim P$も同様．■

【定理4】
m：全体単純∨自己双対 $\Rightarrow$ m様相：A1を満たす．

[証明] 全体単純のときは明らか．自己双対のとき
$v(\Box_m(P\rightarrow Q),w)=1$，$v(\Box_m P,w)=1$，
すなわち，$m(W_{P\rightarrow Q}\cap W_w)=1$，$m(W_P\cap W_w)=1$とすると

$$\begin{aligned}1&=m(W_P\cap W_w)\\&=m(((W_P\cap W_Q)\cup(W_P\cap W_Q{}^c))\cap W_w))\\&=m(W_P\cap W_Q\cap W_w)+m(W_P\cap W_Q{}^c\cap W_w)\\&=m(W_P\cap W_Q\cap W_w)+1-m(W_{P\rightarrow Q}\cap W_w)\\&\leqq m(W_Q\cap W_w)\end{aligned}$$

従って，$v(\Box_m P,w)=1$．■

A2は命題2よりUの元について成り立つ．従って，W＝Uであれば各世界にファジィ測度が定義でき，m様相はA2を満たす：

【定理5】
$W=U \Leftrightarrow$ m様相：A2を満たす．■

このとき，基礎のクリプキ・モデルMはD体系である．

最後に，A3a，A3bの条件を述べる．

【定理６】
基本様相がA3a(従って,A3b)を満たすとき,
（１）m：全体単純 ⇒ m様相：A3aを満たすが,A3bは必ずしも満たさない,
（２）m：空単純 ⇒ m様相：A3bを満たすが,A3bは必ずしも満たさない.
［証明］（１）全体単純なら$W_P \cap W_w = W_w$であり，基本様相がA3aを満たせば$w \in W_w = W_P \cap W_w \subseteq W_P$．一般に全体単純から空単純を導けず，$W_P \cap W_w \neq \phi \wedge m(W_P \cap W_w) = 0$となる場合があり，$w \in W_P \cap W_w$ならば$P \wedge \sim\Diamond P$が真となる．
（２）同様．■
基本様相が体系Ｔであっても，単純でないファジィ測度によるm様相では，自身の世界が$\Box_m P$および$\Diamond_m P$の真偽に関与しない場合があり，それぞれA3a，A3bが成立しない．

４．特別なファジィ測度に対応する様相

本章では，いくつかの特別なファジィ測度に対応する様相の性質を論じる．ここで扱うのは
（１）確率測度
（２）Dempster-Shaferの測度
(Belief functionとPlausibility)
である．

４.１ 確率測度に対応する様相

確率であることを明示するためにmの代わりにPrと記す．
【定義５】
（１）$v(\Box_{Pr}P, w) = 1 \Leftrightarrow Pr(W_P \cap W_w) = 1$
（２）$v(\Diamond_{Pr}P, w) = 1 \Leftrightarrow Pr(W_P \cap W_w) > 0$．■
定理５より一般に次の含意関係のみ成り立つ：
【命題３】
（１）$\Box P \rightarrow \Box_{Pr}P$,
（２）$\Diamond_{Pr}P \rightarrow \Diamond P$．■
しかし，Prは自己双対なので前章定理２,３より，$\Box_{Pr}$,$\Diamond_{Pr}$の相互定義は可能であり，分配公理Ａ１も満たす：
【命題４】
（１）$\Box_{Pr}P \leftrightarrow \sim\Diamond_{Pr}\sim P$,
（２）$\Diamond_{Pr}P \leftrightarrow \sim\Box_{Pr}\sim P$．■
【命題５】
$\Box_{Pr}(P \rightarrow Q) \rightarrow (\Box_{Pr}P \rightarrow \Box_{Pr}Q)$．■
Ａ２は前章定理１より成り立つので，Pr様相は少なくとも体系Ｄ(義務論理)に相当する．しかし，A3a，A3bは必ずしも成立しない．尚，自己双対性から
Pr：全体単純 ⇔ Pr：空単純
となるから次の命題が成り立つ：
【命題６】
Pr：全体単純∨空単純 ⇒ Pr様相：基本様相と一致．■

４.２ Dempster-Shaferの測度に対応する様相

Dempster-Shaferの測度は次の２つがある：
（ａ）Belief function（下界確率，Belで表す），
（ｂ）Plausibility（上界確率，Plで表す）．

４.２.１ Belief functionの場合

【定義６】
（１）$v(\Box_{Bel}P, w) = 1 \Leftrightarrow Bel(W_P \cap W_w) = 1$
（２）$v(\Diamond_{Bel}P, w) = 1 \Leftrightarrow Bel(W_P \cap W_w) > 0$．■
Bel様相も一般に基本様相とは一致せず含意関係のみ成り立つ：
【命題７】
（１）$\Box P \rightarrow \Box_{Bel}P$,
（２）$\Diamond_{Bel}P \rightarrow \Diamond P$．■
さらに
$\forall A \subseteq W_w$, $Bel(A) + Bel(A^c) \leqq 1$
より，相互定義可能性も成立せず，次の含意関係のみ成り立つ：
【命題８】
（１）$\Box_{Bel}P \rightarrow \sim\Diamond_{Bel}\sim P$,
（２）$\Diamond_{Bel}P \rightarrow \sim\Box_{Bel}\sim P$．■
Ａ１，A3a，A3bも成立しない．単純性に関して
Bel：空単純 ⇒ Bel：全体単純
であるため次の命題が成り立つ．
【命題９】
Bel：空単純 ⇒ Bel様相：基本様相と一致．■

４.２.２ Plausibility の場合

【定義７】
（１）$v(\Box_{Pl}P, w) = 1 \Leftrightarrow Pl(W_P \cap W_w) = 1$
（２）$v(\Diamond_{Pl}P, w) = 1 \Leftrightarrow Pl(W_P \cap W_w) > 0$．■
Pl様相も基本様相と含意関係にある：
【命題10】
（１）$\Box P \rightarrow \Box_{Pl}P$,
（２）$\Diamond_{Pl}P \rightarrow \Diamond P$．■
一般に
$\forall A \subseteq W_w$, $Pl(A) + Pl(A^c) \geqq 1$
となるので，相互定義可能性も成立せず，Bel様相とは逆方向の含意式が成り立つ：
【命題11】
（１）$\sim\Diamond_{Pl}\sim P \rightarrow \Box_{Pl}P$,
（２）$\sim\Box_{Pl}\sim P \rightarrow \Diamond_{Pl}P$．■
Plの場合もＡ１，A3a，A3bが成り立たない．単純性に関して
Pl：全体単純 ⇒ Pl：空単純
であるため次の性質が成り立つ:
【命題12】
Pl：全体単純 ⇒ Pl様相：基本様相と一致．■

４.３ 双対様相

前節では，Bel様相，Pl様相をそれぞれ独立に定義した．しかし，Bel,Plは互いに双対であり，一方が与えられれば他方が定義できる：
$\forall A \subseteq W_w$, $Bel(A) + Pl(A^c) = 1$．
従って，Bel様相，Pl様相も同様に一方から他方が定義でき，自然に二重様相を導出となり，基本様相とあわせ三重様相を構成する．双対性から次の命題が成り立つ：
【命題13】
（１）$\Box_{Pl}P \leftrightarrow \sim\Diamond_{Bel}\sim P$,
（２）$\Diamond_{Pl}P \leftrightarrow \sim\Box_{Bel}\sim P$.
［証明］
（１）$v(\sim\Diamond_{Bel}\sim P, w) = 1 \Leftrightarrow v(\Diamond_{Bel}\sim P, w) = 0$
$\Leftrightarrow Bel(W_{\sim P} \cap W_w) = 0 \Leftrightarrow Bel(W_P{}^c \cap W_w) = 0$
$\Leftrightarrow Pl(W_P \cap W_w) = 1 \Leftrightarrow v(\Box_{Pl}P, w) = 1$
（２）同様．■
Bel様相より弱い様相を定義するとみなせる命題８の含意式の右辺，およびPl様相より強い様相を定義するとみなせる命題

11の含意式の左辺は，実はそれぞれ双対なPl様相，Bel様相であることを命題13は示す．命題８，11を命題13で書き換えて，次を得る：

【命題14】

（１）$\Box_{Bel}P \rightarrow \Box_{Pl}P$，

（２）$\Diamond_{Bel}P \rightarrow \Diamond_{Pl}P$．■

命題14にＡ２，基本様相を加えた含意関係を次の図に示す：

$$\begin{array}{ccccc} \Box P & \rightarrow & \Box_{Bel}P & \rightarrow & \Box_{Pl}P \\ & & \downarrow & & \downarrow \\ & & \Diamond_{Bel}P & \rightarrow & \Diamond_{Pl}P \rightarrow \Diamond P \end{array}$$

一般に

$\Box_{Bel}P \rightarrow \Diamond_{Pl}P$

は成り立つが

$\Box_{Pl}P \rightarrow \Diamond_{Bel}P$

は成立せず

$\Box_{Pl}P \wedge \sim\Diamond_{Bel}P$

が真になる世界がある．さらに

$\forall A \subseteq W_W$，$Bel(A) \leqq Pr(A) \leqq Pl(A)$

を満たす確率測度Prが存在し，それぞれ様相を定義すると自然に四重様相が得られ，次の含意関係が成り立つ：

$$\begin{array}{ccccccc} \Box P & \rightarrow & \Box_{Bel}P & \rightarrow & \Box_{Pr}P & \rightarrow & \Box_{Pl}P \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ & & \Diamond_{Bel}P & \rightarrow & \Diamond_{Pr}P & \rightarrow & \Diamond_{Pl}P \rightarrow \Diamond P \end{array}$$

特に，Prが単純であれば基本様相に一致し

$$\begin{array}{ccccc} \Box_{Bel}P & \leftrightarrow & \Box P & \rightarrow & \Box_{Pl}P \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \Diamond_{Bel}P & \rightarrow & \Diamond P & \leftrightarrow & \Diamond_{Pl}P \end{array}$$

を得る．Belは必要以上に厳密に，Plはかなり大ざっぱに様相を判断する基準であると考えれば，これらの図は感情的色彩を導入した様相の関係を表すと解釈できる．Bel様相，Pl様相ではそれぞれ

$\sim\Box_{Bel}P \wedge \sim\Diamond_{Bel}\sim P$，

$\Box_{Pl}P \wedge \Diamond_{Pl}\sim P$

を真とする世界があることが特徴的であり，双対様相を通じて互いに同値である．これらを必然または可能の記号に統一して表現すれば

$\sim\Box_{Bel}P \wedge \Box_{Pl}P$，

$\Diamond_{Pl}P \wedge \sim\Diamond_{Bel}P$

となる．

５．あとがき

与えられたクリプキ・モデルに対し，ファジィ測度による様相演算子の定義を新たに導入した．基本的な公理等に関係する性質として，（１）全体単純，（２）空単純，（３）単純，（４）自己双対を挙げ対応を調べた．その結果は次の表にまとめられる（○は成立，×は不成立，△は基本様相に依存することを示す）．

	Ａ０	Ａ１	Ａ２	A3a	A3b
全体単純測度	×	○	○	△	×
空単純測度	×	×	○	×	△
単純測度	○	○	○	△	△
自己双対測度	○	○	○	×	×

また，特別なファジィ測度として確率測度およびDempster-Shaferの測度（Belief functionおよびPlausibility）を取り上げ前述の性質を考慮しながら対応する様相を調べた．その結果が次の表である（○，×は前表と同様）．

	Ａ０	Ａ１	Ａ２	A3a	A3b
確率測度	○	○	○	×	×
Belief function	×	×	○	×	×
Plausibility	×	×	○	×	×

ファジィ測度による様相は単純性を持つならば基本様相と一致すし，そうでなければ比較的下位の様相論理体系に対応する．確率測度から拡張するにつれ，相互定義可能性Ａ０の破綻，分配公理Ａ１の不成立など標準的な様相論理から逸脱することがわかる．特別なファジィ測度の族は他にも多数あり［５］，それぞれいかなる性質を持つか引き続き検討中である．

本稿で論じた多重様相は人間の感情を考慮した判断モデルへの応用が考えられる．通常は基本様相と一致する単純なファジィ測度で様相命題を判断するため論理的でありながら，何らかの状況下（感情的なものの影響など）では単純でないファジィ測度で判断するため論理性が弱くなるというモデルが構成できる．これは確率測度およびDempster-Shaferの測度などでは基本確率の割当てを変えることで実現可能である．例えば，感情の影響で必然公理が破綻し，

$\sim(\Box P \rightarrow P)$，すなわち，$\Box P \wedge \sim P$

が真となるため，現実には偽であるのに（盲目的に）必然であると判断するという状況を形式的に扱える．

また，本稿ではクリプキ・モデル，特に到達可能関係を基礎にファジィ測度の定義域を定めた．単純なファジィ測度が基本様相に一致することからわかるように，到達可能関係を仮定せず，可能世界の集合，および各世界に与えられたファジィ測度の集合（単純測度を含む），様相を含まない命題の付値から出発して多重様相の議論を展開することもできる．

以上三点に関し稿を改めて論じる予定である．

尚，本研究の一部は平成元年度文部省科学研究費（奨励研究（Ａ）01780059）および平成二年度文部省科学研究費（重点領域研究（１）02255010）の援助を受けて行ったものである．

参　考　文　献

［１］G.E.ﾋｭｰｽﾞ，M.J.ｸﾚｽｳｪﾙ，様相論理入門．恒星社厚生閣，1981．

［２］米崎直樹，様相論理．情報処理，Vol.30，No.6，pp.641-650(1989)．

［３］菅野道夫，あいまい理論［Ⅳ］．計測と制御，Vol.22，No.6，pp.554-559(1983)．

［４］G.Banon，Distinction between Several Subsets of Fuzzy Measures．Fuzzy Sets and Systems，Vol.5，pp.291-305(1981)．

［５］M.T.Lamata，S.Moral，Classification of Fuzzy Measures．Fuzzy Sets and Systems，Vol.33，pp.243-253(1989)．

問い合わせ先：０６０札幌市中央区南３条西17丁目
札幌医科大学衛生短期大学部
村井哲也
TEL 011-611-2111，内線2836

TB1-2

ファジィ論理プログラムの線形導出

Linear Resolution for Fuzzy Logic Program

菊池 浩明 †　　向殿 政男 ‡
Hiroaki KIKUCHI　　Masao MUKAIDONO

†(株) 富士通研究所
Fujitsu Laboratories LTD.
‡明治大学 理工学部
Meiji university , School of Science and Technology

Abstract: Fuzzy Prolog is the system based on the theoretical foundation of Fuzzy Logic Programming, for the purpose of treating with uncertain knowledge. In this paper , introducing two concepts ; Fuzzy Definite clauses which represent uncertain assertions and a logical consequence which characterizes an approximately inference, the SLD-resolution for a fuzzy logic program is defined. The main result concern the soundness and completeness of SLD-resolution.

1. はじめに

Prologは，一階述語論理に基づいた論理型言語である．この2値の述語論理をファジィ論理に拡張することで，人のようなあいまいな推論を行なうプログラミング言語を構築しようという試みが，**Fuzzy Prolog研究**である．実際に，これまでにいくつかのFuzzy Prologシステムが試作されている．しかしながら，それぞれで採られている推論形式はさまざまで，いまだに統一的なものは確立していない．これには，次の問題が起因している．

前提　$/B'/ = 0.8$
規則　$/A \leftarrow B/ = 0.6$
結論　$/A'/ = ?$

ここで，$/A/, /B/$ 等は，命題でも述語でもかまわないが，$[0,1]$ の値をとる変数とする．前提と規則に上のように真理値が割り当てられた時，結論の真理値 $/A'/$ についてどんな値が定まるであろうか？

ここで重要となるのが，含意 $(\leftarrow)$ の定義である．良く知られた2値論理での定義;

$$/A \leftarrow B/ = \neg/B/ \vee /A/ = \max(1 - /B/, /A/)$$

には，前提の真理値が0.5未満になった時に，(1) 推論結果の真理値が，前提のそれよりも常に大きくなることが保証されない，(2) 通常のPrologで取り扱うホーン集合の範囲を越えてしまう，といった問題を生じることが指摘されている．そこで，いくつかのシステムでは，

- 真理値を0.5以上に制限する．(Prolog-ELF) [1]
- 推論結果に矛盾の度合を加える．(沈, 丁) [2]

といった対策をとったり，含意の定義には触れずに，

- 前提は**真である主張の集合** であり，真理値は各々の集合への所属度とする．(FPROLOG) [3]
- 可能性理論に基づき，前提は可能性分布を表すものと考える．(FS-Prolog) [4]

と別の立場からの意味を与たりしている．

そこで，我々は，より自然な含意の定義として，いわゆる，直観主義的含意の定義を導入する．これにより、論理プログラミングの立場からの厳密な拡張をおこない，論理型言語Fuzzy Prologに明確な数学的基礎を与える。

本稿では，はじめに通常の論理プログラムについて触れ，それをファジィ論理プログラムに拡張することで，あいまいな知識を表現する．そして，ファジィ論理プログラムの論理的帰結を定め，推論結果を特徴付ける．次に，論理的帰結のいくつかの性質を明らかにしたうえで，それらを機械的に，効率よく求めるための，SLD-導出と呼ばれる推論戦略を導入する．SLD-導出によって計算されるすべての推論結果は正しく(**健全性**)，かつすべての正しい推論結果はSLD-導出によって計算される(**完全性**)．この2つの性質を保証することが，ファジィ推論におけるSLD-導出の有用性である．さらに，推論結果としてもっともふさわしい値を自動的に計算するために，これを，度合を持った導出へと拡張する．

2. 論理プログラム

論理プログラミング [5] とは，自動定理証明の立場から，論理によってアルゴリズムを実現しようとする試みである．はじめに，論理プログラムのいくつかの基本的な概念を定義する．

2.1 確定節 (definite clause)

定義 $A, B_1, \ldots, B_n$ を原子式とする．**プログラム節**とは，論理式 $\forall A \leftarrow B_1, \ldots, B_n$ であり，A は頭部，$B_1, \ldots, B_n$ は本体と呼ばれる．特に，$n = 0$ で，頭部のみから成るプログラム節 $A \leftarrow$ を**単位節**という．プログラム節の有限集合を**論理プログラム**という．**ゴール節**とは，$\leftarrow B_1, \ldots, B_n$ という形の節である．特に，本体を持たない，すなわち，定数0であるようなゴール節を空節と言い，ϕ で表す．プログラム節と単位節とゴール節を**確定節**と呼ぶ．

確定節			
	プログラム節	$A \leftarrow B_1, \ldots, B_n$	論理プログラム
	単位節	$A \leftarrow$	(公理)
	ゴール節	$\leftarrow B_1, \ldots, B_n$	(定理)

定理証明の観点から言えば，論理プログラムはある数学理論の公理であり，全ての節は恒真であると仮定されている．しかし，我々のあいまいな知識を表現するには，恒真式ばかりでは不十分である．

定義 $(A \leftarrow B_1, \ldots, B_n)$ を確定節とし，λ を閉区間 [0,1] の値とする．**ファジィ確定節**とは，

$$(A \leftarrow B_1, \ldots, B_n) \leftarrow \lambda$$

の形をした論理式である．以後，単に節と呼ぶ．ここで，λ はそのファジィ確定節の**必然性真理値**という．

λ は定数であって，解釈に依存しないことに注意が必要である．$\lambda = 0$ であるようなファジィ確定節は，任意の解釈について恒真となり，無意味な定理である．一方，$\lambda = 1$ である時は，通常の確定節に等しい．

2.2 解釈 (interpretation)

論理式に真偽を与える，すなわち，意味を与えることを解釈するという．

定義 I を解釈，A を変数割当とする．ファジィ論理における，I と A についての論理式 α の真理値 $/\alpha/$ とは，次のようにして定まる [0,1] の値である．

1) 原子式 $p(t_1, \ldots, t_n)$ について，
I と A に基づいた項割当をおこなった基礎原子式 $p'(t'_1, \ldots, t'_n)$ を [0,1] のある値に対応させる．

2) 論理式 α, β について，

$$/\neg\alpha/ = \neg/\alpha/ = 1 - /\alpha/$$
$$/\alpha \vee \beta/ = \max(/\alpha/, /\beta/)$$
$$/\alpha \wedge \beta/ = \min(/\alpha/, /\beta/)$$
$$/\alpha \leftarrow \beta/ = \begin{cases} 1, & \text{if } /\alpha/ \geq /\beta/; \\ /\beta/, & \text{otherwise} \end{cases}$$

すべての変数が束縛されている閉論理式のみを考えるときは，論理式の真理値は変数割当に依存しない．従って，以後は解釈 I をエルブラン領域の上のファジィ集合で与える．

2.3 論理的帰結 (logical consequence)

論理的に正しく導かれる式を次のように特徴付ける．

定義 S を節集合 $\{C_1, \ldots, C_n\}$ とする．ある解釈 I において，

$$/S/ = /C_1 \wedge \cdots \wedge C_n/ = 1$$

である時，I は S を**充足**するといい，S は**充足可能**である，という．また，その様な解釈が存在しないとき，S は**充足不能**という．

定義 S を節集合とし，α を閉論理式とする．全ての解釈 I について，I が S を充足するならば α も充足する時，α は S の**論理的帰結**であるといい，$S \models \alpha$ で表す．

(例) 節集合 $S = \{q \leftarrow 0.7, (p \leftarrow q) \leftarrow 0.8\}$ に対して，節 $G = p \leftarrow 0.7$ は論理的帰結である．すなわち，$S \models G$．一方，節 $G' = p \leftarrow 0.8$ は論理的帰結ではない．なぜならば，解釈 $I = \{/p/ = 0.7, /q/ = 0.7\}$ は，S を充足するが，G' は充足しない．

論理的帰結を導く命題を示す．ただしここで，$p(x), p, q$ を原子式，λ, τ を必然性真理値とする．

命題 1 (substitution)

$$\{\forall x p(x) \leftarrow \lambda\} \models p(a) \leftarrow \lambda$$

命題 2 (modus ponens)

$$\{(p \leftarrow q) \leftarrow \lambda, q \leftarrow \tau\} \models p \leftarrow \min(\lambda, \tau)$$

命題 3 (syllogism)

$$\{(p \leftarrow q) \leftarrow \lambda, (q \leftarrow r) \leftarrow \tau\} \models (p \leftarrow r) \leftarrow \min(\lambda, \tau)$$

命題 4 (結合)

$$\{p \leftarrow \lambda, q \leftarrow \tau\} \models (p \wedge q) \leftarrow \min(\lambda, \tau)$$

命題 5 (分配)

$$\{p \wedge q \leftarrow \lambda\} \models p \leftarrow \lambda$$
$$\{p \wedge q \leftarrow \lambda\} \models q \leftarrow \lambda$$

命題 6 (単調) $\lambda \geq \tau$ である時，

$$\{p \leftarrow \lambda\} \models p \leftarrow \tau$$

3. SLD-導出

節集合 S の論理的帰結は，上述の命題1～6を適切に用いることで導かれる．SLD-導出とは，確定節の選択関数による線形導出を意味する証明手続きであり，論理的帰結を導く過程を効率よく機械的に行なう．

手続きの大まかな流れは，証明する論理式の否定（ゴール節）をとり，この式と節集合から次々に論理的帰結（導出形）を導いていき，最終的に矛盾を導く（反駁）ことで基の式が節集合の論理的帰結であることを証明する，というものである．

定義 論理式 $(A_1,\ldots,A_n) \leftarrow \lambda$ **に対応するゴール節**とは，次のかたちをした論理式である．

$$(\leftarrow A_1,\ldots,A_n) \leftarrow \lambda$$

3.1 導出形 (resolvent)

節集合 S から入力節 C を選び，次の論理式を定める．

定義 ゴール節を $G = (\leftarrow A_1,\ldots,A_n) \leftarrow \lambda$ ，入力節を $C = (A \leftarrow B_1,\ldots,B_m) \leftarrow \tau$ とする．この時，A_1 と A の最汎単一化子 θ，すなわち，$A_1\theta = A\theta$ となる代入 θ があり，$\tau \geq \lambda$ である時，論理式 $R(G,C)$

$$R(G,C) = (\leftarrow (B_1,\ldots,B_m,A_2,\ldots,A_n))\theta \leftarrow \lambda$$

を，リテラル A を**キーワードとするゴール節** G **の入力節** C **に対する導出形**という．

次の定理は，導出形が意味のある推論となっていることを示している．

定理1 ゴール節 G の入力節 C に対する導出形 $R(G,C)$ は，節集合 $\{G,C\}$ の論理的帰結である．

3.2 反駁 (refutation)

効率的な証明のために，ゴール節との導出形から，その次の導出形を線形に導いていく．

定義 節 G の節集合 $S = \{C_1,\ldots,C_n\}$ **に対する導出集合** $R(G,S)$ とは，G と導出可能な S の全ての節についての導出形である．

$$R(G,S) = \{R(G,C) | C \in S\}$$

節 G と節集合 $S = \{C_1,\ldots,C_n\}$ からの **n次導出集合** $R^n(G,S)$ とは，次式で定められる節集合である．

$$R^0(G,S) = S,$$
$$R^n(G,S) = \bigcup_i R(R^{n-1}(G,S),C_i) \cup R^{n-1}(G,S)$$

定義 ゴール節 G の節集合 S に対する n 次導出集合 $R^n(G,S)$ に，空節 $(\phi \leftarrow \lambda)$ が含まれるとき，その時に限り，S に G から**反駁**があるといい，n を**反駁の長さ**という．

定義 論理式 α に対応するゴール節から節集合 S に反駁がある時，及びその時に限り，α は**証明を持つ**といい，$S \vdash \alpha$ とかく．

こうして，ファジィ確定節における SLD-導出の反駁法による証明手続きが示された．

(例) 節集合 S，ゴール節 G_1 をそれぞれ

$$S = \left\{ \begin{array}{l} p(a) \leftarrow 0.5, p(b) \leftarrow 0.6, p(c) \leftarrow 1.0, \\ (q(x) \leftarrow p(x)) \leftarrow 0.8, \\ (r(x) \leftarrow q(x)) \leftarrow 0.9 \end{array} \right\}$$
$$G_1 = (\leftarrow r(x)) \leftarrow 0.6$$

とする．節 G_1 から S へ次の導出集合が得られる．

$$R^1 = S \cup \{(\leftarrow q(x)) \leftarrow 0.6\}$$
$$R^2 = R^1 \cup \{(\leftarrow p(x)) \leftarrow 0.6\}$$
$$R^3 = R^2 \cup \{\phi\{x := b\} \leftarrow 0.6, \phi\{x := c\} \leftarrow 0.6\}$$
$$R^4 = R^5 = \cdots = R^3$$

以上より，節 $r(b) \leftarrow 0.6$ と節 $r(c) \leftarrow 0.6$ が，S の論理的帰結であることが導かれた．

3.3 健全性, 完全性 (soundness, completeness)

健全性とは，論理式 α がその証明手続きで導かれたならば必ず意味のある推論結果，すなわち，節集合 S の論理的帰結になっていることを保証する性質であり，

$$S \vdash \alpha \Rightarrow S \models \alpha$$

完全性はその逆，すなわち，S のすべての論理的帰結について，SLD-導出による証明があることを示す．

$$S \vdash \alpha \Leftarrow S \models \alpha$$

補題1 ゴール節を $G = (\leftarrow A) \leftarrow \lambda$ ，節集合 S のある節を $C = A_1 \leftarrow \tau$ とする．導出形 $R(G,C)$ が，S に対して反駁があるならば，論理式 $\forall A\theta \leftarrow \lambda$ は，節集合 S の論理的帰結である．

補題2

$$\left\{ \begin{array}{l} (A \leftarrow X) \leftarrow \lambda \\ (X \wedge B) \leftarrow \lambda \end{array} \right\} \models (A \wedge B) \leftarrow \lambda$$

定理2 (SLD-導出の健全性) ゴール節 $G = (\leftarrow A_1,\ldots,A_n) \leftarrow \lambda$ から節集合 S に反駁があるならば，反駁に用いられた全ての単一化子の合成を θ とすると，節 $\forall(A_1,\ldots,A_n)\theta \leftarrow \lambda$ は S の論理的帰結である．

補題 3　節 $A \leftarrow \lambda$ が節集合 S の論理的帰結であるならば，S に A と単一化可能な A' を頭部に持った節が存在する．

補題 4　節 $A \leftarrow \lambda$ が節集合 S の論理的帰結とする．S にある節 $(A \leftarrow B_1, \ldots, B_n) \leftarrow \tau$ が存在して，$\lambda \geq \tau$ ならば，$B_1, \ldots, B_n \leftarrow \lambda$ も S の論理的帰結である．

定理 3 (SLD-導出の完全性)　節 $\forall(A_1, \ldots, A_n)\theta \leftarrow \lambda$ が節集合 S の論理的帰結ならば，対応するゴール節 $G = (\leftarrow A_1, \ldots, A_n) \leftarrow \lambda$ から S に反駁がある．

4. 度合を持つ導出形

ここでは，ある2値の論理式が，ファジィ論理プログラムのもとでいったいどのくらいの確からしさ（必然性真理値）を持つかを求めるSLD-導出の拡張について述べる．まず，2値の論理式 $A_1 \wedge \cdots \wedge A_n$ について，ゴール節をその最も厳密な否定で，$(\leftarrow A_1, \ldots, A_n) \leftarrow 1$ と定める．

定義　ゴール節を $G = (\leftarrow A_1, \ldots, A_n) \leftarrow \lambda$，入力節を $C = (A \leftarrow B_1, \ldots, B_m) \leftarrow \tau$ とする．この時，$A_1\theta = A\theta$ となる代入 θ があるとき，論理式

$$RD(G, C) = (\leftarrow (B_1, \ldots, B_m, A_2, \ldots, A_n))\theta \leftarrow \min(\lambda, \tau)$$

を，ゴール節 G の入力節 C に対する**度合を持つ導出形**という．

度合を持つ導出形も，意味のある推論である．

定理 4　ゴール節 G と入力節 C に対する導出形 $RD(G, C)$ は，節集合 $\{G, C\}$ の論理的帰結である．

定義　節 G と節集合 $S = C_1, \ldots, C_n$ からのn次導出集合 $RD^n(G, S)$ とは，次式で定められる節集合である．

$$RD^0(G, S) = S,$$
$$RD^n(G, S) = \bigcup_i RD(RD^{n-1}(G, S), C_i) \cup RD^{n-1}(G, S)$$

定義　ゴール節 G の節集合 S に対するn次導出集合 $RD^n(G, S)$ に，空節 $(\phi \leftarrow \tau)$ が含まれるとき，S に G から τ の反駁があるといい，τ を**反駁の度合**という．

ゴール節Gが節集合Sに度合 τ で反駁するとき，論理式 $(A_1, \ldots, A_n) \leftarrow \tau$ は，S の論理的帰結である．すなわち，この値 τ こそが我々が求めようとしている論理式の必然性真理値に他ならない．この度合を持つ導出の健全性は，定理3と同様に示される．

定理 5　(度合を持つ導出の健全性)　ゴール節 $(\leftarrow A_1, \ldots, A_n) \leftarrow \lambda$ から節集合 S に度合 τ で反駁がある時，節 $\forall(A_1, \ldots, A_n)\theta \leftarrow \tau$ は S の論理的帰結である．

（例）前節の例の節集合 S について，論理式 $r(a)$ の持ち得る必然性真理値を求めよう．$r(a)$ には，ゴール節 $G = (\leftarrow r(a)) \leftarrow 1$ が対応し，G より節集合 S に対するn次導出集合は次のようになる．

$$RD^1 = S \cup \{(\leftarrow q(a)) \leftarrow \min(1, 0.9)\}$$
$$RD^2 = RD^1 \cup \{(\leftarrow p(a)) \leftarrow \min(0.9, 0.8)\}$$
$$RD^3 = RD^2 \cup \{\phi \leftarrow \min(0.8, 0.5)\}$$
$$RD^4 = RD^5 = \cdots = RD^3$$

こうして，$r(a)$ について，最大0.5の度合で反駁し，$S \models r(a) \leftarrow 0.5$ が証明された．

5. おわりに

L.A.Zadeh が Third IFSA で Fuzzy Prolog についての要請をしている．“単純で直感的な推論形式こそ，大きなシステムを構築するための核言語にふさわしい”，と．我々は，明確な数学的基礎を求めようとして，やはりこのような単純な推論形式に落ち着いた．冒頭に挙げた問題も，ファジィ論理プログラミングにおいて考えると，次のような単純な形に形式化できる．

前提	$B' \leftarrow 0.8$	$\in S$
規則	$(A \leftarrow B) \leftarrow 0.6$	$\in S$
結論	$(\leftarrow A') \leftarrow 1$	$= G$

解は，度合をもつ反駁を求めれば明らかである．

参考文献

[1] 金井，石塚：Prolog-ELF: ファジィ論理を組み込んだProlog, 情報処理, Vol.27 No.4, pp.411 - 415 (1986).

[2] Z.shen,L.Ding and M.Mukaidono: Fuzzy Resolution Principle, Proc. of 18th International Symposium on Multiple-valued Logic, 5(1989)

[3] T.P.Matin,J.F.Baldwin and B.W.Pilsorth: The Implementation of FPROLOG - A Fuzzy Prolog Interpreter, Fuzzy Sets and Systems 23, pp.119 - 129(1987)

[4] 馬野：ファジィ集合の概念を用いたFS-Prologについて，電子通信情報学会技術研究報告書，Vol.88, No.345, pp.87-95, COMP86-81(1987)

[5] L.W.Lloyd:Foundations of Logic Programming, Springer-Verlag, second edition (1987)

問い合わせ先

〒 243-01 厚木市森の里若宮 10-1
富士通厚木研究所 情報システムセンタ 技術部
菊池 浩明 E-mail: kikn@flab.fujitsu.co.jp
Tel: (0462)48-3111(代表), Fax: (0462)48-3233

TB1-3

古典述語論理計算ＬＫの拡張とそのファジィシステムへの応用

Extension of Classical Predicate Logic Calculus LK and Its Application to Fuzzy Systems

和泉孔二
Koji Izumi

阪南大学商学部
Faculty of Commerce, Hannan University

Abstract: This paper formulates an extended classical predicate logic calculus, which corresponds to the four arithmetic operations of sets. The intuitionistic and dually intuitionistic logic calculi are induced from the above one, indicating applicability to the inverse and identification problems of fuzzy systems.

1．まえがき

最近の情報科学の分野において広く知られているLISPとPROLOGは，それぞれ帰納的関数と述語論理[1]といった数学基礎論の概念と対応していることは周知の事実である．また，様相論理[2]から派生した時制論理がプログラム理論の基礎づけに有効であることもよく知られている．このように，数学基礎論と情報科学との関連性は今後ますます深くなっていくものと考えられる．

本論文では，まず集合の四則演算を随伴性および双対性という概念のもとで定式化している．この際，商集合演算を提案することにより，調和のとれた集合演算どうしの関係を構築している．次に，これらの四則演算を古典述語論理計算LKの論理記号に対応させることを試み，商集合演算は含意→に相当しているので，商集合演算に双対な差集合演算に相当する論理記号である双対含意←とそれから導ける双対否定∽とをLKに付加することを提案している．

また，本論文では，以上のように拡張した古典述語論理計算LKにおける定義を制限することによって，直観主義述語論理計算LJおよび双対直観主義述語論理計算DLJを定式化できることを示し，これら３つの体系LK,LJ,DLJの諸性質を導いている．なお，それぞれの体系において否定￢と双対否定∽とが同等な概念であることをも示している．

2．随伴性および双対性に基づく集合の四則演算の構成

まず，圏論[3]で取り扱われる随伴性の概念を述べよう．

［定義2.1］２つの圏$\mathcal{A}$,$\mathcal{B}$に対し，２つの関手F,Gが

$$\mathcal{A} \underset{G}{\overset{F}{\rightleftarrows}} \mathcal{B} \qquad (1)$$

であり，かつ任意の$\mathcal{A}$の対象Aと$\mathcal{B}$の対象Bとに対して

$$\mathcal{A}(F(B),A) \simeq \mathcal{B}(B,G(A)) \qquad (2)$$

となるときに，FはGの左随伴関手である，またはGはFの右随伴関手であると呼び，記号で

$$F \dashv G \qquad (3)$$

と表す．

この定義を集合の圏Setsに限定し，的を集合間の含包関係に対応させて考えると，集合論的な随伴性は次のように定義される．

［定義2.2］２つの集合A,Bに対し

$$F(B) \subseteq A \Leftrightarrow B \subseteq G(A) \qquad (4)$$

を満たす２つの集合関数F,Gが存在するとき，FをGの左随伴である，またはGはFの右随伴であると呼ぶ．

同様に，束論的な随伴性は次のように定義できる．

［定義2.3］２つの束L_1,L_2に対し

$$L_1 \underset{g}{\overset{f}{\rightleftarrows}} L_2 \qquad (5)$$

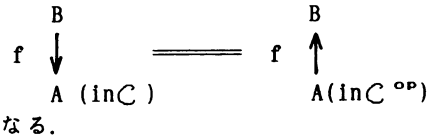
なる２つの関数f,gが

$$f(g) \leq p \Leftrightarrow q \leq g(p) \quad (\forall p \in L_1, \forall q \in L_2) \qquad (6)$$

という条件を満たすとき，fはgの左随伴である，またはgはfの右随伴であると呼ぶ．

さて，圏論で取り扱われる双対性の概念とは次のようなものである．

［定義2.4］圏$\mathcal{C}$に対し，その双対圏$\mathcal{C}^{op}$とはその対象全体の集合が$\mathcal{C}$の対象全体の集合と同じであり，$\mathcal{C}^{op}$の射全体の集合も$\mathcal{C}$の射全体の集合と同じである．ただし，$\mathcal{C}^{op}$にににおける任意の射f:A→Bの存在は，$\mathcal{C}$において射f:B→Aが存在することによって規定される．図で示せば，



となる．

［注意］この双対性の概念を順序集合で考えれば，

次のような双対の原理となる．すなわち，順序集合$(S,\leq)$で成立する命題Pに対し，Pに含まれる$\leq$をすべて$\geq$で置き換えて得られるPの双対命題P^{op}を考えるとき，Pが定理であればP^{op}もまた定理となる．

次に集合の四則演算である和集合，差集合，積集合，商集合について述べよう．本論文で取り扱う和集合，差集合，積集合については周知の通りのものであるが，商集合の概念は新しく提案するものである．

［定義2.5］ 2つの集合A,Bに対し，それらの和集合$A\cup B$は合併集合，積集合$A\cap B$は共通集合とし，差集合A-Bと商集合A/Bはそれぞれ次のように定義される．

$$A-B=A\cap B^{c} \tag{7}$$

$$A/B=(B\cap A^{c})^{c} \tag{8}$$

ただし，A^{c}はAの補集合を表している．

［注意］ 元来，商集合という用語は次のような意味で使われている．すなわち，集合Sにおける1つの同値関係Rに対し，Rの同値類の集合をSのRに関する商集合と呼び，S/Rと表している．

定義2.5より，商集合A/Bは

$$A/B=A\cup B^{c} \tag{9}$$

とも表され，また，商集合と差集合との間には

$$A/B=(B-A)^{c} \tag{10}$$

という関係があることがわかる．

さて，完備Heyting代数を一般化した完備束半群，および双対完備束半群の理論[4]によれば，差集合と商集合は以下のように定義できる．

［定義2.6］ 2つの集合A,Bに対し

$$A-B=\cap\{X \mid B\cup X\supseteq A\} \tag{11}$$

$$A/B=\cup\{X \mid B\cap X\subseteq A\} \tag{12}$$

と定義する．

この定義2.6は集合の四則演算の随伴性および双対性を明確に示している．なぜなら，式(12)により

$$A\cap X\subseteq B \Leftrightarrow X\subseteq B/A \tag{13}$$

すなわち

$$A\cap\cdot \dashv \cdot/A \tag{14}$$

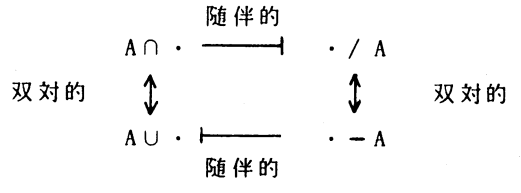
となり，また，式(11)により

$$A\cup X\supseteq B \Leftrightarrow X\supseteq B-A \tag{15}$$

すなわち

$$A\cup\cdot \vdash \cdot-A \tag{16}$$

となる．ここで，式(13)と式(15)は互いに双対な関係にもなっている．したがって，この状況は



と示される．換言すれば，和集合演算は差集合演算の右随伴であり，積集合演算は商集合演算の左随伴である．また，和集合演算と積集合演算，および差集合演算と商集合演算はそれぞれ双対な関係になっている．

3．集合の四則演算に対応させた古典述語論理計算LKの拡張

公理的集合論[5]を展開するときに，その基礎となるのはGentzenによる古典述語論理計算LK^{c}[7]である．LKとは次に述べる推論規則の与えられた論理体系のことである．

①式の構造に関する推論規則

$$\frac{\Gamma\Longrightarrow\Delta}{D,\Gamma\Longrightarrow\Delta}(w\Longrightarrow) \qquad \frac{\Delta\Longrightarrow\Gamma}{\Delta\Longrightarrow\Gamma,D}(\Longrightarrow w)$$

$$\frac{\Gamma,C,D,\Pi\Longrightarrow\Delta}{\Gamma,D,C,\Pi\Longrightarrow\Delta}(e\Longrightarrow) \qquad \frac{\Delta\Longrightarrow\Pi,D,C,\Gamma}{\Delta\Longrightarrow\Pi,C,D,\Gamma}(\Longrightarrow e)$$

$$\frac{\Gamma,C,C,\Pi\Longrightarrow\Delta}{\Gamma,C,\Pi\Longrightarrow\Delta}(c\Longrightarrow) \qquad \frac{\Delta\Longrightarrow\Pi,C,C,\Gamma}{\Delta\Longrightarrow\Pi,C,\Gamma}(\Longrightarrow c)$$

$$\frac{\Gamma\Longrightarrow\Delta,D \quad D,\Sigma\Longrightarrow\Pi}{\Gamma,\Sigma\Longrightarrow\Delta,\Pi}(\mathrm{cut})$$

ここで，wはweakening（弱化），eはexchange（交換），cはcontraction（縮約）を表す．

②論理記号に関する推論規則

$$\left.\begin{array}{l}\dfrac{A,\Gamma\Longrightarrow\Delta}{A\wedge B,\Gamma\Longrightarrow\Delta}\\[2ex]\dfrac{B,\Gamma\Longrightarrow\Delta}{A\wedge B,\Gamma\Longrightarrow\Delta}\end{array}\right\}(\wedge\Longrightarrow) \qquad \frac{\Gamma\Longrightarrow\Delta,A \quad \Gamma\Longrightarrow\Delta,B}{\Gamma\Longrightarrow\Delta,A\wedge B}(\Longrightarrow\wedge)$$

$$\frac{A,\Gamma\Longrightarrow\Delta \quad B,\Gamma\Longrightarrow\Delta}{A\vee B,\Gamma\Longrightarrow\Delta}(\vee\Longrightarrow) \qquad \left.\begin{array}{l}\dfrac{\Gamma\Longrightarrow\Delta,A}{\Gamma\Longrightarrow\Delta,A\vee B}\\[2ex]\dfrac{\Gamma\Longrightarrow\Delta,B}{\Gamma\Longrightarrow\Delta,A\vee B}\end{array}\right\}(\Longrightarrow\vee)$$

$$\frac{\Gamma\Longrightarrow\Delta,A \quad B,\Sigma\Longrightarrow\Pi}{A\to B,\Gamma,\Sigma\Longrightarrow\Delta,\Pi}(\to\Longrightarrow) \qquad \frac{A,\Gamma\Longrightarrow\Delta,B}{\Gamma\Longrightarrow\Delta,A\to B}(\Longrightarrow\to)$$

$$\frac{\Gamma\Longrightarrow\Delta,A}{\neg A,\Gamma\Longrightarrow\Delta}(\neg\Longrightarrow) \qquad \frac{A,\Delta\Longrightarrow\Gamma}{\Delta\Longrightarrow\Gamma,\neg A}(\Longrightarrow\neg)$$

$$\frac{A(t),\Gamma\Longrightarrow\Delta}{\forall xA(x),\Gamma\Longrightarrow\Delta}(\forall\Longrightarrow) \qquad \frac{\Delta\Longrightarrow\Gamma,A(a)}{\Delta\Longrightarrow\Gamma,\forall xA(x)}(\Longrightarrow\forall)$$

tは任意の項

aは下式には現れない．aをこの推論規則の固有変数という．

$$\frac{A(a),\Gamma\Longrightarrow\Gamma}{\exists xA(x),\Gamma\Longrightarrow\Delta}(\exists\Longrightarrow) \qquad \frac{\Delta\Longrightarrow\Gamma,A(t)}{\Delta\Longrightarrow\Gamma,\exists xA(x)}(\Longrightarrow\exists)$$

aは下式には現れない．aをこの推論規則の固有変数という．

tは任意の項

［注意］ 推論規則の中のA,B,C,Dは論理式であり，ギリシャ文字，Γ，Δ，Π，Σは論理式の有限列（空列も含めて）である．

さて，本論文でのLKの拡張を考えるとき，LKで証明可能な次の式は重要である．

$$\Rightarrow(A\to B)\equiv\neg(A\wedge\neg B) \tag{17}$$

ただし，$\equiv$は同値を意味する補助的な論理記号であり，論理式F_1,F_2に対し，$F_1\equiv F_2$は論理式$(F_1\to F_2)\wedge(F_2\to F_1)$を略記したものである．このとき，2章で定式化した集合の四則演算の中の商集合演算と式(17)とが同じ形をしていることに着目すると，LKの代数的モデルとなる完備Boole代数において

$$A/B=B\to A \tag{18}$$

が成立していると考えられる．また，定義2.5から明らかなように，商集合演算よりも差集合演算の方がより原始的であるといえる．したがって，本論文では，差集合演算に対応する双対含意演算$\leftarrow$を次のように定義する．すなわち，完備Boole代数において

$$A-B=A\leftarrow B \tag{19}$$

と定められる双対含意演算←をLKに付加することを提案する．このとき，論理記号←に関して，次の2つの推論規則が成立する．

$$\frac{B, \Delta \Longrightarrow \Gamma, A}{B \leftarrow A, \Delta \Longrightarrow \Gamma} (\leftarrow \Longrightarrow)$$

$$\frac{\Pi \Longrightarrow \Sigma, B \quad A, \Delta \Longrightarrow \Gamma}{\Pi, \Delta \Longrightarrow \Sigma, \Gamma, B \leftarrow A} (\Longrightarrow \leftarrow)$$

なぜなら，(←⇒)については，ΓおよびΔが空でない場合，Γのすべての論理式を∨で結合した論理式をCと考え，Δのすべての論理式∧で結合した論理式をDと考えれば

$$\cfrac{\cfrac{B, D \Longrightarrow C, A}{B \wedge D \Longrightarrow C \vee A}}{B \leftarrow A, D \Longrightarrow C}$$

より導かれる．このことは，完備Boole代数において

$$b \wedge d \leq c \vee a \tag{20}$$

から

$$a^{\circ} \wedge b \wedge d \leq c \tag{21}$$

が導かれることに対応している．ただし，a°はaの補元を表す．なお，ΓまたはΔが空のときは，恒真命題⊤，恒偽命題⊥に対し，$\bot \vee A = A$および$B \wedge \top = B$であることを用いれば明らかに推論規則(←⇒)は成立することがわかる．

次に，(⇒←)については，以下のように導ける．

$$\cfrac{\cfrac{\cfrac{\cfrac{B \leftarrow A \Longrightarrow B \leftarrow A}{B \Longrightarrow (B \leftarrow A) \vee A}}{B \Longrightarrow B \leftarrow A, A} \qquad A, \Delta \Longrightarrow \Gamma}{\cfrac{\Pi \Longrightarrow \Sigma, B \qquad B, \Delta \Longrightarrow B \leftarrow A, \Gamma}{\Pi, \Delta \Longrightarrow \Sigma, B \leftarrow A, \Gamma}}}{\Pi, \Delta \Longrightarrow \Sigma, \Gamma, B \leftarrow A}$$

さて，完備Boole代数の最小元0，最大元1にそれぞれ恒偽命題⊥，恒真命題⊤が対応していたことにより，完備Boole代数におけるA°とLKにおけるAの否定¬Aとが対応し，LKにおいて

$$\Rightarrow \neg A \equiv A \rightarrow \bot \tag{22}$$

が証明可能となる．

本論文では，式(19)で定義された双対含意演算←に基づいて双対否定演算≺を

$$\Rightarrow \prec A \equiv \top \leftarrow A \tag{23}$$

がLKで証明可能となるようなものであると定義し，論理記号≺を論理記号←とともにLKに付加することを提案する．この論理記号≺に関しては，次の2つの推論規則が成立する．

$$\frac{\Gamma \Longrightarrow \Delta, A}{\prec A, \Gamma \Longrightarrow \Delta} (\prec \Longrightarrow)$$

$$\frac{A, \Delta \Longrightarrow \Gamma}{\Delta \Longrightarrow \Gamma, \prec A} (\Longrightarrow \prec)$$

なぜなら，(≺⇒)については

$$\frac{\Gamma \Longrightarrow \Delta, A}{\top, \Gamma \Longrightarrow \Delta, A} (\leftarrow \Longrightarrow)$$
$$\top \leftarrow A, \Gamma \Longrightarrow \Delta$$

より導かれ，また，(⇒≺)については

$$\frac{\Longrightarrow \top \quad A, \Delta \Longrightarrow \Gamma}{\Delta \Longrightarrow \Gamma, \top \leftarrow A} (\Longrightarrow \leftarrow)$$

より導かれる．

LKにおいては，否定¬と双対否定≺は同等な概念である．すなわち，

$$\Rightarrow \neg A \equiv \prec A \tag{24}$$

がLKで証明可能であることが以下のように示される．

$$\cfrac{\cfrac{\cfrac{A \Longrightarrow A}{\neg A, A \Longrightarrow} (\neg \Longrightarrow)}{A, \neg A \Longrightarrow} (e \Longrightarrow)}{\neg A \Longrightarrow \prec A} (\Longrightarrow \prec) \qquad \cfrac{\cfrac{\cfrac{A \Longrightarrow A}{\Longrightarrow A, \neg A} (\Longrightarrow \neg)}{\Longrightarrow \neg A, A} (\Longrightarrow e)}{\prec A \Longrightarrow \neg A} (\prec \Longrightarrow)$$
$$\cfrac{\Longrightarrow \neg A \rightarrow \prec A}{\Longrightarrow (\neg A \rightarrow \prec A) \wedge (\prec A \rightarrow \neg A)} (\Longrightarrow \rightarrow) \qquad \cfrac{\Longrightarrow \prec A \rightarrow \neg A}{(\Longrightarrow \wedge)}$$

［注意］完備Boole代数において，¬aと≺aはそれぞれ

$$\neg a = a \rightarrow 0 = a^{\circ} \vee 0 = a^{\circ} \tag{25}$$

$$\prec a = 1 \leftarrow a = 1 \wedge a^{\circ} = a^{\circ} \tag{26}$$

と変形されるので，明らかに同等であることがわかる．しかし，後述する直観主義述語論理計算LJの代数的モデルとなる完備Heyting代数であり，かつ双対直観主義述語計算DLJの代数的モデルとなる双対完備Heyting代数でもあるL=[0,1]の場合は，LJでの否定に相当する¬aとDLJでの否定に相当する≺aは同等でない．なぜなら

$$a \rightarrow b = \vee \{x \mid a \wedge x \leq b\} = \begin{cases} 1 & (a \leq b) \\ b & (a > b) \end{cases} \tag{27}$$

$$b \leftarrow a = \wedge \{x \mid a \vee x \geq b\} = \begin{cases} 0 & (a \geq b) \\ b & (a < b) \end{cases} \tag{28}$$

と表されることより

$$\neg a = a \rightarrow 0 = \begin{cases} 1 & (a = 0) \\ 0 & (0 < a \leq 1) \end{cases} \tag{29}$$

$$\prec a = 1 \leftarrow a = \begin{cases} 1 & (0 \leq a < 1) \\ 0 & (a = 1) \end{cases} \tag{30}$$

となっているからである．

4．直観主義述語論理計算LJと双対直観主義述語論理計算DLJ

本論文では，古典述語論理計算LKに2つの論理記号←，≺とそれらに関する推論規則とを付加した体系を考えてきたが，以下，LKでの式の定義を制限することによって得られる直観主義述語論理計算LJと双対直観主義述語論理計算DLJとについて述べよう．

いま，LKにおける式Γ⇒Δを次のように制限することによって，LJおよびDLJを定式化する．

［定義4.1］LJにおける式Γ⇒Δとは，右辺のΔが高々1つの論理式から成るものとする．また，DLJにおける式Γ⇒Δとは，左辺のΓが高々1つの論理式から成るものとする．

さて，LKの場合と同様に，LJおよびDLJにおいても

$$\Rightarrow \neg A \equiv \prec A \tag{31}$$

が証明可能となる．したがって，以下，LKでの否定を～，LJでの否定を¬，DLJでの否定を≺と書くことと

約束する．このとき，これらに関する推論規則を列記すると

$$\frac{\Gamma \Longrightarrow \Delta, A}{\sim A, \Gamma \Longrightarrow \Delta}(\sim \Longrightarrow) \qquad \frac{A, \Delta \Longrightarrow \Gamma}{\Delta \Longrightarrow \Gamma, \sim A}(\Longrightarrow \sim)$$

$$\frac{\Gamma \Longrightarrow A}{\neg A, \Gamma \Longrightarrow}(\neg \Longrightarrow) \qquad \frac{A, \Delta \Longrightarrow}{\Delta \Longrightarrow \neg A}(\Longrightarrow \neg)$$

$$\frac{\Longrightarrow \Delta, A}{\forall A \Longrightarrow \Delta}(\forall \Longrightarrow) \qquad \frac{A \Longrightarrow \Gamma}{\Longrightarrow \Gamma, \forall A}(\Longrightarrow \forall)$$

となる．また，ある論理体系Sで式$\Gamma \Rightarrow \Delta$が証明可能であることを$S \vdash \Gamma \Rightarrow \Delta$と書き，証明可能でないことを$S \vdash \Gamma \Rightarrow \Delta$と書くことにすると，次の定理が成り立つ．

［定理4.1］

① $LK \vdash \Rightarrow A \vee \sim A$
② $LK \vdash \Rightarrow \sim(A \wedge \sim A)$
③ $LK \vdash \Rightarrow \sim\sim A \equiv A$
④ $LJ \vdash \Rightarrow A \vee \neg A$
⑤ $LJ \vdash \Rightarrow \neg(A \wedge \neg A)$
⑥ $LJ \vdash \Rightarrow A \rightarrow \neg\neg A$
⑦ $LJ \vdash \Rightarrow \neg\neg A \rightarrow A$
⑧ $DLJ \vdash \Rightarrow A \vee \forall A$
⑨ $DLJ \vdash \Rightarrow \forall(A \wedge \forall A)$
⑩ $DLJ \vdash \Rightarrow A \rightarrow \forall\forall A$
⑪ $DLJ \vdash \Rightarrow \forall\forall A \rightarrow A$

ここで，①，④，⑧は排中律の成立・不成立を示し，②，⑤，⑨は矛盾律の成立・不成立を示している．

（証明）⑧と⑪についてだけ示す．他は同様に示される．

⑧について：

$$\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{A \Longrightarrow A}{\Longrightarrow A, \forall A}(\Longrightarrow \forall)}{\Longrightarrow A, A \vee \forall A}(\Longrightarrow e)}{\Longrightarrow A \vee \forall A, A}(\Longrightarrow \vee)}{\Longrightarrow A \vee \forall A, A \vee \forall A}(\Longrightarrow c)}{\Longrightarrow A \vee \forall A}$$

⑪について：

$$\dfrac{\dfrac{\dfrac{A \Longrightarrow A}{\Longrightarrow A, \forall A}(\Longrightarrow \forall)}{\forall\forall A \Longrightarrow A}(\forall \Longrightarrow)}{\Longrightarrow \forall\forall A \rightarrow A}(\Longrightarrow \rightarrow)$$

(Q.E.D.)

［定理4.2］

① $LJ \vdash \Longrightarrow \neg\exists x A(x) \equiv \forall x \neg A(x)$
② $DLJ \vdash \Longrightarrow \forall\forall x A(x) \equiv \exists x \forall A(x)$

（証明）②についてだけ示す．

前半：

$$\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{A(a) \Longrightarrow A(a)}{\Longrightarrow A(a), \forall A(a)}(\Longrightarrow \forall)}{\Longrightarrow A(a), \exists x \forall A(x)}(\Longrightarrow \exists)}{\Longrightarrow \exists x \forall A(x), A(a)}(\Longrightarrow e)}{\Longrightarrow \exists x \forall \forall(x), \forall x A(x)}(\Longrightarrow \forall)}{\forall\forall x A(x) \Longrightarrow \exists x \forall A(x)}(\forall\forall \Longrightarrow)}{\Longrightarrow \forall\forall x A(x) \rightarrow \exists x \forall A(x)}(\Longrightarrow \rightarrow)$$

後半：

$$\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{\dfrac{A(a) \Longrightarrow A(a)}{\forall x A(x) \Longrightarrow A(a)}(\forall \Longrightarrow)}{\Longrightarrow A(a), \forall\forall x A(x)}(\Longrightarrow \forall\forall)}{\Longrightarrow \forall\forall x A(x), A(a)}(\Longrightarrow e)}{\forall\forall A(a) \Longrightarrow \forall\forall x A(x)}(\forall\forall \Longrightarrow)}{\exists x \forall A(x) \Longrightarrow \forall\forall x A(x)}(\exists \Longrightarrow)}{\Longrightarrow \exists x \forall A(x) \rightarrow \forall\forall x A(x)}(\Longrightarrow \rightarrow)$$

(Q.E.D.)

5．むすび

集合の四則演算を考察することからLKを拡張し，それに基づいてLJおよびDLJを定式化して，それらの諸性質を明確にすることができた．

本論文で取り扱った集合の四則演算については，種々の観点から検討する余地があるものと考えられる．また，LJおよびDLJの推論規則をファジィシステムの逆問題と同定問題[7]に適用し，それらの解法を統一的に示すこともできるであろう．

参考文献

1)松本和夫：”情報数学Ⅰ－束と論理”，森北出版(1980)
2)松本和夫：”数学論理学”，共立出版(1970)
3)MacLane,S. : "Categories for the Working Mathematician", Springer (1971)
4)和泉孔二：”随伴的なファジィシステムとその応用に関する研究”，大阪府立大学博士論文 (1984)
5)Takeuti,G.,Zaring,W. : "Axiomatic Set Theory", Springer (1973)
6)Gentzen,G. : "Untersuchungen über das logische Schliessen I.II", Mathematisch Zeitschrift, Vol.39, pp.176-210,pp.405-431 (1935)
7)和泉孔二：”ファジィシステムの逆問題と同定問題”，情報科学研究，第2号，pp.31-49 (1988)

問い合わせ先：〒580松原市天美東5-4-33
阪南大学商学部経営情報学科
和泉孔二
TEL. 0723-32-1224,EXT.8808
FAX. 0723-36-2633

TB2-1

ファジィ推論の評価について

Evaluations of Fuzzy Inferences

野島　和行,　向殿　政男
Kazuyuki Nojima,　Masao Mukaidono
明治大学　理工学部
School of Science and Technology Meiji University

Abstract

In this paper, we will discuss standard fuzzy inferences which were extended from modus ponens. First, we will give an inequality, which is obtained by extending the logical property of modus ponens, to evaluate the fuzzy inferences. Secondary, we prove that standard fuzzy inferences do not always satisfy it. And lastly, we give a new type of the implication and it is shown that the standard fuzzy inferences with our implication always satisfy the inequality.

1．はじめに

論理学の推論の形式には幾つかある．その1つにモダスポネンスと呼ばれる推論法があり，Zadehらは，それをファジィへ拡張しファジィモダスポネンスの考えを示した．それは，多値論理レベルのインプリケーションを基にファジィ関係を構成し，max-min合成を施して結論のファジィ集合を導く方法である[3]．

ところで，モダスポネンスには，結論の真理値は前提の真理値に比べて等しいか大きいという性質がある[1]．

今回，この性質をファジィへ拡張してファジィ推論の満たすべき条件を提案する．そして，Zadehらが提案した推論法は，その条件式を常には満たしていないことを証明，指摘する．更に，その解決法を考察して新しいタイプのインプリケーションを提案する．

2．モダスポネンスについて

論理学において，次の形式の演繹推論をモダスポネンスと言う．

p→q　かつ　p　ならば　q

p，qは命題である．p，p→qが前提でありqが結論となる．このモダスポネンスには次の大切な性質がある[2]．

[性質2.1]

命題pの真理値を／p／で表すと，モダスポネンスには次の関係がある．ただし，∧は小さい方の値をとる2項演算である．

／p→q／　∧　／p／　≦　／q／　　(2.1)

3．ファジィ命題

xをある対象の名称，Aはある属性を表すもので，ある全体集合Xのファジィ集合とする．この時，次の形式で与えられるものをファジィ命題[6]と呼ぶことにする．また，このファジィ命題をAで表す．

A＝「x is A」　　(3.1)

本稿ではファジィ集合を斜体，それに対応するファジィ命題をゴシック体で表すことにする．

つぎにファジィ命題A，A'，B，B'を用いてファジィモダスポネンスと呼ばれる次の形式の推論を定義する．

[定義3.1]

次の形式の推論をファジィモダスポネンスという．

A→B　かつ　A'　ならば　B'　　(3.2)

各ファジィ命題に対応するファジィ集合A，A'，B，B'はそれぞれ全体集合X，X，Y，Yにおけるファジィ集合であり，それぞれのメンバーシップ関数を$\mu_A(x)$，$\mu_{A'}(x)$，$\mu_B(y)$，$\mu_{B'}(y)$で表す．A→BとA'を前提，特にA→Bをルールと呼び，B'を結論と呼ぶ．

ここでAとA'，BとB'は同一のファジィ命題である必要はない．

ルールA→Bは，ファジィ命題AとBからの複合ファジィ命題[9]である．そこで，R，R'をルールのファジィ命題とする．対応するR，R'をX×Y上のファジィ集合とし，それぞれのメンバーシップ関数をr(x,y)，r'(x,y)で表す．特にR＝「A→B」とする．

尚，以下本稿で扱うファジィ集合は凸で正規であるとする．

4．推論の合成規則

ここで，Zadeh[4],[10]が提案したファジィ推論法を紹介する．まず，ルールA→Bをファジィ命題Rとし，対応するX×Yのファジィ集合RをAとBのファジィ関係とみなす．但しそのファジィ関係は多値のインプリケーションを基に構成する．そして，そのファジィ関係RとA'とのmax-min合成を行うことによって結論B'を求める．これは推論の合成則と呼ばれる方法で，次式で与えられる．

$$\mu_{B'}(y)=\bigvee_x \{ \mu_{A'}(x) \wedge r(x,y) \} \qquad (4.1)$$

$$r(x,y)=\mu_A(x)\rightarrow\mu_B(y) \qquad (4.2)$$

[例2.1]

Lukasiewiczのインプリケーションの定義は，次式である．

$$a\rightarrow b=1\wedge 1-a+b \qquad (4.3)$$

今，(4.1)式においてA'＝A，$r(x,y)=1\wedge 1-\mu_A(x)+\mu_B(y)$とすると，結論B'のメンバーシップ関数$\mu_{B'}(y)$は，次の通りである[3]．

$$\mu_{B'}(y)=\bigvee_x \{ \mu_A(x) \wedge (1-\mu_A(x)+\mu_B(y)) \} = (1+\mu_B(y)) / 2$$

5．言語ヘッジ，言語真理値

言語ヘッジは，あるファジィ集合Aの修飾詞と考えてよい．たとえば，“若い”というファジィ集合に“非常に”という言語ヘッジをつけると“非常に若い”というファジィ集合を定義できる．

言語ヘッジは，very，more or less など多く提案されている．その中には，f:[0,1]→[0,1]なる関数で表せるものがある．

[例5.1]

$$\mu_{\text{very young}}(x)=(\mu_{\text{young}}(x))^2$$

そこで，次の条件を満たす関数を便宜的に部分的修飾語関数と名付けて定義する．

[定義5.1]

部分的修飾語関数fとは，次の条件を満たすものである．

(1)　f:[0,1]→[0,1]

(2)　f(1)＝1

(3)　x≦y　⇒　f(x)≦f(y)　　（単調性）

(4)　$\forall f_1, f_2$ ($f_1 \neq f_2$
⇒　$\forall x$ $f_1(x)\leqq f_2(x)$ or $f_2(x)\leqq f_1(x)$)　（比較可能）

現在提案されている very や more or less 等の一部の言語ヘッジは上の4つの条件を満たす関数で定義されている．

[例5.2]

いま，言語ヘッジmは適当な部分的修飾語関数 f で定義されているものとする．言語ヘッジmを用いて，ファジィ集合Aを変換したものがA'であるならば，そのメンバーシップ関数は次の様に変換できる．

$$\mu_{A'}(x) = \mu_{mA}(x) = f(\mu_A(x)) \qquad (5.1)$$

言語真理値τは，[0,1]上のファジィ集合である．従ってそのメンバーシップ関数は[0,1]→[0,1]なので，その中には［定義5.1］の4つの条件を満たすものがある．

A→Bのルールに，その言語真理値を与えることが提案考察されている[6]．そこで，τを考慮したルールのファジィ命題をR'とし，

R'＝「A→B　is　τ」

とする．この場合も，適当な部分的修飾語関数 g を用いてr'を表せる場合がある．

$$r'(x,y)=g(r(x,y)) \qquad (5.2)$$

[例5.3]
言語真理値 very true が，
$\mu_{very\ true}(t)=(\mu_{true}(t))^2=t^2$ $t\in[0,1]$で定義されるとき，
R' =「A→B is very true」
なるルールR' のメンバーシップ関数は次で表される．
$r'(x,y)=(\mu_A(x)\rightarrow\mu_B(y))^2$

[定義5.2]
以上の考察より，結論のメンバーシップ関数$\mu_{B'}(y)$は，一般に次式で与えられる．但し，f，g は適当な部分的修飾語関数である．

$$\mu_{B'}(y)=\bigvee_x\{f(\mu_A(x))\wedge g(r(x,y))\} \quad (5.3)$$

$$r(x,y)=\mu_A(x)\rightarrow\mu_B(y) \quad (5.4)$$

現在，Zadehの提案した直接法，Baldwin，塚本[8]らの提案した間接法[7]が標準的なファジィ推論として知られている[9]．又，直接法と間接法は同じであるというTongの証明もよく知られている[7]．この証明によりこれらの推論法は本質的に［定義5.2］であると言える．

6．可能性測度，必然性測度

Zadehが提案している可能性測度，必然性測度の定義を示す[12]．

［定義6.1］可能性測度
議論領域U上に可能性分布ΠNが定義されているとき，U上のあるファジィ集合をMとすると，Nの値がMの要素である可能性を与える可能性測度Pos_N(M)は次のように定義される．

$$Pos\_N(M)=\sup_{u\in U}\{\pi_N(u)\wedge\mu_M(u)\} \quad (6.1)$$

［定義6.2］必然性測度
議論領域U上の正規可能性分布ΠNが定義されていて，ファジィ集合MについてNに関する可能性測度Pos_N(M)が与えられている時，必然性測度Nec_N(M)は次式で定義される．但し$\neg M$はMの補集合を表す．

$$Nec\_N(M)=1-Pos\_N(\neg M)=\inf_{u\in U}\{(1-\pi_N(u))\vee\mu_M(u)\} \quad (6.2)$$

さて，本稿では上式の必然性測度について次の解釈を与える．

［定義6.3］
ファジィ集合Mがファジィ集合Nを含む必然性の値を，次式で与える．

$$Nec\_N(M)=\inf_{u\in U}\{(1-\mu_N(u))\vee\mu_M(u)\} \quad (6.3)$$

この定義によってファジィ集合AとA'について$A'\subset A$である必然性の値Nec_A'(A)を与えることができる．

7．ファジィ推論の満たすべき条件

(3.2)で示した推論『A→B かつ A' ならば B'』の各集合がクリスプである場合を考察する．

［考察7.1］
『A→B かつ A' ならば B'』が成立しているとすると，
A→Bのルールが真である場合，
$A'\subset A$ ならば $B'\subset B$ であり
$A'\not\subset A$ ならば $B'\subset B$ or $B'\not\subset B$ である．

このことは，次のように形式的に表現できる．
Nec_A'(A) ≦ Nec_B'(B)
実際，表7.1より確かに成立することがわかる．

	$A'\subset A$ $B'\subset B$	$A'\not\subset A$ $B'\subset B$	$A'\not\subset A$ $B'\not\subset B$
Nec_A'(A)	1	0	0
Nec_B'(B)	1	1	0

表 7.1 包含関係と必然性

ところで，R，R'はX×Y上の集合と考えることができる．従って，ルールRが真の時，次の関係がある．
$R'\subset R$ ならば R' も真
$R'\not\subset R$ ならば R' は真ではない

［例7.1］
$x\in A$を$A(x)$で表す．
$R=\{(x,y)\mid A(x)\rightarrow B(y)\}$ が，ルールRが真であるX×Y上の集合とする．$R'=\{(x,y)\mid A(x)\rightarrow B(y)\wedge B(y)\rightarrow A(x)\}$ と置くと，$R'\subset R$であるから，R' は真である．

そこで，ルールの真偽も考察できるように(3.2)を『R' かつA ならば B'』と拡張する．ここでルールR' の真偽は，真であるルールR＝「A→B」に対して決定されるものとする．

［考察7.2］
『R' かつ A' ならば B'』が成立しているとすると，
ルールR' が真でない場合，
A'に関わらず$B'\subset B$または$B'\not\subset B$である．

即ち，Nec_R'(R)＝0 の場合，Nec_B'(B)＝0 or 1 である．
以上をまとめて形式化すると，次式になる．

$$Nec\_R'(R)\wedge Nec\_A'(A)\leq Nec\_B'(B) \quad (7.1)$$

(7.1)式は，(2.1)の関係に対応している．
この関係をファジィにそのまま拡張する．但し，R＝「A→B」とし，R' ＝「A→B is τ」（τは言語真理値）とする．

［要請7.1］
ファジィ推論が意味のある推論であるためには，(7.1)式の関係を常に満たす必要がある．

8．インプリケーション

以上の議論に置いてインプリケーションについて特に言及しなかった．現在多値論理のレベルにおいて多くのインプリケーションが提案されている．ここでは，まずt-norm，t-conorm[5]について説明し，3つのタイプにインプリケーションについて紹介する．

［定義8.1］
$\forall x,y,z\in[0,1]$として，次の条件を満たす2項演算をt-norm Tと呼ぶ．
(1) T(x,1)=x，T(0,x)=0　境界条件
(2) x≦y ⇒ T(x,z)≦T(y,z)　単調性
(3) T(x,y)=T(y,x)　交換性
(4) T(x,T(y,z))=T(T(x,y),z)　結合性
また，t-conorm S は t-norm T により次式で定義される．

$$S(x,y)=1-T(1-x,1-y) \quad (8.1)$$

t-norm として，激烈積$\wedge$，限界積$\odot$，代数積・，論理積$\wedge$，t-conorm として，論理和$\vee$，代数和$\dot{+}$，限界和$\oplus$，激烈和$\veebar$等が提案されているが，これらについて次の順序関係が知られている[4]，[5]．

$$\wedge\leq\odot\leq\cdot\leq\wedge\leq\vee\leq\dot{+}\leq\oplus\leq\veebar$$

［性質8.1］
t-norm においては，論理積が一番強い演算であることが知られている[5]．　$\forall x,y\ T(x,y)\leq x\wedge y$

［定義8.2］
インプリケーションとして次の3つのタイプが定義されている[13]．
$a\overset{R}{\Rightarrow}b=\max\{x\mid T(a,x)\leq b\}$　R-implication
$a\overset{S}{\Rightarrow}b=S(n(a),b)$　S-implication
$a\overset{QL}{\Rightarrow}b=S(n(a),T(a,b))$　QL-implication
但し，nはn(0)=1を満たす[0,1]から[0,1]への減少関数であり，strong negationと呼ばれる．

［例8.1］
R-implication で $T(x,y)=x\wedge y$ とすると，Gödelのインプリケーションになる．また，R-implication で $T(x,y)=x\odot y$，もしくはS-implicationで $S(x,y)=x\oplus y$とすると，Lukasiewiczのインプリケーションとなる．

Dubois & Prade[13]によれば公理系の観点からインプリケーションについて次のような要請がある．I(a,b)をインプリケーションとして，
I1.　a≦a' ⇒ I(a,b)≧I(a',b)
I2.　b≧b' ⇒ I(a,b)≧I(a,b')
I3.　I(0,b)=1(falsity implies anything)
I4.　I(1,b)=b(tautology cannot justify anything)

I5. I(a,b)≧b(a numerical counterpart of q→(p→q))
I6. I(a,a)=1(identity principle)
I7. I(a,I(b,c))=I(b,I(a,c))(exchange principle)
I8. I(a,b)=1 ⇔ a≦b(implication defines an ordering)
I9. I(a,b)=I(n(b),n(a))for some strong negation n
I10. I is continuous.

ほとんどのインプリケーションは上の10項目全てを同時に満たさない．例外としてLukasiewiczのインプリケーションがある．

9．ファジィ推論の評価

3つのタイプのインプリケーションから適当に選んでファジィ推論は計算される．Zadehはその中でもLukasiewiczのインプリケーションが直感的に妥当であると言っている．ところが，3つのタイプからどのインプリケーションを選んでも条件式(7.1)を一般に満たさないことが証明できる．以下順を追って証明する．

まずR-implication について考察してから，S-implication， QL-implicationについて考察する．

[定理9.1]
T_1, T_2をt-normとする．
$\forall x,y \quad T_1(x,y) \leqq T_2(x,y)$
$\Rightarrow \quad \forall a,b \quad \max\{z|T_1(a,z)\leqq b\} \geqq \max\{z|T_2(a,z)\leqq b\}$

(証明)
$a \leqq b$ の時 t-normの境界条件より明らかに
$\max\{z|T_1(a,z)\leqq b\} = \max\{z|T_2(a,z)\leqq b\} = 1$
$a > b$ の時
$\max\{z|T_1(a,z)\leqq b\} = K$ (9.1)
$\max\{z|T_2(a,z)\leqq b\} = L$ (9.2)
と置く．ここで $K<L$ と仮定すると
(9.1)式より $T_1(a,K) \leqq b < T_1(a,L)$ (9.3)
更に(9.2)式より $T_2(a,L) \leqq b$ (9.4)
(9.3)式，(9.4)式より $T_2<T_1$ となる．
しかし，これは$T_1(x,y)\leqq T_2(x,y)$に反する．従って $K\geqq L$
以上より$\max\{z|T_1(a,z)\leqq b\} \geqq \max\{z|T_2(a,z)\leqq b\}$ (9.5) ■

[系9.1]
[性質8.1] より，$T(x,y)\leqq x\wedge y$であるから，$a \overset{QL}{\Rightarrow} b \geqq b$(9.6)

[定理9.2]
f_A，f_Bを部分的修飾語関数とする．
$\mu_{A'}(x) = f_A(\mu_A(x))$ ，$\mu_{B'}(y)=f_B(\mu_B(y))$ について
$\forall s\in[0,1](\ f_A(s)\leqq f_B(s)\ ) \quad \Leftrightarrow \quad Nec\_A'(A) \geqq Nec\_B'(B)$

(証明)
$$Nec\_A'(A) = \inf_x [\ \{1 - f_A(\mu_A(x))\} \vee \mu_A(x)\ ]$$
$$= \inf_{s\in[0,1]} [\ \{1 - f_A(s)\} \vee s\ ]$$
同様にして，
$$Nec\_B'(B) = \inf_{t\in[0,1]} [\ \{1 - f_B(t)\} \vee t\ ]$$

さて，いま $1-f_A(s)\geqq 1-f_B(s)$ であることを考慮すると，
$$Nec\_A'(A)\vee Nec\_B'(B)$$
$$= \inf_{s\in[0,1]} [\ \{1-f_A(s)\} \vee s] \vee \inf_{t\in[0,1]} [\ \{1-f_B(t)\} \vee t]$$
$$= \inf_{s\in[0,1]} [\ \{1 - f_A(s)\} \vee \{1 - f_B(s)\} \vee s\ ]$$
$$= \inf_{s\in[0,1]} [\ \{1 - f_A(s)\} \vee s\ ]$$
$$= Nec\_A'(A)$$
従って，$Nec\_A'(A) \geqq Nec\_B'(B)$ ．
但し，等号は $\forall s\ f_A(s)=f_B(s)$ の時に限る．

逆に$Nec_A'(A)\geqq Nec_B'(B)$の時，$\forall x f_A(x)\geqq f_B(x)$と仮定すると，
$Nec\_A'(A)\vee Nec\_B'(B) = Nec\_B'(B)$
となり，矛盾が生じる．従って，$f_A(x)\leqq f_B(x)$ ． ■

[定理9.3]
R-implicationを用いたファジィ推論法では，常に次の関係になる．

$$Nec\_R'(R) \wedge Nec\_A'(A) \geqq Nec\_B'(B) \qquad (9.7)$$

(証明)
1) $x \in \{x|\mu_A(x)\leqq\mu_B(y)\}$ の時，r=1 であるから
$$\mu_{B'}(y) = \max_x \{f(\ \mu_A(x)\ )\wedge 1\} = f(\ \mu_B(y)\ )$$
2) $x \in \{x|\mu_A(x)>\mu_B(y)\}$ の時
$$\mu_{B'}(y) = \max_x \{f(\mu_A(x)) \wedge g(\mu_A(x) \overset{R}{\Rightarrow} \mu_B(y))\ \}$$
$$\geqq \max_x \{f(\mu_A(x)) \wedge g(\mu_B(y))\}\ (\because [系9.1])$$
$$= \max_x \{\ f(\ \mu_A(x)\ )\ \} \wedge g(\ \mu_B(y)\ )$$
$$= 1 \wedge g(\ \mu_B(y)\ )$$
$$= g(\ \mu_B(y)\ )$$
1),2)より，$\mu_{B'}(y)\geqq f(\ \mu_B(y)\ )\vee g(\mu_B(y))$ (9.8)

a)$Nec_R'(R)\leqq Nec_A'(A)$の場合
この時，$Nec_R'(R)\geqq Nec_B'(B)$を示せばよい．
[定理9.2] より，$f\leqq g$であるから(9.8)式より$\mu_{B'}(y)\geqq g(\mu_B(y))$
よって，
$$Nec\_B'(B) = \inf_y [\ \{1-\mu_{B'}(y)\} \vee \mu_B(y)\ ]$$
$$\leqq \inf_y [\ \{1-g(\mu_B(y))\} \vee \mu_B(y)\ ]$$
$$= \inf_{r(x,y)} [\ \{1-g(r(x,y))\} \vee r(x,y)]$$
$$= Nec\_R'(R)$$
$\therefore Nec\_R'(R) \geqq Nec\_B'(B)$

b)$Nec_R'(R)\geqq Nec_A'(A)$の場合
この時，$Nec_A'(A) \geqq Nec_B'(B)$を示せばよい．
[定理9.2] より，$f\geqq g$ であるから $\mu_{B'}(y) \geqq f(\ \mu_B(y)\ )$
よって，
$$Nec\_B'(B) = \inf_y [\ \{1 - \mu_{B'}(y)\} \vee \mu_B(y)\ ]$$
$$\leqq \inf_y [\ \{1 - f(\mu_B(y))\} \vee \mu_B(y)\ ]$$
$$= \inf_x [\ \{1 - f(\mu_A(x))\} \vee \mu_A(x)\ ]$$
$$= Nec\_A'(A)$$
$\therefore Nec\_A'(A) \geqq Nec\_B'(B)$

以上より $Nec\_R'(R)\wedge Nec\_A'(A)\geqq Nec\_B'(B)$ (9.9) ■

[定理9.4]
任意の部分的修飾語関数f,gについて，R-implicationでa>bの時，
f(b)≧g(a→b)または，a→b=b の関係がある
$\Leftrightarrow Nec\_R'(R) \wedge Nec\_A'(A) = Nec\_B'(B)$

(証明省略) ■

[定理9.5]
S-implication，QL-implicationを用いたファジィ推論は，一般に
$Nec\_R'(R)\wedge Nec\_A'(A)\leqq Nec\_B'(B)$ を満たさない．

(証明)
S-implicationの場合
$a \overset{S}{\Rightarrow} b = S(\ n(a),\ b)\geqq n(a)\vee b\geqq b$
$$\mu_{B'}(y)\geqq \max_x \{f(\mu_A(x)) \wedge g(\mu_B(y))\} = g(\mu_B(y))$$

QL-implicationの場合
$a \overset{QL}{\Rightarrow} b = S(\ n(a),\ T(a,b)\ )\geqq T(a,b)$
1) $x \in \{x|\mu_A(x)\leqq\mu_B(y)\}$ の時，
$$\mu_{B'}(y) = \max_x \{f(\mu_A(x)) \wedge g(\mu_A(x) \overset{QL}{\Rightarrow} \mu_B(y))\}$$
$$\geqq \max_x \{f(\mu_A(x)) \wedge g(T(\mu_A(x),\mu_B(y)))\}$$
$$= \max_x \{\ f(\ \mu_A(x)\ )\ \wedge\ g(\ \mu_A(x))\ \}$$
$$= f(\ \mu_B(x)\ )\ \wedge\ g(\ \mu_B(x)\ )$$

2) $x \in \{x|\mu_A(x)>\mu_B(y)\}$ の時
$$\mu_{B'}(y)\geqq \max_x \{f(\mu_A(x)) \wedge g(\mu_B(y))\} = g(\mu_B(y))$$

1),2)より，

$$\mu_{B'}(y) \geq \{f(\mu_A(x)) \wedge g(\mu_B(y))\} \vee g(\mu_B(y)) = g(\mu_B(y))$$

以上より，S-implicationの場合もQL-implicationの場合も
$\mu_{B'}(y) \geq g(\mu_B(y))$である．よって，

$$\mathrm{Nec\_B'(B)} = \inf_y [\{1 - \mu_{B'}(y)\} \vee \mu_B(y)]$$
$$\leq \inf_y [\{1 - g(\mu_B(y))\} \vee \mu_B(y)] = \mathrm{Nec\_R'(R)}$$

なる関係があるので，$\mathrm{Nec\_A'(A)} \geq \mathrm{Nec\_R'(R)}$ 即ち $f \leq g$ の時，

$$\mathrm{Nec\_R'(R)} \wedge \mathrm{Nec\_A'(A)} \geq \mathrm{Nec\_B'(B)}$$

となる． ■

［定理9.6］
S-implication，QL-implicationでは，部分的修飾語関数f,gが，
$f \geq g$かつ$f(b) \geq g(a \rightarrow b)$ の関係にあるときまたその時に限り，

$$\mathrm{Nec\_R'(R)} \wedge \mathrm{Nec\_A'(A)} \leq \mathrm{Nec\_B'(B)}$$

を満たす．

（証明省略） ■

［定理9.3］，［定理9.5］は，［定義5.2］のファジィ推論はここで提案した要請を満たしていないことを意味している．

１０．新しいタイプのインプリケーションの提案

以上より３つのタイプのインプリケーションからいかなるものを選んでも，本稿で要請している条件式を常に満たす推論にはならない．

［定理10.1］

$$\mu_{B'}(y) \leq f(\mu_B(y)) \vee g(\mu_B(y)) \qquad (10.1)$$

ならば，$\mathrm{Nec\_R'(R)} \wedge \mathrm{Nec\_A'(A)} \leq \mathrm{Nec\_B'(B)}$

（証明省略） ■

［定理10.1］より，(10.1)式になるようなインプリケーションのタイプを定義すれば良い．

［定義10.1］
次のタイプのインプリケーションをT-implicationとして定義する．

$$a \overset{I}{\rightarrow} b = \begin{cases} 1 & (a \leq b) \\ T(a,b) & (a > b) \end{cases} \qquad (10.2)$$

T-implicationは，I2-I4,I6,I8を満たすことが容易に確かめられる．

［定理10.2］
T-implicationのタイプのインプリケーションから適当なものを選んだファジィ推論は常に，$\mathrm{Nec_R'(R)} \wedge \mathrm{Nec_A'(A)} = \mathrm{Nec_B'(B)}$を満たす．

（証明）

1) $x \in \{x \mid \mu_A(x) \leq \mu_B(y)\}$ の時，r=1 であるから

$$\mu_{B'}(y) = \max_x \{f(\mu_A(x)) \wedge 1\} = f(\mu_B(y))$$

2) $x \in \{x \mid \mu_A(x) > \mu_B(y)\}$ の時

$$\mu_{B'}(y) = \max_x \{f(\mu_A(x)) \wedge g(\mu_A(x) \overset{I}{\rightarrow} \mu_B(y))\}$$
$$= \max_x \{f(\mu_A(x))\} \wedge g(\mu_B(y))$$
$$= g(\mu_B(y))$$

1),2)より，$\mu_{B'}(y) = f(\mu_B(y)) \vee g(\mu_B(y))$ (9.8)

a)$\mathrm{Nec_R'(R)} \leq \mathrm{Nec_A'(A)}$の場合
［定理9.2］より，$f \leq g$であるから(9.8)式より$\mu_{B'}(y) = g(\mu_B(y))$
よって，

$$\mathrm{Nec\_B'(B)} = \inf_y [\{1-\mu_{B'}(y)\} \vee \mu_B(y)]$$
$$= \inf_y [\{1-g(\mu_B(y))\} \vee \mu_B(y)]$$
$$= \mathrm{Nec\_R'(R)}$$
$$\therefore \mathrm{Nec\_R'(R)} = \mathrm{Nec\_B'(B)}$$

b)$\mathrm{Nec_R'(R)} \geq \mathrm{Nec_A'(A)}$の場合
［定理9.2］より，$f \geq g$ であるから $\mu_{B'}(y) = f(\mu_B(y))$
よって，

$$\mathrm{Nec\_B'(B)} = \inf_y [\{1 - \mu_{B'}(y)\} \vee \mu_B(y)]$$
$$= \inf_y [\{1 - f(\mu_B(y))\} \vee \mu_B(y)]$$
$$= \mathrm{Nec\_A'(A)}$$
$$\therefore \mathrm{Nec\_A'(A)} = \mathrm{Nec\_B'(B)}$$

以上より $\mathrm{Nec\_R'(R)} \wedge \mathrm{Nec\_A'(A)} = \mathrm{Nec\_B'(B)}$ (10.3) ■

ファジィ推論の要請は条件(7.1)式以外にも考えられる．従って［定理10.2］の意味するところは，いくつかの要請がある場合，適当なインプリケーションをT-implicationから選べば，ファジィ推論は少なくとも本稿で提案した要請を満たすということである．

１１．おわりに

本稿では，まずファジィ推論の満たすべき条件式を提案し，現在提案されている方法ではこの意味で，意味のある推論になっていないことを指摘した．更に，その解決法として新しいタイプのインプリケーションを提案した．

ファジィ推論の評価に関しては，水本がA’＝Aの時B’＝Bあることが妥当であるという観点から深く考察している[3],[4]．また，その解決法として，Max-*演算（*はt-norm）による推論法を提案している．今回本稿では特に紹介しなかったが，Max-*演算でも条件(7.1)式を常に満たしていないことが証明できる．

多値論理のインプリケーションは数多く提案されている．そのうちのどれがよいかは決めかねる問題である．それを更にファジィへ拡張すれば，問題は当然大きくなる．

しかし，ファジィ推論は明らかに役に立つ手法[9],[11]であり，その方法は多く存在して構わないものと思われる．

今回提案した条件式は，推論結果は曖昧さが増大しない方がよいということを主張している．その意味で悲観的な立場である．逆に楽観的な立場からみれば本稿で扱ったファジィ推論は正しい方法であると言えるかも知れない．

ファジィ推論を評価する問題はいかなる立場で用いるかによる．従って，もっと色々な評価方法があってよいと思う．

１２．参考文献

[1] 向殿，増沢：Fuzzy論理における導出形の性質について，信学技報，昭58-論330[D-95]，pp.786-863
[2] 向殿 政男：ファジィ推論のための基礎知識，講習会「ファジィ推論法」計測自動制御学会主催 pp.9-24 昭和63-11-21,22
[3] 水本 雅晴：ファジィ推論法，システムと制御 vol.28 No.7 pp.436-441 1984
[4] 水本 雅晴：Fuzzy論理とFuzzy推論，数理科学No.284 FEBRUARY 1978 pp.10-18
[5] M.MIZUMOTO: PICTORIAL REPRESENTATIONS OF FUZZY CONNECTIVES,PART I: CASES OF t-NORMS, t-CONORMS AND AVERAGING OPEATORS, Fuzzy Sets and Systems 31 (1989) 217-242 North-Holland
[6] 塚本 弥八郎：Fuzzy推論について，数理科学 No.191 MAY 1979 pp.28-33
[7] 塚本 弥八郎：あいまい推論，計測と制御 vol.22，No.1 昭和58年1月
[8] Y.TSUKAMOTO: An Approach to Fuzzy Reasoning Method, in Advances in Fuzzy Set Theory and Applications, North-Holland, Amsterdam (1979)
[9] 本多 中二，大里 有生：ファジィ工学入門，海文堂出版(1989)
[10] Zadeh: A Theory of Apporoximate Reasoning, REPRESENTATIONS FOR REAL-WORLD REASONING PP.149-194
[11] B.R.Gaines: Foundations of fuzzy reasoning Int.J.Man-Machine Studies (1979)8,623-668
[12] 佐藤 雅彦：ファジィ理論によるあいまいさの可能性的取扱いにおける新測度の提案，明治大学大学院 1989年度修士論文
[13] D.DUBOIS H.PRADE: Fuzzy sets and apporoximate reasoning

問い合わせ先：〒214 神奈川県川崎市多摩区東三田1-1-1
明治大学理工学部情報科学科システム科学研究室
野島 和行
TEL. 044-911-8181 EXT.314， FAX. 044-900-5196

TB2-2　ファジィエントロピー理論に基づいたファジィ推論方式の試み（第一報）

An attempt to methods for approximate reasoning based on fuzzy entropy's theory(I)

清水　昭雄
AKIO SHIMIZU
宇部興産㈱経営企画本部情報システム部システム企画第二グループ
Information Systems Development Dept. Corporate Planning Div. UBE INDUSTRIES,LTD.

Abstract : This paper attempts to apply fuzzy entropy theory to the approximate reasoning. The defuzzifier methods called fuzzy entropy methoed can gets as robust natures as any the area method and hight method, the center of gravity method used usually in the approximate reasonnig.

1．はじめに

Ｓｈａｎｎｏｎにより導入された情報エントロピーは、情報の価値を数値で表現する１つの尺度である。

一般的に情報を受け取る以前に結果がはっきりしている場合は情報の価値は小さく、逆にあいまいな場合は情報の価値が大きい。Ｓｈａｎｎｏｎの情報エントロピーの類似として、あいまいな対象をファジィ集合のあいまいさとした場合、例えば、"為替相場"という全体集合上に"円高"と"非常に円高"というファジィ集合を定義した時、"非常に円高"は"円高"と比較してあいまいさは少ない。このようなあいまいさを測る尺度としてファジィエントロピーなる概念がＤｅ　Ｌｕｃａ＆Ｔｅｒｍｉｎｉ，Ｋａｕｆｍａｎｎ，Ｙａｇｅｒなどにより提案されている。（論文［1］，［2］，［3］）

ところで本論文において、結論部合成による非ファジィ化演算として、ファジィエントロピーをパラメータとして導入したファジィ推論方式を提案する。非ファジィ化演算におけるパラメータとしてのファジィエントロピーの意味は、動的なシステム環境においてルールの結論部メンバーシップ関数の情報として重要度を表す値であり、結論部を裏づける根拠の度合いを定量化した値である。これは従来、ファジィルール発火時のＩＦ条件部グレードαを用いたα－ｃｕｔによる有効度のみ反映していたＴＨＥＮ結論部メンバーシップ関数に対して、そのあいまいな情報の重要さという尺度であるファジィエントロピーを結論部メンバーシップ関数合成後の非ファジィ化演算のパラメータとして内挿した推論方式について考察したので報告する。

2．ファジィエントロピーの定義と性質

［1］定義

(1) Ｄｅ　Ｌｕｃａ　＆　Ｔｅｒｍｉｎｉによる定義（論文［1］，［3］）

$$d(A)=k\left[\sum_{i=1}^{n}\left\{-\mu_A(\chi_i)\times\log\mu_A(\chi_i)-(1-\mu_A(\chi_i))\times\log(1-\mu_A(\chi_i))\right\}\right]$$

(2) Ｋａｕｆｍａｎｎによる定義（論文［1］，［4］）

$$d(A)=\sum_{i=1}^{n}\left|\mu_A(\chi_i)-\mu_{A1/2}(\chi_i)\right|$$

(3) Ｙａｇｅｒによる定義（論文［1］，［2］）

$$d(A)=n-\sum_{i=1}^{n}\left|\mu_A(\chi_i)-\mu_{\overline{A}}(\chi_i)\right|$$

（記号の意味）
- μA　；　メンバーシップ関数
- $A1/2=\{\chi\in x\mid\mu_A(\chi)\geq 1/2\}$
- $\mu\overline{A}$　；　Ａの補集合$\overline{A}$のメンバーシップ関数
- n　；　全体集合のcardinality

［2］性質（論文［1］，［2］，［3］）

ファジィエントロピーｄ（Ａ）は以下の三条件を満足している。

Ｆ（Ｘ）　；　ある系Ｘ（これを全体集合とする）の上の集合族

Ａ，$A^*\in F(X)$

ｄ；Ｆ（Ｘ）　→　［0，$+\infty$］

(1) $\forall\chi\in X$に対して　$\mu A(\chi)=0$又は1　$\Longleftrightarrow$　ｄ（Ａ）＝0

(2)　$\forall \chi \in X$に対して　$\mu A(\chi) = 0.5$　$\Longleftrightarrow$ d（A）は最大値を取る

(3)　$\left[\begin{array}{l}\mu A^{*}(\chi) \geqq \mu A(\chi) \quad \cdots \quad \mu A(\chi) \geqq 0.5 \\ \mu A^{*}(\chi) \leqq \mu A(\chi) \quad \cdots \quad \mu A(\chi) \leqq 0.5\end{array}\right]$　ならば　$d(A) \geqq d(A^{*})$

3．ファジィエントロピーに基づくファジィ推論方式

［1］2入力1出力の場合を例にして説明する。

第1の入力をξ、第1のメンバーシップ関数μ_X，
第2の入力をη、第2のメンバーシップ関数μ_Y，
出力をω、結論部のメンバーシップ関数をμ_A
とすると、ファジィルールは次のようになる。

IF　ξ　is　X　and　η　is　Y　THEN　ω　is　A

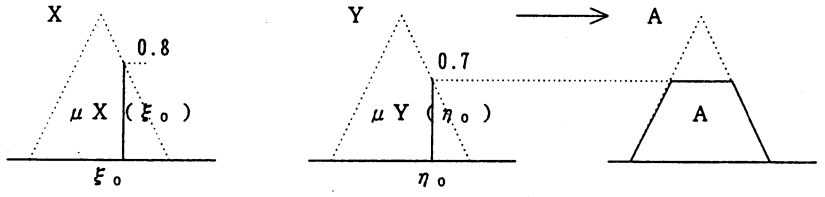
第1の入力ξの値がξ_0，第2の入力ηの値がη_0の時、上記ファジィルールから合成ファジィ集合$\mu_{A'}$（ファジィ結論A′）を導く2手法、第1図、第2図によって説明する。

第1の方法は、第1図に示すように次の式で示される方法である。

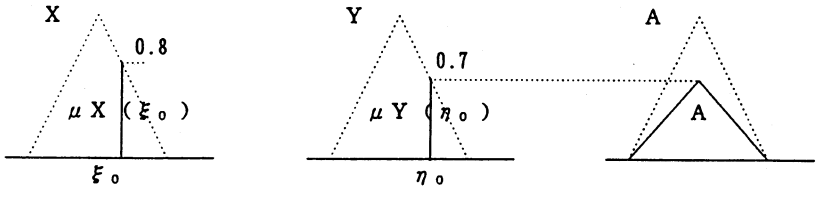
$$\mu_{A'}(\omega) = \{\mu_X(\xi_0) \wedge \mu_Y(\eta_0)\} \wedge \mu_A(\omega) \qquad \cdots\cdots (1)$$

また、第2の方法は、第2図に示すように次の式で示される方法である。

$$\mu_{A'}(\omega) = \{\mu_X(\xi_0) \wedge \mu_Y(\eta_0)\} * \mu_A(\omega) \qquad \cdots\cdots (2)$$



－ 第1図 －



－ 第2図 －

第1図、第2図は1個のルールに対する結論部合成ファジィ集合の算出法であるが、一般には1個の出力に対して複数個のファジィルールがあり、これらを結合して出力ファジィ集合μ_D（最終ファジィ結論D）を導き、出力ω_0を決定する。具体的には以下の手順で行う。

即ち、ルールの数がn個の場合、式（3）（又は（3）′）、（4）により出力ω_0を得る。

$$d(A\alpha) = m - \sum_{i=1}^{n} |\mu_{A\alpha}(x_i) - \mu_{\overline{A}\alpha}(x_i)| \qquad \cdots\cdots (3)$$

$$d(A\alpha) = k\left[\sum_{i=1}^{n} \{-\mu_{A\alpha}(x_i) \times \log \mu_{A\alpha}(x_i) - (1-\mu_{A\alpha}(x_i)) \times \log (1-\mu_{A\alpha}(x_i))\}\right] \qquad \cdots\cdots (3)'$$

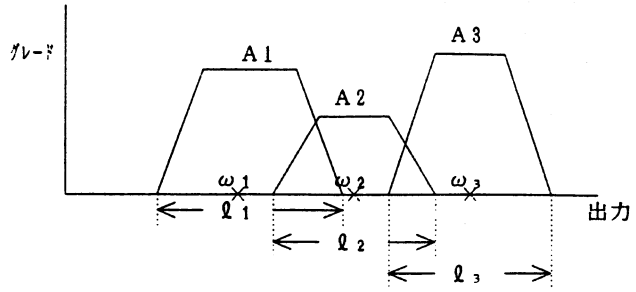
$$\omega_0 = \frac{\sum_{\alpha=1}^{n} \omega\alpha \cdot d(A\alpha)}{\sum_{\alpha=1}^{n} d(A\alpha)} \qquad \cdots\cdots (4)$$

（注）$\mu_{A\alpha}$；結論部$A\alpha$メンバーシップ関数
$\mu_{\overline{A}\alpha}$；$A\alpha$の補集合$\overline{A}\alpha$のメンバーシップ関数
m；全体集合のCardinality
ω_α；ファジィ集合$A\alpha$の代表点
n；ルールの個数

他に以下の［2］の方式が考えられる。

［2］ファジィエントロピー（ＹＡＧＥＲ、De Luca &Termini ）に基づくファジィ推論方式

①図形Ａi の底辺　；　ℓi
②図形Ａi のエントロピー　；　d（Ａi ）
③図形Ａi の代表点　；　ωi
④出　力　；　ω0
⑤ルールの個数　；　n



－　第３図　－

$$\omega_0 = \frac{\sum_{\alpha=1}^{n} \omega\alpha \cdot (d(A\alpha) \cdot \ell\alpha)}{\sum_{\alpha=1}^{n} (d(A\alpha) \cdot \ell\alpha)} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5)$$

4．例題

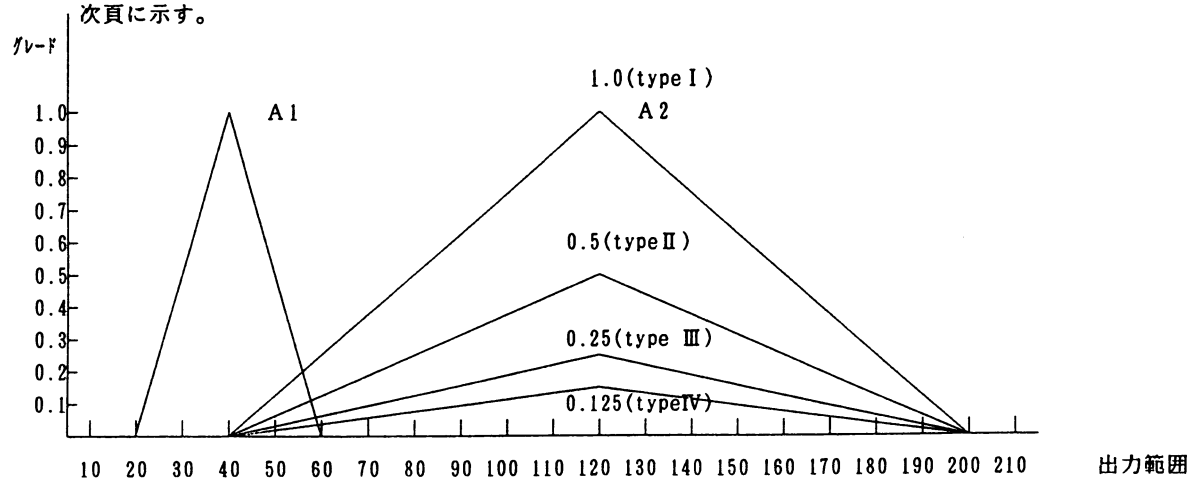
規則1	:	ξ	is	X_1	→	ω	is	A_1
規則2	:	ξ	is	X_2	→	ω	is	A_2
事実	:	ξ	is	X^*				
						ω	is	A^*

ここでＸｉはＸでの、Ａｉ、A^*はＡでのファジィ集合である。また$X^* \in X$である。

このルールの後件部合成後非ファジィ化演算について面積法、高さ法、重心法、ＹＡＧＥＲ測度に基づくファジィエントロピー法、Ｄｅ　Ｌｕｃａ＆Ｔｅｒｍｉｎｉのファジィエントロピーに基づくファジィエントロピー法との各推論値の数値比較を次の例題で示す。

［1］例題

Ａ１のメンバーシップ関数を固定し、Ａ２のメンバーシップ関数を以下の図が示すように最高グレードを１．０，０．５，０．２５，０．１２５とα－ｃｕｔによる変更を施した場合、各推論方式の結論部合成後の推論値比較を次頁に示す。

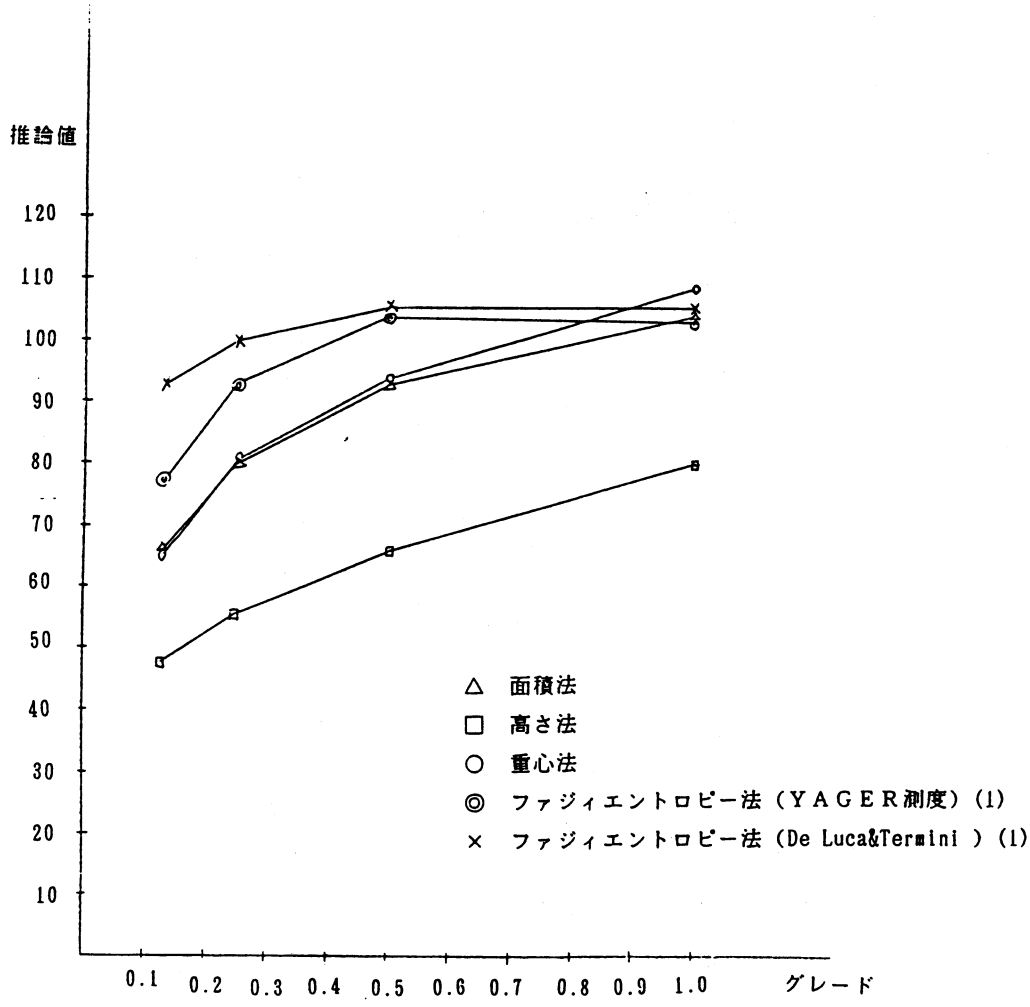


－　第４図　－　　結論部メンバーシップ関数の合成

推論方法 ＼ type別推論値	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
面　積　法	104.0	93.3	80.0	66.7
高　さ　法	80.0	66.7	56.0	48.9
重　心　法	108.1	94.0	80.3	66.6
ファジィエントロピー法(1)（ＹＡＧＥＲ測度）	104.0	104.0	93.3	79.9
ファジィエントロピー法(2)（ＹＡＧＥＲ測度）	115.3	115.3	111.1	104.0
ファジィエントロピー法(1)（De Luca & Termini）	105.0	105.0	100.2	92.7
ファジィエントロピー法(2)（De Luca & Termini）	115.6	115.7	113.9	110.8

－　表１　－　　グレード変更に伴う各推論方式の推論値比較

（注）ファジィエントロピー法による推論値計算は附録にてｔｙｐｅⅠを例として示す。



－　第５図　－　　結論部メンバーシップ関数のグレード変更に伴う
各推論方式による推論値の比較

［2］例題の解釈

前記例題において結論部メンバーシップ関数Ａ１のグレードを常に１に固定したものと、０．１２５から出発して、それを基にグレードを倍増した結論部メンバーシップ関数Ａ２との結論部合成後における推論値の変化の動きに関して、所見を述べれば、ファジィエントロピーによる推論方式はＡ２のグレードが０．１２５、０．２５，０．５，１と変えてゆくにつれて、推論値はゆるやかに漸次的な変化を示し、従来法（面積法、高さ法、重心法）の推論値は前者と比較して変化するグレードの大きさと共に大きな動きを示している。

最終的にＡ２のグレードを１とするとファジィエントロピーによる推論値は面積法、重心法と大差のない推論値に落ち着いている。高さ法はメンバーシップ関数の最も高いグレード１点のみしか推論値に反映していないためグレード０．１２５から最終グレードの１までの推論値について面積法、重心法及びファジィエントロピーによる方式の推論値と大きな隔り生じている。このファジィエントロピーによる方法は従来法と比較して前件部メンバーシップ関数のα－ｃｕｔによるグレード変化の影響に対してロバスト性があることを示している。

［3］考察

（1）従来の推論方式とこのファジィエントロピーに基づく推論方式と併用を行うことにより推論値の比較基準として用い、最尤推論値を選択することができる。

例えば　$\gamma \triangleq |\alpha - \beta|$

α；ファジィエントロピー方式による推論値

β；従来方式（例えば面積法、高さ法、重心法など）による推論値結論範囲におけるαとβとの差の許容範囲をε（$\varepsilon > 0$）とすれば①　$\gamma \geq \varepsilon$のとき、αはβよりあいまい度の強い推論値であると言える。②　$\gamma < \varepsilon$のとき、αはβよりあいまい度の弱い推論値であると言える。

この指標γをベースに、ファジィ推論を実行するシステム環境条件（入力情報が、不足しているケース、初期のファジィルールのチューニング時期においてファジィルール記述に整合性がないケースなど）を考慮して、εを設定する。このことによりもともとシステム環境条件が前記ケースのような場合は従来のグレードを中心とした面積による重みづけ推論や高さによる重みづけ推論による操作量のみを選択するのでなく、対象システムの置かれている動的なシステム環境下におけるあいまいな情報量の重みづけ推論によるより適した操作量が得られる効果がある。例えば①の場合は推論値としてαを選択し、②の場合は推論値としてβ（又はα）を選択するという手法が考えられる。

（2）入力情報が不足していて、追加情報を得るための再観測の必要性の頻度が高いような場合とか、またシステム全体の特性が十分把握しきれていない初期のファジィルールチューニング時期において、各専門家によってもファジィルールの記述にバラツキがあり、整合性がとれない場合がある。

そのような場合において従来のグレードを中心にした面積や高さの重みづけにより推論を行う方式は分析収束思考法に適した推論である。この推論方法は試行錯誤的にルール、メンバーシップ関数を与えざるを得ない動的システム環境において必ずしも最適とは言えない。今回提案したあいまいな情報量の大きいものに重みづけを行った推論方式の方が拡散思考法に適した推論であり、試行錯誤の多いシステム環境下において仮説設定が必要な現状により適した推論方法であると考えられる。（例えば新しい試みのためのルール、メンバーシップ関数設定によるファジィエントロピーに基づく推論値が、中心指向の平均的な演算による従来の推論値とかけはなれても、新しい試みのためとしてルール、メンバーシップ関数を従来と同等に評価することである。）

（3）ファジィエントロピーに基づくファジィ推論方式は中間グレードレベルを考慮した推論である。

例えば、図形とか文字等のパターン認識をファジィ推論技術で解決しようとしたとき、従来におけるある種のパターン認識方式は対象物である図形や文字を大局的に判断する場合フィルター等で意図的にぼけさせて、パターンマッチングを行っていた。今回のこの方式は大局的に判断する場合、対象物を直接的にぼけさせないで、推論部という対象物を認知推論するレンズの如きものを重らせることにより間接的に対象物に対してぼけの効果を生成するものである。あいまいな情報量を重みとして、推論を行うことにより、パターンマッチングの範囲を狭め、ある程度狭まったとき、従来のグレード中心とした重みづけを行う推論方式に切り換えることにより、トータルとしてパターンマッチングの計算時間を減らす効果があると考えられる（明らかに対象物を直接的にぼけ作用を行うフィルターリングの計算時間が減る）。

5．おわりに

通常のファジィ推論方式のように中心指向の平均的な演算による推論値の算出でなく、あいまいな事象の生起によって発生する平均情報量の大きさを結論部メンバーシップ関数合成後の非ファジィ化演算の重みとして採用し、推論値を算出する方法である。

従来の推論方式はメンバーシップ関数のグレードをベースにした外延的、還元的方法であり、静的なシステム環境に適した方法である。今回提案した方式は「あいまいな情報の価値＝あいまいな情報量」をベースにした内包的、合成的方法であり、動的なシステム環境下において適した方法である。

なお、将来の展望としてこの方式についての用途はファジィ多段推論を実行するときに生じるあいまいさの爆発の程度を計量的に評価しながら推論を行なう方式としての応用が考えられる。

今後の課題として、本方式を多段推論適用するアルゴリズムについての考察する予定である。

6．参考文献

[1] 本多　：　ファジィ・エントロピーとはなにか，数理科学No.294,DECEMBER PP.54-61(1987)

[2] R. R. Yager　：　On the measure of fuzziness and negation Part I
: Membership in the unit interval , Int . J of General Systems,5,pp.221-229(1979)

[3] A. De Luca &S.Termini　：　A definition of a nonprobabilistic entropy in the setting of Fuzzy sets theory,Information and Control,20,PP.301-312(1972)

[4] A. Kaufmann　：　Introduction to the Theory of Fuzzy Subsets,Academic Press(1975)

[5] 水本　：　ファジィ推論法による補間，第５回「ファジィ・システムシンポジウム」，461-466(1989)

[6] 水本　：　わかりやすいファジィ理論Ⅲ，コンピュートロール２８，コロナ社(1989)

[7] 水本　：　ファジィ理論とその応用，サイエンス社，1988

[8] シャノン　：　コミュニケーションの数学的理論、明治図書，1969

[9] 渡辺　：　知識と推測（上），（下），東京図書，1987

[10] 渡辺　：　知るということー認識学序説，東大出版会，1988

[11] 月本　：　命題論理の幾何的モデル、情報処理学会論文誌第３１巻６号783-791 (1990)

[12] 日比野：　プラノロジーと創造性（イメージ力は知識より重要）：日経メカニカル6.11, 96-102(1990)

[13] 三隅，清水　：　低吸水無機質軽量発砲体焼成炉のファジィ適応制御，化学工学会山口大会論文集165-168 (1990)

7．附録

［1］４の例題におけるファジィエントロピー法の計算の詳細を示す。

Ａ１、Ａ２のファジィ集合の要素を以下の通りとする。

（各要素は出力範囲を５きざみ単位に対応させたグレードについて仮定する）

$$A_1 = \frac{0.25}{25} + \frac{0.5}{30} + \frac{0.75}{35} + \frac{1}{40} + \frac{0.75}{45} + \frac{0.5}{50} + \frac{0.25}{55}$$

$$A_2 = \frac{0.0625}{45} + \frac{0.125}{50} + \frac{0.1875}{55} + \frac{0.25}{60} + \frac{0.3125}{65} + \frac{0.375}{70} + \frac{0.4375}{75} + \frac{0.5}{80} + \frac{0.5625}{85} + \frac{0.625}{90}$$
$$+ \frac{0.6875}{95} + \frac{0.75}{100} + \frac{0.8125}{105} + \frac{0.875}{110} + \frac{0.9375}{115} + \frac{1}{120} + \frac{0.9375}{125} + \frac{0.875}{130} + \frac{0.8125}{135} + \frac{0.75}{140}$$
$$+ \frac{0.6875}{145} + \frac{0.625}{150} + \frac{0.5625}{155} + \frac{0.5}{160} + \frac{0.4375}{165} + \frac{0.375}{170} + \frac{0.3125}{175} + \frac{0.25}{180} + \frac{0.1875}{185} + \frac{0.125}{190} + \frac{0.0625}{190}$$

上記データをもとにしてファジィエントロピー計算を行うと以下の通りである。

タイプ ＼ 種類	YAGER	De Luca & Termini
A1 (type I)	4	5．4
A2 (type I)	16	23．4

ファジィエントロピーをもとに推論値の計算を行うと以下の通りである。

（1）ファジィエントロピー法（1）（ＹＡＧＥＲ測度）

$$\frac{40\times 4 + 120 \times 16}{4+16} = 104.0$$

（2）ファジィエントロピー法（2）（ＹＡＧＥＲ測度）

$$\frac{40\times 4 \times 40 + 120 \times 16 \times 160}{4 \times 40 + \times 16 \times 160} = 115.3$$

（3）ファジィエントロピー法（1）（De Luca & Termini ）

$$\frac{40\times 5.4 + 120 \times 23.4}{5.4 + 23.4} = 105.0$$

（4）ファジィエントロピー法（2）（De Luca & Termini ）

$$\frac{40\times 5.4 \times 40 + 120 \times 23.4 \times 160}{5.4 \times 40 + 23.4 \times 160} = 115.6$$

なお、従来法（面積法、高さ法、重心法）については紙面の都合上省略する。

［2］例題

第６図に示すような系統のタンクの水位制御をファジィ制御によって行う場合を考える。

（新型転換炉ふげん発電所「ファジィ制御とは」パンフレットから例を引用）

・制御ルール

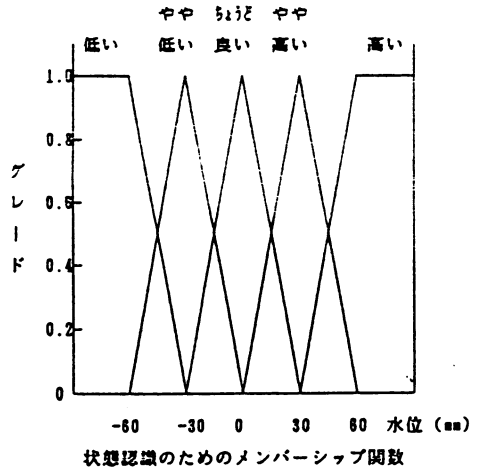
ルール１：もし、水位が低ければ、弁を開ける。

ルール２：もし、水位がやや低ければ、弁を少し開ける。

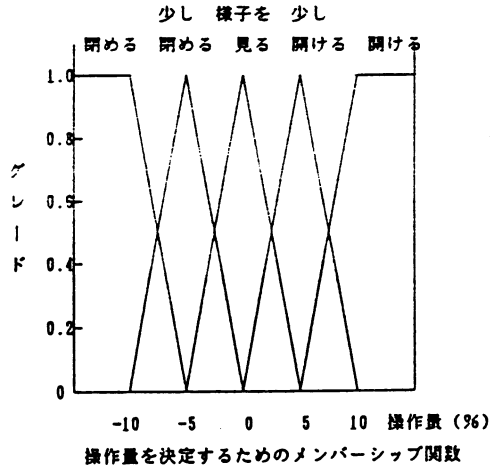
ルール３：もし、水位が丁度良ければ、弁を動かさず様子を見る。

ルール４：もし、水位がやや高ければ、弁を少し閉める。

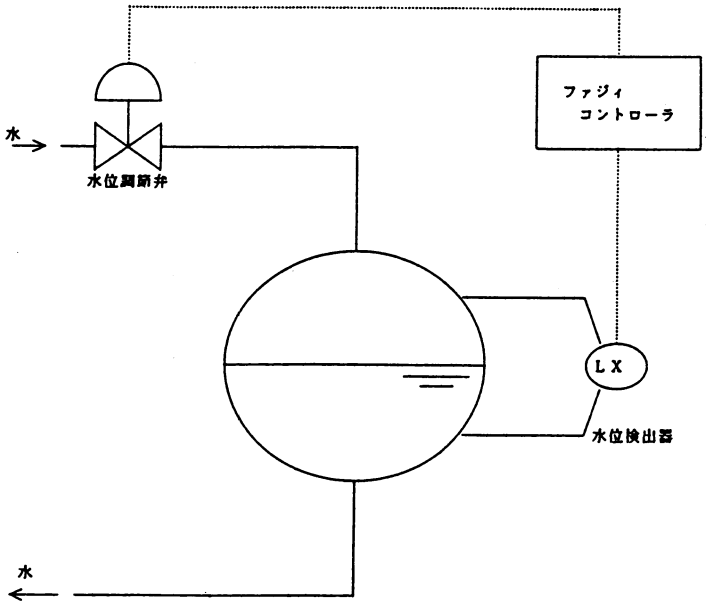
ルール５：もし、水位が高ければ、弁を閉める。



状態認識のためのメンバーシップ関数

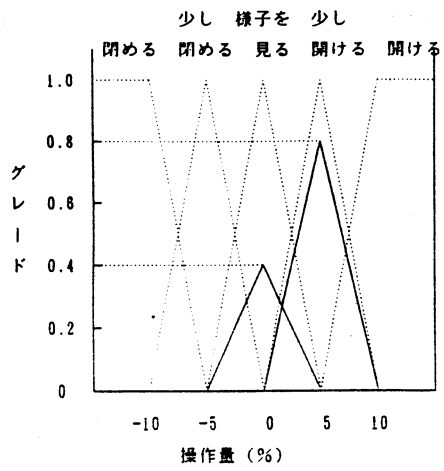


操作量を決定するためのメンバーシップ関数



－　第６図　－　　タンク水位制御系統図

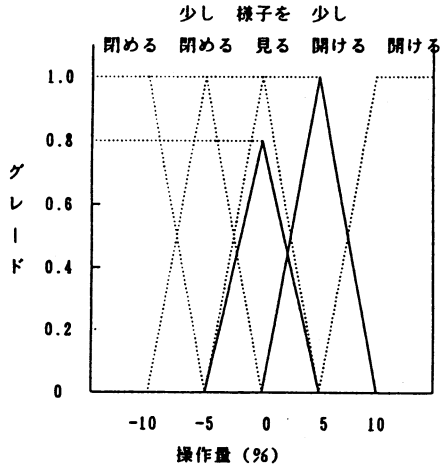
(1)



操作量を決定するためのファジィ量の合成

推論方法	推論値
面積法	3．3
高さ法	3．3
重心法	3．5
ファジィエントロピー法(1)（YAGER測度）	2．9
ファジィエントロピー法(2)（YAGER測度）	2．9
ファジィエントロピー法(1)（De Luca & Termini）	2．7
ファジィエントロピー法(2)（De Luca & Termini）	2．7

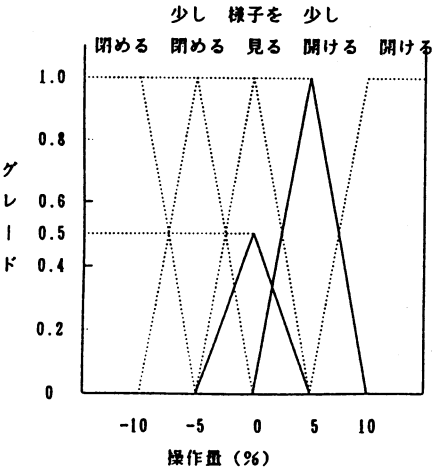
(2)



操作量を決定するためのファジィ量の合成

推論方法	推論値
面積法	2．8
高さ法	2．7
重心法	2．8
ファジィエントロピー法(1)（YAGER測度）	2．3
ファジィエントロピー法(2)（YAGER測度）	2．3
ファジィエントロピー法(1)（De Luca & Termini）	2．3
ファジィエントロピー法(2)（De Luca & Termini）	2．3

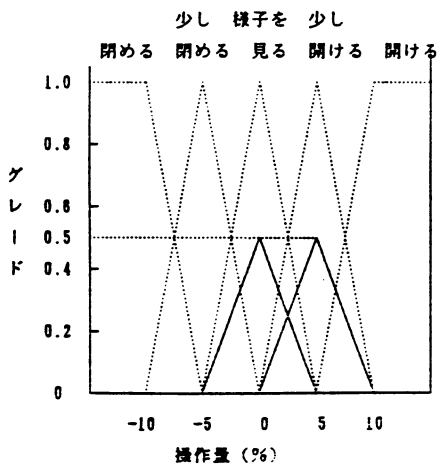
(3)



操作量を決定するためのファジィ量の合成

推論方法	推論値
面積法	3．3
高さ法	3．3
重心法	3．5
ファジィエントロピー法(1)（YAGER測度）	2．4
ファジィエントロピー法(2)（YAGER測度）	2．4
ファジィエントロピー法(1)（De Luca & Termini）	2．4
ファジィエントロピー法(2)（De Luca & Termini）	2．4

(4)



操作量を決定するためのファジィ量の合成

推論方法	推論値
面積法	2．5
高さ法	2．5
重心法	2．5
ファジィエントロピー法(1)（ＹＡＧＥＲ測度）	2．5
ファジィエントロピー法(2)（ＹＡＧＥＲ測度）	2．5
ファジィエントロピー法(1)（De Luca & Termini）	2．5
ファジィエントロピー法(2)（De Luca & Termini）	2．5

問い合わせ先　：　〒７５５　山口県宇部市相生町８－１（興産ビル７Ｆ）
宇部興産㈱経営企画本部情報システム部システム企画第二グループ
清　水　昭　雄
TEL 0836-31-1116（ダイヤルイン）　FAX 0836-31-7235

TB2-3

連想記憶システムを用いたファジィ推論

FUZZY INFERENCE WITH AN ASSOCIATIVE MEMORY SYSTEM

山口　亨　　高木友博　　銅谷賢治
Toru YAMAGUCHI, Tomohiro TAKAGI, and Kenji DOYA
技術研究組合　国際ファジィ工学研究所、　東京大学
LIFE: Laboratory for International Fuzzy Engineering Research, TOKYO University

Abstract : To take Learnnig functions into consideration, this paper proposes a new fuzzy knowledge representation. This knowledge representation has connection rates between each ideal consept and each actual concept. This paper also proposes a high speed fuzzy inferenc method for that knowledge reprensation with an associative memory system. This paper discusses that inference method's characterstics, and showes that inference method isn't useful only for previous fuzzy knowledge representations but also for some new type representations.

1．はじめに

ファジィ理論[1]に基ずく知識表現は、その特徴である人間への親和性の高さからファジィ制御を中心として広く用いられている。これらのファジィ知識を適用した制御・診断・意思決定・予測の分野では、その知識獲得の問題が重要であり、知識の洗練や学習を自動化する研究[2][3]が活発化している。ファジィ推論は、ファジィ条件命題で表現されたファジィ知識から多値論理に基ずく演繹的な論理で近似推論する手法[4]である。従来型の推論法では、学習を考慮した帰納的な要因を知識表現やその推論へ付加することが難しい。ここでは、学習を考慮した知識表現とその推論をニューラルネットの連想記憶システムを用いることで実現する手法を提案する。また、従来手法との比較を行いその特徴を明確化する。さらに、連想記憶システムを用いることで新たに加わった機能についても検討を行う。

2．学習を考慮した知識表現とファジィ推論

ファジィ知識表現は、ファジィ集合を用いることで人間への親和性の高いものとなっている。その一例を以下に示す。

Rule 1: I f (x is Big),
t h e n (y is Small). …… (1)

ここで、Big, Smallはメンバシップ関数で特徴付けられるファジィ集合であり、それぞれ、入力xに対して「大きい」というファジィ概念、出力yに対して「小さい」というファジィ概念を示す。ここで、大きいと言う概念"Big"や小さいと言う概念"Small"の理想があまり明確でない場合は、仮の概念を設定しておき、学習により洗練していくことを考える。

2.1 知識表現

以下に学習を考慮した知識表現を示す。

Rule i: (I f (x1 is Ai1 with Cxi1)&‥&
(x j is Aij with Cxij)&‥&
(x r is Air with Cxir),
t h e n y is Bi with Cyi) with Cri,
(j = 1～r, i = 1～n). …… (2)

ここで、xjはルールへの入力、yは出力で、Aij, Biは(1)式と同様にファジィ集合である。各命題に対しCxij, Cyi, Criをwithで帰属する。これは新たに知識表現に加えたもので「関連度（Connection）」と呼ぶ。関連度はそれらの命題の理想とする概念と現在の概念との関連を仮定するもので、［0, 1］の実数で表現する。Cxijは、命題の学習による変動要素であるAijの概念と学習による理想の概念であるAij*との関連を仮定する。同様に、Cyiは命題中で学習による変動要素であるBiと理想のBi*との関連を仮定する。Criはルールiにおける前件部の命題と後件部の命題の関連を仮定する。これらは現在の概念と理想の概念が一致すると考えれらる場合は1、逆に現在の概念と理想の概念が全く異なる場合は0となる。関連度は、それぞれの概念が学習により洗練され、修正されるに従って変動する。関連度は真理値に近いものであるが、学習後の理想が必ずしも1になる必要はない。学習後の理想的なファジィ条件命題では、関連度が0で無関係となりその命題自体が消えても問題はない。また、関連度は推論における利用のされ方が真理値とは異なる。

(2)式における知識表現では、後件部の命題として"y is Bi"を用いているが、高木・菅野のファジィモデル形式の知識表現に見られる"y = fi(x)"と置き換えても同様である[5]。ここで、x = [x1, ‥, xr]^{T}は入力ベクトル、fi(・)は入出力関係を記述する関数である。このファジィモデル表現を用いる場合は(1)式の関連度Cyiは現在のfiと理想のfi*の関連を仮定する。

2.2 推論法

推論の例として次に示すもの取り上げる。

前提1 P^+ : " x is A^+ "
前提2 $P_1 \rightarrow Q_1$: " (if x is A_1 with C_{x1}
then y_1 is B_1 with C_{y1}) with C_{r1} "
:
$P_n \rightarrow Q_n$: " (if x is A_n with C_{xn}
then y_n is B_n with C_{yn}) with C_{rn} "
結論 C : " y is B^+ " …… (3)

上述のルールでは、ファジィ条件命題が１つ（(2)式のルールにおけるｊ＝１）の場合の例である。ｘに関する命題において添え字ｊを省略する。前提１は入力を示し、前提２は銘記されたファジィルールである。これらのルールはｏｒ的な関係にあると仮定する。従来のファジィ推論では多値論理に基づき演繹的に各命題の真理値が演算され、最終的に後件部の命題の真理値が求められ、これらを合成（ｏｒ）し結論を得る。ここで提案する推論法では、ニューラルネットの連想記憶を用いて並列演算により各命題の真理値を高速に求める。各命題においてその連想により得た真理値との関係を以下の様に仮定する。

”　”現在の命題”　ｉｓ　連想による真理値”：＝
”　”理想の命題”　ｉｓ　理想の命題の真理値”
……　(4)

ここで、「理想の命題」、「理想の命題の真理値」は未知であるため、既知の「現在の命題」、「連想による真理値」で間接的に近似する。この近似における各命題の真理値は、関連度Ｃxij、Ｃyi、Ｃriにより構成する連想記憶を用いて高速に並列処理される。つまり連想機能を用いて以下の各命題の真理値が高速に並列処理される。

”　”ｘ　ｉｓ　Ａi”　ｉｓ　$\tau x(P^{+}, t)$”＝
”　”ｘ　ｉｓ　Ａi*”　ｉｓ　$\tau x^{*}(Pi)$”
……　(5)

”　”ｙ　ｉｓ　Ｂi”　ｉｓ　$\tau yi(P^{+}, t)$”＝
”　”ｙ　ｉｓ　Ｂi*”　ｉｓ　$\tau yi^{*}(Qi)$”
……　(6)

ただし、$\tau x(P^{+}, t)$、$\tau yi(P^{+}, t)$はそれぞれｘの命題、ｙの命題に関する連想記憶によって求めた真理値である。Ｐ⁺は与えられた入力条件、ｔは連想における反響回数を示す。推論においてｔが多いほどあいまいさの少ない結果が得られる。ｔは推論におけるある種のパラメータである。また$\tau x^{*}(Pi)$、$\tau y^{*}(Qi)$はそれぞれｘの理想の命題、ｙの理想の命題に関する未知の真理値を示す。(6)式より、結論Ｃは次式で近似できる。

”ｙ　ｉｓ　Ｂ⁺”　＝
$\underset{i=1\sim n}{U}$(”　”ｙ　ｉｓ　Ｂi”　ｉｓ　$\tau yi(P^{+}, t)$”)
……　(7)

ただし、上式でＵはｏｒを示す。また、ファジィモデル型の知識表現では(7)式は入出力関数ｆiの真理値による重み合成となる。

2.3 命題の真理値を並列処理する連想記憶

上述の真理値を、関連度による並列処理で求める連想記憶として、ＢＡＭ（Bidirectional Associative Memories）[6]に代表されるニューラルネットの反響動作（に伴う状態推移）をもつ連想記憶システムを利用する。連想記憶は、入力が与えられた場合、銘記されている記憶から最も近い記憶を想起する。図１にＢＡＭの一例を示す。２層のニューロンが相互に結合するネットワークを形成する。これらの結合の強さをマトリクスＭで表し相関マトリクスと呼ぶ。相関マトリクスＭがＸ，Ｙ層に対しパターンｘ，ｙのペアを銘記しているとする。Ｘ層にノイズのはいったｘ”が与えられても相関マトリクスＭを用いた反響動作に伴う状態推移で最終的にｘ，ｙのペアが想起される。ＢＡＭはこの想起の過程で、ある種のファジィエントロピーを最小化することが知られている。

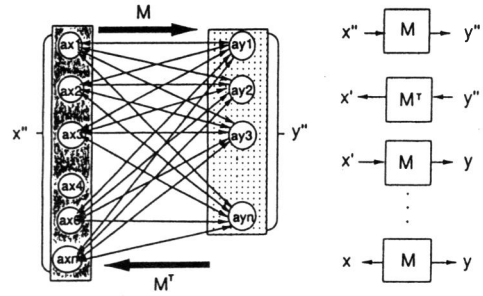


図１．ＢＡＭネットワーク

ＢＡＭの想起時の反響の演算は次式で与えられる。

$Yt = \phi(MXt)$
$Xt+1 = \phi(M^{T}Yt)$　……　(8)

ただし、$Xt = [ax1, ax2, \cdots, axm]^{T}$，$Yt = [ay1, ay2, \cdots, ayn]^{T}$はｔステップにおける各ニューロンの活性値ベクトルである。また、$\phi(\cdot)$は各ニューロンがもつ量子化関数で、入力を適当なしきい値を用いて｛０，１｝に変換する。量子化関数にはシグモイド関数がよく用いられる。各命題の真理値は、この活性値ベクトルを正規化することで得られる。

ここで、銘記したいパターンのペアが、(ｘ1, ｙ1), …, (ｘn, ｙn)で与えられた場合、相関マトリクスＭは次式で得られる。

$M = \sum_{i=1\sim n} x_i^{T} y_i$
$M^{T} = \sum_{i=1\sim n} y_i^{T} x_i$　……　(9)

ただし、パターンのペアは［－１，１］のバイポーラへ変換し用いる。さらにＢＡＭの学習方法としては、Ｈｅｂｂ学習則が有効である。

1)ＢＡＭの組み合せによるファジィ推論

ＢＡＭの特徴として、銘記するパターンのペア間が直行性が強く、かつ、それらのペアパターンとペアパターンのコンプリメントが似ていない必要がある。このため、図２に示すようなＢＡＭを組み合わせた構成が提案されている[2]。

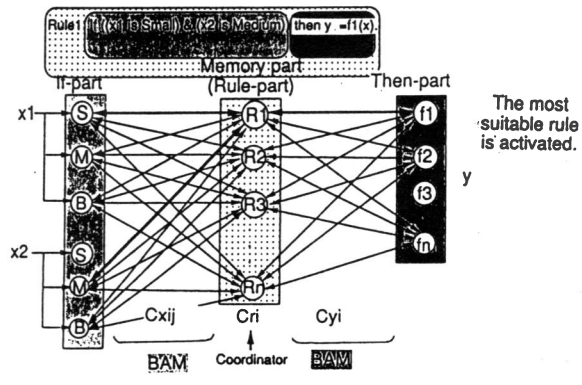


図２．ＢＡＭの組み合せによるファジィ推論

図左は、ｉｆ部の命題を代表するニューロンで、ｘを特徴付けるメンバシップ関数を代表する。Ｓ，Ｍ，Ｂはそれぞれ、Small，Medium，Big を示す。図右は、

ｔｈｅｎ部の命題を代表するニューロンで、ｙと特徴付けるメンバシップ関数や（ファジィモデル型の知識表現における）入出力関数を代表する。図では、ｆｉは入出力関数を示している。中央はファジィルールを代表するニューロンでＲｉで示す。この基本的な考え方は、「ファジィルールの上位概念が、ｉｆ部とｔｈｅｎ部の２つの属性をもつ」としている点である。このため、図左のｉｆ部と図中央のファジィルール部の相関、ファジィルール部と図右のｔｈｅｎ部の相関に分けＢＡＭを用いていて表現する。ファジィルールは、量子化されているために、上述のＢＡＭにおける良好な想起の条件を満足する。また、中央のファジィルール部には、コーディネータの役目があり、互いに他のルールを抑える結合がある。

（エンコーディング）

(2)式の知識表現で新たに採用された関連度を用いてこの相関マトリクスを得る。ｉｆ部とファジィルールの相関マトリクスに関連度Ｃxijを用いる。記憶するパターンのペアをバイポーラに変換する。（ｘ，ｙ）のペア数はルール数ｎと一致する。ｉｆ部のパターンｘに対しＣxij倍してパターンｘとし、(9)式を用いて相関マトリクスをコーディングする。ファジィルール部とｔｈｅｎ部の相関には、パータンｙを関連度Ｃyi倍する。ファジィルール部では関連度Ｃri倍でコーディネータの結合を行う。図２のルール１の例では、Ｓ－Ｒ1間がαＣx11で、Ｍ－Ｒ1とＢ－Ｒ1間は$-\alpha$Ｃx11で結合する。また、Ｒ1とＲ2からＲn間は$-\beta$Ｃr1でＲ1－Ｒ1としてβＣr1で結合しコーディネータとする。さらに、Ｒ1－ｆ1間はγＣy1で、Ｒ1とｆ2からｆｍの間は$-\gamma$Ｃy1で結合する。ただしα、β、γは係数である。

（推論）

推論は、ある種のデコーディングと考えられる。ここでは(8)式で示したＢＡＭと同様な反響動作で推論を行う。反響動作は入力側から出力側、出力側から入力側へとｔステップ繰り返し行う。このときの各ニューロンの活性値を正規化したものがそれらの命題の真理値となる。

2)ＭＡＭ（Multidirectional Associative Memory）によるファジィ推論

ＢＡＭは双方向の連想を行うのに対し、ＭＡＭ[7]は複数方向の連想が可能なようにＢＡＭを拡張したものである。ここでは、ＭＡＭを用いてファジィ推論を行う連想記憶システムを図３のように提案する。図３では、入力がｘ1、ｘ2、出力がｙの例である。各ニューロンは前述のＢＡＭと同様にそれぞれのメンバシップ関数や入出力関数を代表する。ＭＡＭでは、前述の従来型の知識表現の他に、if A then B, if B then C, if C then A. というようなリカレントな知識表現に有効である。ここではＭＡＭの例として、従来型のファジィ知識表現におけるｘ1，ｘ2，ｙの３要素を考える。ＢＡＭを用いた方法とは異なり、「これらの３つの属性ｘ1，ｘ2，ｙでファジィルールの概念を分散表現する」と考え、マップ表現を用いてファジィルールを示す。ここで、それら３つをそれぞれＡ層、Ｂ層、Ｃ層とし、銘記する３つのペアを（ａｉ，ｂｉ，ｃｉ）、ペア数をｎとする。この場合、ペア数はルール数と一致する。ＢＡＭと同様にこれらのパターンをバイポーラに変換する。

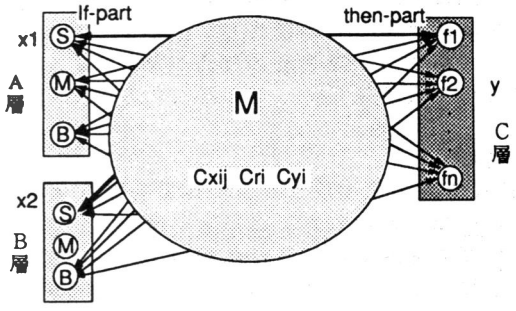


図３．ＭＡＭによるファジィ推論

（エンコーディング）

関連度が１の場合はＭＡＭのコーディングと同様に相関マトリクスＭを得る。関連度Ｃxij，Ｃyi，Ｃriを各ルールのペアパターンに乗算し、それをペアパターン（ａｉ，ｂｉ，ｃｉ）として用いる。ｘに対しＣxijを、ｙに対しＣyi＊Ｃriを乗算しペアパターンとする。ＢＡＭと同様に(9)式のｘｉ、ｙｉ に対し（ａｉ，ｂｉ），（ｂｉ，ｃｉ），（ｃｉ，ａｉ）を与えて相関マトリクスＭを得る。

（推論）

推論は(8)式で示したＢＡＭと同様な反響動作で行う。反響動作はＡ層からＢ層、Ｂ層からＣ層、Ｃ層からＡ層へと循環させながらｔステップ繰り返し行う。このときの各ニューロンの活性値を正規化したものがそれらの命題の真理値となる。

3)連想記憶の新しい推論機能

上述の２つの例では相関マトリクスを「関連」ととらえてエンコーディングした。連想記憶では、その他に”Ａ→Ｂ→Ｃ→Ａ”と時系列に変化するファジィ概念を銘記することが出来る。この場合は関連度Ｃは、因果関係（事象の前後関係）や時系列のリズム発生に関する知識となる。

（エンコーディング）

因果関係（事象の微分の関係）と考えてＢＡＭと同様に銘記する。これらはＦＣＭ（Fuzzy Cognitive Map）[8]で構成する。また、その学習方法として微分Ｈｅｂｂ則[9]が有効である。さらに、リズム運動を銘記するには、リカレントネットワークのＢＰ学習則を用いるＡＮＯ（Adaptive Neural Osillator）[10]が有効である。

（推論）

推論はＭＡＭと同様にファジィ概念のマップ上を循環させ実現する。ｔは時刻を表現し、各命題の真理値は時刻ｔに依存する。

2.4 推論を実現する連想記憶の能力

これらの連想記憶は事項を回路網全体に分散し多重化し銘記するため、銘記の事項がある程度多くなると記憶の破壊が発生する[11]。このため、良好な推論を実現するためには、ニューロン数やニューラルネットの構成を考慮し銘記方法を工夫する必要がある。構造の制約から1)のＢＡＭを組み合わせたものが、従来型

の推論を最も良好に模擬する。入力条件に最も近いルールが想起される。一方、リカレントな知識など自由な知識表現を望む場合は、2)のＭＡＭの利用や3)の新しい推論など、マップ表現を用いた知識の分散多重化表現を利用することが望ましい。前述の2)、3)になるに従って自由な知識表現の度合が増える。しかし、銘記方法の工夫は逆に2)、3)の順で増加する。

3．例題

(3)式で、ルール数ｎ＝３の例題を取り上げる。

3.1 推論におけるあいまいさの推移

連想型の推論では反響動作回数ｔによって真理値が状態推移する。以下に関連度が１に於ける例を示す。

1)推論１（条件に合致する例）

ここでは、入力条件としてルール１に合致する場合のｔｈｅｎ部の真理値の状態推移を示す。

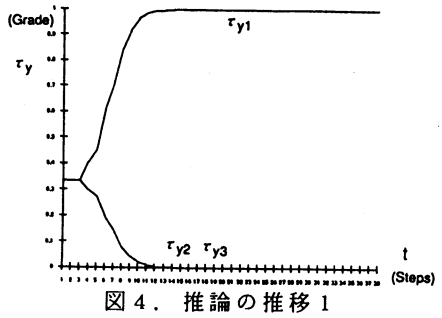


図４．推論の推移１

2)推論２（条件にあいまいに合致する例）

入力条件があいまいに合致する場合（ルール１＞ルール２＞＞ルール３）の真理値の状態推移を示す。

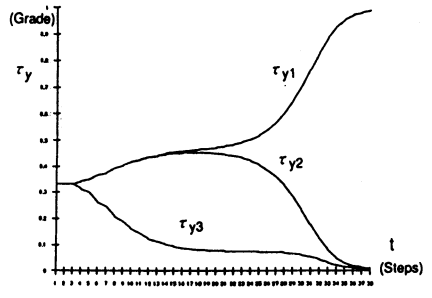


図５．推論の推移２

3.2 推論における学習や関連度の効果

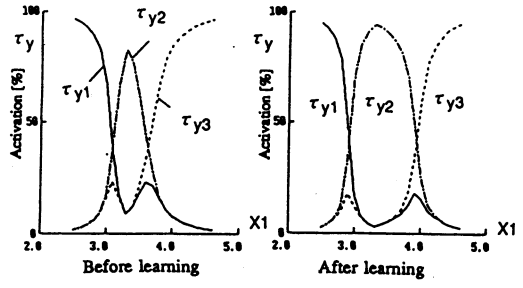


図６．関連度の変化と推論

学習によってＣy2が変化する場合の入力条件ｘ1に対するｙの真理値を示す。（推論パラメータｔは固定。）

4．考察

図４と図５より、入力条件に最も近いルールが最終的に想起される。この過程は、あいまいさの量（ある種のファジィエントロピー）を減少させる。連想型のファジィ推論ではあいまいさの量を制御できる。このため、多段推論時のあいまいさの制御も可能である。連想の各ニューロンはそれぞれの命題を代表しており、この命題の内部に同様な構造を内蔵できるため、構造的にも多段推論が可能である。また、各命題の真理値の演算は連想記憶上の分散処理であるため高速な推論が可能である。

図４と図５を比較すると、入力条件に応じて想起の速度が変化する。この例では入力条件に100％合致する立ち上がりステップｔ$_0$の約３倍のステップ数の真理値が従来型の真理値と近い値となる。立ち上がりの速度の違いを利用して従来型の各種の推論値を模擬できる。

図６では、学習後に関連度Ｃy2が増加した影響でルール２の真理値のエリアが増加している。

5．おわりに

ここでは、学習を考慮したファジィ知識表現とそれに適した推論法を提案した。また、従来の推論法との関連を示した。さらに、この推論法の特徴として、1)連想記憶による並列処理で高速な推論が可能、2）多段推論で問題となるファジィエントロピーの増大を制御できる、3)時間的推移、因果関係、時系列のファジィ知識などを表現できる新たな推論機能をもつことがわかった。

今後はこの方式を、学習を考慮した高速な推論として、ファジィ情報処理の分野に適用して行く。

本研究の連想記憶について有益な助言を頂きました東京大学・吉澤修治先生、矢内浩文氏に感謝致します。

参考文献

(1) Zadeh, L. A.: Fuzzy sets. Information and Control, vol. 8, 338-353, (1965).
(2) 山口・今崎・春木：連想記憶によるファジールールの推論・学習方式、電気学会論文誌Ｃ、110巻、３号、207-215, (1990).
(3) 山口・田鍋・村上：ＬＶＱ教師なし学習を用いたファジィ制御、計測自動制御学会第15回システムシンポジウム・第10回知識工学シンポジウム合同シンポジウム予稿集、40-45, (1989).
(4) 寺野・浅居・菅野：ファジィシステム入門、（株）オーム社、(1987).
(5) Takagi, T. & Sugeno, M.: Fuzzy Identification of Sysyems and Its Applications to Modelling and Control. IEEE Trans. SMC15-1, 116-132, (1985).
(6) Kosko, B.: Adaptive Bidirectional Associative Memories. Applied Optics, vol. 26 No.23, 4947-4960, (1987).
(7) Hagiwara, M.: Multidirectional Associative Memory. Proc. of Int. Joint Conf. on Neural Networks IJCNN-90-WASH-DC, II-13, (1990).
(8) Kosko, B.: Fuzzy Cognitive Maps. Int. Jour. of Man-Machine Studies, vol.24, 65-75, (1986).
(9) Kosko, B.: Differential Hebbian Learning. in Amer. Inst. of Physics Conf. Proc., Newral Networks for Computing, J. S. Denker, Ed., 277-282, (1986).
(10) 銅谷・吉澤：神経回路網における運動パターンの記憶、電子情報通信学会研究報告MBE87-141, 293-300, (1988).
(11) Amari, S. & Maginu, K.: Statistical neurodynamics of associative memory. Neural Networks, 1(1), 63-73, (1988).

TB3-1

ラフ集合による情報システムの縮小化とそのファジィ・エキスパート・システムへの応用

Reduction of Information Systems Based on Rough Sets and Its Application to Fuzzy Expert Systems

田中　英夫　Hideo Tanaka
石渕　久生　Hisao Ishibuchi
松田　信義　Nobuyoshi Matsuda

大阪府立大学工学部　University of Osaka Prefecture
川崎医科大学　Kawasaki Medical College

ABSTRACT

In this paper, a method of constructing fuzzy if-then rules in an expert system is described by the proposed approach, where the lower approximations in rough sets are used to extract if-then rules from the given information systems and fuzzy if-then rules are constracted from the if-then rules.

1．まえがき

ラフ集合は1982年に Z.Pawlak[1] により提案され，エキスパートによる分類をデータによる同値類によって評価することができる。したがってラフ集合の応用として，Z.Pawlak[2] は心臓病に関する医者の判断と患者の検査データとの整合性の解析を行っている。また A.Mrozek[3] はラフ集合の概念を用いてif-thenルールを構成し，ルールによる制御をセメントキルンのプロセスに適用している。

患者の検査データのようなデータ・ベースを情報システムと呼び，データの属性の数を低減化する研究が Z.Pawlak[2] によって行われている。これはデータ構造から決まる同値類だけでなされるので，Z.Pawlak の方法では属性の数を低減させる程度が十分でない。それゆえ，本論文ではエキスパートによる分類とデータによる同値類とを考慮した新しい属性の簡略化の方法を提案し，この低減化法の性質について議論し，これによる if-thenルールの構築を行う。すなわち，if-then ルールの前件部をファジィ集合にし，ファジィ推論による肝臓病の医療診断エキスパート・システムを構築している。

2．ラフ集合と情報システム

2.1ラフ集合

ここでは Z.Pawlak[2] によるラフ集合の概念を説明する．U を全体集合とし，R を U×U上の同値関係とし，A=(U,R) を近似空間という．また R は識別不能関係とも呼ばれ，もし x,y∈U かつ (x,y)∈R ならば，x と y とは A において識別不能であるという．R の同値類を A の基本集合という．ただし，空集合は基本集合である．また，A の基本集合の有限個の和集合を A の定義可能集合という．

X を U の部分集合とし，X を含む A の最小の定義可能集合は A における X の上からの近似といい，これを $A^*(X)$で表す．同様に X に含まれる A の最大の定義可能集合を A における X の下からの近似といい，これを $A_*(X)$で表す．また

$$B(X)=A^*(X)-A_*(X) \tag{2.1}$$

を A における X の境界集合という．ただし，A-B は集合 A と B との差集合を表す．

以上の定義を説明するために Fig.1の例について述べる．Fig.1は U が R によって16個の基本集合 $E_1,..,E_{16}$ に分けられたものである．このとき，

$$A^*(X)=E_1 \cup \cdots \cup E_{12} \tag{2.2}$$

$$A_*(X)=E_6 \cup E_7 \tag{2.3}$$

$$B(X)=E_1 \cup \cdots \cup E_5 \cup E_8 \cup \cdots \cup E_{12} \tag{2.4}$$

である．すなわち (2.2),(2.3)式は次のように定義できる．

$$A^*(X)=\{E_i \mid E_i \cap X \neq \phi\} \tag{2.5}$$

$$A_*(X)=\{E_i \mid E_i \subset X\} \tag{2.6}$$

近似空間 A=(U,R) における集合 X の近似の精度を次式で定義する．

$$\alpha_A(X)=Card(A_*(X))/Card(A^*(X)) \tag{2.7}$$

ただし，Card(X) は集合 X の要素の数である．定義(2.7)式から明らかに $0 \leq \alpha_A(X) \leq 1$ であり，もし X が A の定義可能集合ならば $\alpha_A(X)=1$ となり，Xは近似空間 A で完全に表現できる．$\alpha_A(X)$ の値が大きいほど近似の精度がよい．

X_i を U の部分集合とし，$F=\{X_1,...,X_n\}$ を U の部分集合の族とする．ただし，F は U の直和分割とする．このとき，F は U の分類と呼ばれ，X_i は F のクラスという．いま，A における F の上からの近似と下からの近似をそれぞれ次のように定義する．

$$A^*(F)=\{A^*(X_1),...,A^*(X_n)\} \tag{2.8}$$

$$A_*(F)=\{A_*(X_1),...,A_*(X_n)\} \tag{2.9}$$

A における分類 $F=\{X_1,...,X_n\}$ の近似の精度を(2.7)式と同様に次のように定義する．

$$\beta_A(F)=Card(\bigcup_{i=1}^{n} A_*(X_i))/Card(U) \tag{2.10}$$

すべての X_i が A の定義可能集合ならば $\beta_A(F)=1$ となり，分類 F は近似空間 A で完全に表現できる．

2.2 情報システムとその縮小化

いま，情報システムを S=(X,Q,V,φ,F)で表す．ただし，X は対象の集合，Q は属性の集合，V は属性値の集合，φは φ:X×Q→V の記述関数，F は専門家によって与えられる分類である．なお，φはデータ・ベースの表として与えられる．

情報システム S の例[2] を Table 1 に示す．Table 1 において，

$X=\{x_1,...,x_6\}$, $Q=\{q_1,...,q_4\}$

$V=\bigcup_{q \in Q} V_q$; $V_{q1}=V_{q2}=V_{q3}=\{0,1\}$, $V_{q4}=\{0,1,2\}$

であり，φは Table 1 に示されているデータ・ベースである．

x_i と x_j とが q に関して識別できないことをφ

$(x_i,q)=\phi(x_j,q)$ と定義し，これを同値関係 $\widetilde{q}$ を用いて $(x_i,x_j)\in\widetilde{q}$ と表す．x_i と x_j とが Q の部分集合 P に対して識別できないことを $(x_i,x_j)\in\widetilde{P}$ と表し，これは

$$\widetilde{P}=\bigcap_{q\in P}\widetilde{q} \qquad (2.11)$$

と表すことができる．特に P=Q のとき，$(x_i,x_j)\in\widetilde{Q}$ ならば x_i,x_j とは情報システム S において識別できないことになる．

$\widetilde{q}$ は同値関係であるので，これによる X の分割を商集合といい，これを

$$X/\widetilde{q}=\{[x_i]\mid x_i\in X\} \qquad (2.12)$$

と表す．Table 1 の例では，たとえば

$$X/\widetilde{q_4}=\{[x_1],[x_2,x_5],[x_3,x_4]\} \qquad (2.13)$$

となる．ただし，$[x_2,x_5]$ は x_2 と x_5 とが q_4 に関して識別できないことを意味している．

さて，属性の従属性によって情報システムを縮小する．このために以下の定義を行う[2)]．

(i) 属性 p は属性 q に従属していることを $q\rightarrow P$ と表し，$q\rightarrow p \Longleftrightarrow \widetilde{q}\subset\widetilde{p}$ と定義する．

(ii) p と q とは独立である$<\quad>$ $p\rightarrow q$, $q\rightarrow p$ のどちらどちらも成立しない．

(iii) 部分集合 $P\subset Q$ が独立 $\Longleftrightarrow$ すべての $P'\subset P$ に対して $\widetilde{P'}\supset\widetilde{P}$.

(iv) 部分集合 $P\subset Q$ が従属 $\Longleftrightarrow \widetilde{P'}=\widetilde{P}$ となる $P'\subset P$ が存在する．

(v) 部分集合 $P'\subset P$ が P において余分である $\Longleftrightarrow$ $\widetilde{(P-P')}=\widetilde{P}$

(vi) 部分集合 $P\subset Q$ が Q の簡略化である $\Longleftrightarrow$ Q-P が余分であり P は独立である．

定義(vi)による Q の簡略化を P とし，P に対応した情報システムを $S'=(X,P,V,\phi')$ で表し，これを簡略化された情報システムという．ただし，ϕ' は属性 P だけの表で与えられる．Q の簡略化を得るために次の性質を用いることができる．

(a) 部分集合 P が独立 $\Longleftrightarrow$ すべての i に対して $\widetilde{P_i}\supset\widetilde{P}$, ただし $P_i=P-\{p_i\}$.

(b) 部分集合 P が Q において余分であり，また $\{p_i\}$ が Q-P で余分であれば $P\cup\{p_i\}$ は Q において余分である．

性質(a)によって属性の集合 P が独立であるかどうかを調べることができ，性質(b)によって余分な属性を 1 個づつ取り除くことができる．

Table 1 の例で示すと，Q の簡略化は $\{q_1,q_2,q_3\}$ と $\{q_3,q_4\}$ である．

3．属性 Q の簡略化法の提案

2.2で述べた Z.Pawlak による Q の簡略化法は同値類による基本集合だけによっているので，属性 Q の数を減少させることにおいて，ある限界がある．ここで提案する方法はエキスパートによって与えられた分類をも考慮し，属性 Q の簡略化を求めるためのものである．なお，簡略化の指標として2.1で定義された分類 F の近似の精度(2.10)式を用いる．

<<定理 1 >> 近似空間 A において，$F=\{X_1,\ldots,X_n\}$ が分類のとき属性の部分集合 $P'\subset P$ に対して

$$\beta_A(\widetilde{P'})\le\beta_A(\widetilde{P}) \qquad (3.1)$$

である．ただし，$\beta_A(\widetilde{P})$ は属性の部分集合 P に対する(2.10)式の近似の精度を表す．

（証明）$P'\subset P$ であるので，$\widetilde{P'}$ による基本集合は $\widetilde{P}$ による基本集合の和演算によって構成できる．したがって

$$\text{Card-}P'(A_*(X_i))\le\text{Card-}P(A_*(X_i)) \qquad (3.2)$$

となる．ただし，$\text{Card-}P(A_*(X_i))$ は $\widetilde{P}$ による基本集合に対する X_i の下からの近似の要素の数を示す．(3.2)式から(3.1)式は明かである． ■

定理3.1から $P'\subset P$ に対して(3.1)式が成り立つので，以下のことを定義する．

<<定義 1 >>

i) P を Q の部分集合とする．もしすべての $P'\subset P$ に対して

$$\beta_A(\widetilde{P'})<\beta_A(\widetilde{P}) \qquad (3.3)$$

ならば，P は情報システム S において分類に関して独立であるという．また

$$\beta_A(\widetilde{P'})=\beta_A(\widetilde{P}) \qquad (3.4)$$

となる $P'\subset P$ が存在するならば，P は S において分類に関して従属であるという．

ii) $P'\subset P$ で $P''=P-P'$ とすると，もし

$$\beta_A(\widetilde{P''})=\beta_A(\widetilde{P}) \qquad (3.5)$$

ならば，P' は P において分類に関して余分であるという．

<<定理 2 >> $P'\subset P$ となる P' が P において分類に関して余分であり．また $\{p_i\}$ が P-P' で分類に関して余分とすると，$P'\cup\{p_i\}$ は P において余分である．

（証明）定理の仮定から

$$\beta_A(\widetilde{P'})=\beta_A(\widetilde{P'-P}) \qquad (3.6)$$

$$\beta_A(\widetilde{P-P'})=\beta_A(\widetilde{P-P'-p_i}) \qquad (3.7)$$

となり，$P'\cup\{p_i\}$ が余分であることがわかる． ■

さて，属性の集合 Q の簡略化を分類 F を用いて定義する．

<<定義 2 >> 部分集合 $P\subset Q$ が Q の簡略化であるとは，Q-P が分類に関して余分であり，P は分類に関して独立であることをいう．

定義 2 と定理 2 から，分類に関する Q の簡略化を求めるアルゴリズムは次のようになる．

<<探索アルゴリズム>>

ステップ 1 ：属性の集合 Q において分類に関して余分な属性 q_i を探す．もし余分な属性がなければステップ4に行く．

ステップ 2 ：Q を $Q-\{q_i\}$ に置き換える．すなわち $Q:=Q-\{q_i\}$ とする．

ステップ 3 ：すべての属性 $\{q_i\}\subset Q$ が Q において独立ならば，ステップ4に行く．そうでなければ，ステップ 1 に行く．

ステップ 4 ：得られた Q は簡略化されたものである．

以上のアルゴリズムによって余分な属性を 1 個づつ取り除くことができる．したがって，このアルゴリズムによって分類に関する Q の簡略化が得られ，情報システムを縮小することができる．

Table 1 の例によって以上のことを説明する．いま分類 F として

$F=\{X_1,X_2\}$; $X_1=\{x_1,x_2,x_3\}$, $X_2=\{x_4,x_5\}$ とし，$P=\{q_3,q_4\}$ とする．まず $Q=\{q_1,..,q_4\}$ であるので，

$$A_*(X_1)=\{x_1,x_2\},\quad A^*(X_1)=\{x_1,x_2,x_3,x_4\},$$
$$A_*(X_2)=\{x_5\},\quad A^*(X_2)=\{x_3,x_4,x_5\}, \qquad (3.8)$$

となり，$\beta_A(\widetilde{Q})=3/5=0.6$ である．一方 $P=\{q_3,q_4\}$ とすると，X_1,X_2 の上からの近似と下からの近似は(3.8)式と一致するので，$\beta_A(\widetilde{P})=3/5=0.6$ となる．したがって $\beta_A(\widetilde{Q})=\beta_A(\widetilde{P})$ となり定義 1 から Q は分類に関して従属である．次に $P'=\{q_3\}$, $P''=\{q_4\}$ とを考えると，X_1,X_2 の下からの近似と上からの近似とは $\widetilde{P'}$ に対して(3.9)式また $\widetilde{P''}$ に対して(3.10)式になる．

$A_*(X_1)=\phi$, $A^*(X_1)=\{x_1,x_2,x_3,x_4\}$,
$A_*(X_2)=\{x_5\}$, $A^*(X_2)=\{x_1,x_2,x_3,x_4,x_5\}$. (3.9)
$A_*(X_1)=\{x_1\}$, $A^*(X_1)=\{x_1,x_2,x_3,x_4,x_5\}$,
$A_*(X_2)=\phi$, $A^*(X_2)=\{x_2,x_3,x_4,x_5\}$. (3.10)

したがって,

$\beta_A(\widetilde{P}')=0.2 < \beta_A(\widetilde{P})$
$\beta_A(\widetilde{P}'')=0.2 < \beta_A(\widetilde{P})$ (3.11)

となり, P は分類に関して独立である. ゆえに P は Q の分類に関する簡略化である. 同様に, $P=\{q_1,q_3\}$ も Q の分類に関する簡略化になっている.

さて, 2. で述べた定義と3. の定義との関連については次のことがいえる.

i) 部分集合 $P\subset Q$ が従属ならば, P は分類に関して従属である.

ii) 部分集合 $P'\subset P$ が P において余分ならば, P は分類に関して余分である.

以上のように, 2. で述べた定義は任意の分類 F に関して成り立つようになされているので, 3. の定義よりも厳密である. 2. における Q の簡略化は, 基本集合の数を減少しないように情報システムを減少させている. これに対して3. に述べた分類に関する Q の簡略化は, 同じクラス内で基本集合どうしが結合することを許すが, 異なるクラス間で基本集合どうしが結合することを許さない. したがって Z. Pawlak による簡略化法より, 3. で述べた分類に関する簡略化法の制約がよりゆるやかであるので, より小さな情報システムにすることができる. Fig.2 に分類に関する簡略化の説明を示す. ここで, 基本集合が24個の正方形のマス目で与えられるとし, 分類 $F=\{X_1,X_2\}$ を考慮すると, 同じクラス X_i の中の基本集合どうしが結合することを許すので, たとえば Fig.2 のように斜線で示された基本集合が結合できる. このように基本集合を分ける必要がないので, 属性の数を減少させることができる.

4. ファジィ推論モデル

エキスパートの判断によって分類された $F=\{X_1,\ldots,X_n\}$ が与えられると, 3. で述べた分類に関する簡略化法によって情報システムを簡略化できる. 簡略化された情報システムにおいて, X_i の下からの近似 $A_*(X_i)$ に対する表現が Table 2 のようになったとする. ここで $A_*(X_i)$ を用いた理由は, エキスパートの判断と情報システムであるデータ構造との間に矛盾がないものだけを用いるためである. すなわち完全に X_i に属するデータだけを用いるという意味である.

Table 2 のデータを次のようなルールとして表現する.

$$\text{IF } \bigvee_j((y_1=v_{1j}^i)\wedge\cdots(y_m=v_{mj}^i)) \text{ then } \mathbf{y}\in X_i \quad (4.1)$$

ただし, $\bigvee$ は max を, $\wedge$ は min を表し, y_k は入力データの属性 q_k の値であり, $\mathbf{y}=(y_1,\ldots,y_m)$ である.

一般に, 属性値は実数で与えられるが, これを Fig.3 のようにいくつかの区間 V_j に分割し, 一つの区間を整数値に対応させている. 属性値が本来実数であっても, これを区間に分割することによって整数に対応させ, これによって同値類を構成している. したがって(4.1)式のルールは区間で表される集合で表現できる.

いま入力データ $\mathbf{y}$ が実数値であるとし, Fig.3 の集合 V_j をファジィ区間に置き換えることによってファジィ if-then ルールを構成する. (4.1)式のファジィ化を次のように行う. いま

$$\Pi_{x_i}(\mathbf{y})=\bigvee_j(\mu_{1j}^i(y_1)\wedge\cdots\wedge\mu_{mj}^i(y_m)) \quad (4.2)$$

を定義すると, ファジィ推論の考え方から, 入力データ $\mathbf{y}$ がクラス X_i である度合は, (4.2)式の $\Pi_{x_i}(\mathbf{y})$ と考えることができる. ただし, μ_{kj}^i は Fig.4 のようなファジィ区間のメンバシップ関数である.

近似空間 A=(U,R) における分類を $F=\{X_1,\ldots,X_n\}$ とし, 与えられたデータ $\mathbf{y}$ の $X_1,\ldots,X_n$ に属する度合をそれぞれ $\Pi_{x_1}(\mathbf{y}),\ldots,\Pi_{x_n}(\mathbf{y})$ とする. このときファジィ推論モデルは次のようになる.

$$\text{If } \Pi_{x_k}(\mathbf{y})=\Pi_{x_1}(\mathbf{y})\vee\cdots\vee\Pi_{x_n}(\mathbf{y}) \text{ then } \mathbf{y}\in X_k \quad (4.3)$$

すなわち, 入力データ $\mathbf{y}$ は, 度合が最大となるクラスに属すると推論される. ただし, 最大値がいくつかある場合では, $\mathbf{y}$ は複数のクラスに属すると推論される.

5. 肝臓病のファジィエキスパートシステム

本研究で用いたデータは, 川崎医科大学でとられたものであり, 健康な人と四種類の肝臓病の患者との五つのグループから成り立っている. 検査項目(属性)は20個あり, 各属性値は医者によりいくつかの区間に分けられている.

データ数は, ルール・ベース作成用が468個で, 推論用が100個である. ただし, 推論モデルを構成するときに用いるデータをルール・ベース作成用データと呼び, 推論モデルを検証するときに用いるデータを推論用データと呼ぶ. また医者による診断の分類のクラスは, X_1≙Healthy person, X_2≙Hepatoma, X_3≙Acute hepatitis, X_4≙Chronic hepatitis, X_5≙Liver cirrhosis と $X_1\sim X_5$ のラベルがつけられている.

ルール・ベース作成用データを用いて, $A_*(X_i)$, $A^*(X_i)$, 近似の精度 $\alpha_A(X_i)$, $i=1,\ldots,5$ を計算した結果を Table 3 に示す. Table 3 からクラス X_1,X_3,X_4 には医者の判断とデータ構造との間の矛盾は存在しない. クラス X_2,X_5 では少し矛盾が存在する. 医者によって与えられた分類 $F=\{X_1,\ldots,X_5\}$ に関する近似の精度は, (2.10)式から

$$\beta_A(F)=463/468=0.989 \quad (5.1)$$

となっている. したがってルール・ベース作成用データはかなり有効と考えられる.

[1] 20個の属性による推論結果

ルール・ベース作成用データを用いてファジィ if-then ルールを作成し, ルール・ベース作成用データを用いて推論させた結果, その正解率は 465/466=0.998 となり, ほぼ完全に推論が行われている. ただし, 2つ以上のクラスを推論し, その推論のどれかが正しい場合は保留とし, 正解率の計算から省いている. 推論用データを推論させた結果, 正解率は 72/93=0.774 となった. すなわち, 推論用データのうち7個の推論結果は2つ以上のクラスになっている. ファジィ if-then ルールは下からの近似 $A_*(X_i)$ から構成されているが, Table 3 の $A_*(X_i)$ の要素のものの中で異なる属性からなるものが429個であるので, 429個のファジィルールが構成されている. 原理的に可能なルール数は約 8.1×10^{14} である. 8.1×10^{14} のルール数のうち429個のルール数だけでかなりよい結果が得られている.

[2] 分類に関する簡略化法による推論結果

3. で述べた分類に関する属性の簡略化のアルゴリズムを用いて属性の数を7個までに減らすことができた. 7個の属性による推論結果はルール・ベー

ス作成用データに関してはその正解率が439/442=0.993 であり，ほぼ完全に正しく推論している．ただし，26個のデータが保留となっている．推論用データに関してはその正解率は 62/85=0.729 となった．正解率が悪くなった理由は属性の数を低減させたためである．

7個の属性の場合では，下からの近似において，異なる要素の数が368個であったので，ファジィif-thenルールは368個である．20個の属性の場合と比較するとルール数は約80％程に減少している．ルール数が少ないので正解率は20個の属性のときよりも悪くなっている．なお7個の属性の場合の可能なルール数は約 2.2×10^{5} である．20個の属性のときは 8.1×10^{14} であったことを考えると，属性の数を減少させることによって可能なルール数を極端に減少させることができる．

最後に，本研究は大阪府立大学工学部経営工学科四回生稲井田勝氏（現在NTT）に負うところが大であり，ここに謝辞を表す．

参考文献

[1]Z.Pawlak :Rough Sets, Int.J. of Information and Computer Sciences, 11-5, 341/356 (1982).

[2]Z.Pawlak : Rough Classification, Int.J. of Man-Machine Studies, 20, 469/485 (1984).

[3]A.Mrozek : Rough Sets and Dependency Analysis among Attributes in Computer Implementations of Expert's Inference Models, Int. J. of Man-Machine Studies, 30, 457/4731 (1989).

問い合わせ先：〒591堺市百舌鳥梅町4-804
大阪府立大学工学部
田中　英夫
TEL.0722-52-1161,EXT.2376
FAX.0722-59-3340

Table 1 An example of information system

F	U	q_1	q_2	q_3	q_4
X_1	x_1	0	0	0	0
	x_2	0	1	0	2
	x_3	1	1	0	1
X_2	x_4	1	1	0	1
	x_5	0	1	1	2

Table 2 Data corresponding to $A_*(X_i)$

1	2		m
v_{11}'	v_{21}'	----------	v_{m1}'
v_{1j}'	v_{2j}'	----------	v_{mj}'
v_{11}'	v_{21}'	----------	v_{m1}'

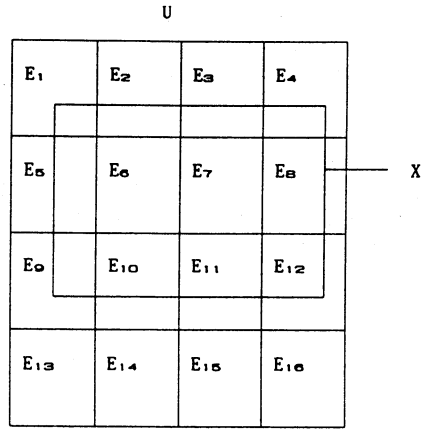


Fig.1 Approximation space A=(U,R)

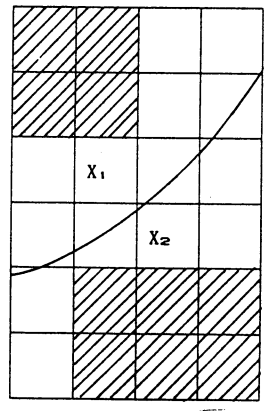


Fig.2 Illustration of proposed method for reducing Q with regards to calssification

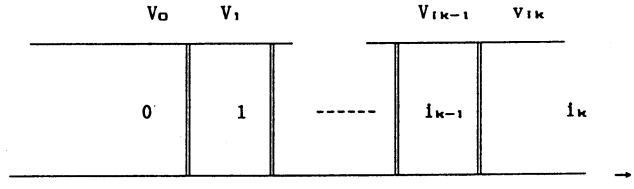


Fig.3 Devision of attribute q_j

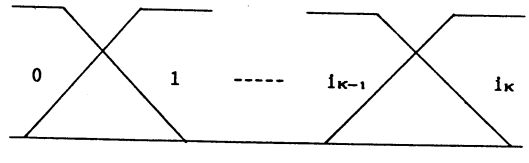


Fig.4 Fuzzy division of attribute q_i

Table 3 Analytical result by rough sets

Classes	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
number of persons	115	79	106	79	89
number of elements in $A_*(X_i)$	115	76	106	79	87
number of elements in $A^*(X_i)$	115	81	106	79	92
accuracy measure $\alpha_A(X_i)$	1.00	0.94	1.00	1.00	0.95

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

TB3-2

ファジィエキスパートシステムにおける対象の状態推移の考慮とその応用

A Study of Fuzzy Decision Support Expert System Considering the State Transition of the Object.

松原　行宏　　長町　三生
Yukihiro Matsubara　Mitsuo Nagamachi
広島大学　工学部
Faculty of Engineering, Hiroshima University

Abstract: This paper proposes a fuzzy expert system considering the state transition of the object. The state transition is reflected in the inference module. The inference process consists of three steps as follows: 1) Infer the passed term state of the object. 2) Infer this term state based on the relation of the state transition. 3) Infer the next term state at each decision. Through this process, we get some decision support information.

1. まえがき

エキスパートシステムは、エキスパートの知識表現、知識の利用方法を模擬するものである以上、エキスパートシステムを効果的に構築する方法論は、エキスパートの手法をうまく汲み上げるものでなければならない。エキスパートの問題解決手法は、一般的にいえば、エキスパートの知識の集約の仕方、考え方であり、ひいては人間の思考の方法に深く関与すると思われる。人間の思考過程は、不完全な情報の取得とその操作、近似的推論、複雑な対象の評価、不完全な状況での判断や思考状況などの諸相によって特徴づけられる[1)]。ファジィエキスパートシステムは、その様な人間の思考過程を言語レベルで取り扱ったより高度なエキスパートシステムとして注目されている。

一方、人間の思考過程において、対象の現在の状況から結論を導くのでなく、過去の状況およびその変化過程を考慮し、現在の状況と過去の状況の因果則の中から結論を導きだすことがよくあると思われる。しかしながら、従来の研究ではそのような状況を反映した推論方法を提案している例はあまりない。

そこで本稿では、事象の状態推移を考慮して結論を導くファジィエキスパートシステムの構築を目的としており、積極的に過去の因果関係を取り込み、推論に反映させる手法について提案する。

2. システム構成

人間が推論を行うとき、その判断の基準の一つとして過去の事実を用いる場合が多々ある。しかし、その処理を行うエキスパートシステムの例はあまりない。そこで本稿では、このような人間の思考過程に着目し、時系列的に与えられたデータに対する推論方法に特に注目して、時系列データに対し推論を行うファジィエキスパートシステムを構築する。

本システムが行う時系列的データの処理方法として、特徴に応じて複数の有限状態（良い状態、悪い状態、等）を用意し、与えられたデータをその状態に割り当てることによって時系列的なデータの時間的変化を状態の推移としてとらえることで推論（意思決定支援）を行う。図1にシステム構成を示す。

本システムの時系列的なデータに対する推論プロセスは、まず時系列的なデータから個々のデータに対する状態を推定する。そして、意思決定支援部で現在の状態と過去の状態との因果関係を考慮した意思決定支援を行う。

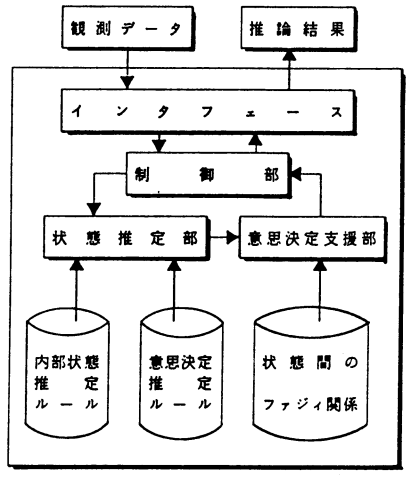


図1．システム構成

2.1 状態推定部

状態推定部では、時系列データに対して個々のデータが示す状況に応じて状態を推定する。本システムは、過去の意思決定の判断の基準となる状態（以下、状態）の他に、過去に行われたアクション（意思決定）も考慮した推論を行う。従って、状態推定部で用いられる知識は、

①各状態に属する観測データとその状況
②状態

および、

③各アクションに属する観測データとその状況

④アクション

である。これらの知識のうち、知識①、③をそれぞれルールの条件部とし、また知識②、④をその条件部に対応する結論として、以下のルール形式で表現する。

if $\{(A_1, \mu_1), \cdots, (A_n, \mu_n)\}$ then d_1 $(CF=\mu_0)$ (1)

各変数は以下のように定義する。

A：ファジィ集合

$A=\{A_1, A_2, \cdots, A_n\}$

μ：メンバシップ関数のグレード

$\mu=\{\mu_1, \mu_2, \cdots, \mu_n\}$ $\mu_i \in [0,1] : 1 \leq i \leq n$

d_1：条件部から導かれる結論

μ_0：条件部の結論に対する評価値

$\mu_0 \in [0,1]$

本システムでは、ルール（１）にデータを与えることによって、推論を行う。そこで、データがルールに対応するようにデータをルール条件部と同様な形式で表現する。

$\{(A_1, \mu'_1), \cdots, (A_n, \mu'_n)\}$ (2)

同様に、各変数は以下のように定義する。

A：ファジィ集合

$A=\{A_1, A_2, \cdots, A_n\}$

μ'：メンバシップ関数のグレード

$\mu'=\{\mu'_1, \mu'_2, \cdots, \mu'_n\}$ $\mu'_i \in [0,1] : 1 \leq i \leq n$

本推定部では、データ（２）に対して以下の２つのステップで構成される推論プロセスに従い推論を行う。

①各ルールの条件部と入力データをマッチングさせる。

②導かれた状態、及び意思決定の信頼性を評価する。

各ステップの説明を以下に示す。

①ルールとのマッチング

このステップでは、入力データが各ルールの条件部にどの程度適合するか、その適合度（類似度）を求める。本システムでは、観測データが持つメンバシップ関数のグレードをすべて考慮するために、入力データおよびルールの条件部の各観測データが持つメンバシップ関数のグレードを要素とするベクトルを考え、ベクトルの内積に着目した算出方法を用いる。算出式を式（３）に示す。

$$S(\underline{\mu}, \underline{\mu'}) = \frac{\underline{\mu} \cdot \underline{\mu'}}{\max(\underline{\mu} \cdot \underline{\mu}, \underline{\mu'} \cdot \underline{\mu'})} \quad (3)$$

ただし、

$S(\underline{\mu}, \underline{\mu'}) \rightarrow [0,1]$

$\underline{\mu}$：ルール前件部のｎ次元ベクトル

$\underline{\mu} = \langle \mu_1, \mu_2, \cdots, \mu_n \rangle$ $\mu_i \in [0,1] : 1 \leq i \leq n$

$\underline{\mu'}$：データのｎ次元ベクトル

$\underline{\mu'} = \langle \mu'_1, \mu'_2, \cdots, \mu'_n \rangle$ $\mu'_i \in [0,1] : 1 \leq i \leq n$

入力データのルールに対する有効性は、式（３）によって求められた値によって特徴づけられ、その大きさはルールが示す状態に属する度合とする。すなわち、この値が大きいほど、その状態に属する割合が高くなる。

②導かれた状態の信頼性の評価

一つのデータに対し、導かれる結論が常に一つとは限らない。本システムに限らず、ファジィエキスパートシステムではむしろ一つのデータに対する結論を一つに断定するより、複数の結論を導きだした方がよい場合が多い。また、データやルールの知識があいまいであることから、そのデータから導かれた結論の信頼性を評価するような一つの目安となるものが必要になる。

ルールの信頼性の評価としてルールに評価値を付随し、判断したが、導出結果に対してもこの値を用い、データの結論に対する信頼性を評価する。ルールの評価値が条件部の結論部に対する信頼性の評価を、また類似度が入力データのルールの条件部に対する信頼性を評価する値を示していることから、データの結論に対する評価（導出結果の評価値）は式（４）で得られる。

［導出結果の評価値］＝

［類似度］×［ルールの評価値］ (4)

式（４）で得られた値は、導出結果に付随し、導出結果の信頼性を評価する基準にする。

以上の２つのステップで構成される推論のプロセスに従い、過去の対象の内部状態、およびアクション（意思決定）を推定する。

2.2 意思決定支援部

意思決定支援部では、状態推定部より同定された結論を、状態間のファジィ関係のグレードに反映させた推論を行なう。

ここで与えられているファジィ数は、

①初期における各状態の所属度

②各意思決定における状態間のファジィ関係

の二つとする。

また、入力データは、

①ｐ期間（ｔ期～ｔ＋ｐ期）の推定された各状態とその評価値

②ｐ－１期間（ｔ期～ｔ＋ｐ－１期）の推定された各意思決定状態とその評価値

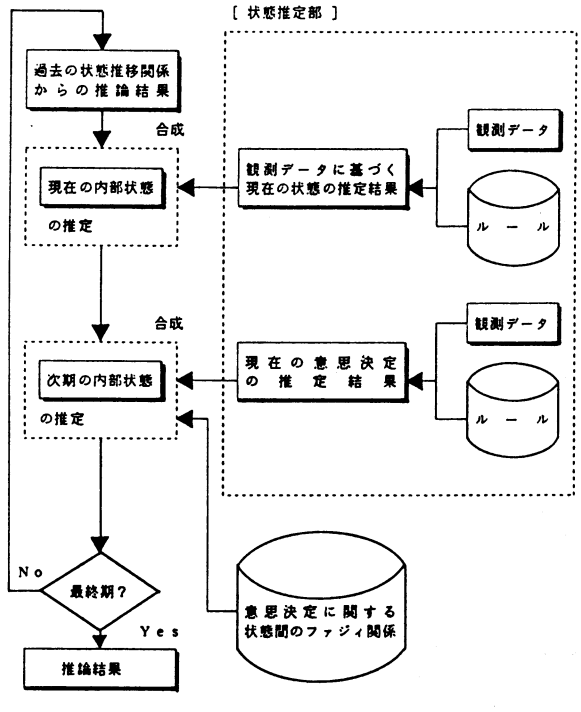


図２．推論プロセスの概略

である。

この推定部での最終的な結果（推論結果）は、各意思決定の状態推移の確信度であり、意思決定者が意思決定を行う際に支援する結論を導く。

この推定部で行う推論プロセスを、以下の２つのステップで構成する。

①過去の状態を考慮した現在の状態の推定

②各意思決定における次期の状態の推定

以上の推論ステップに従い推論を行なう。推論プロセスの概略を図２に示す。

各ステップの説明、および定式化は以下の通りである。

①過去の状態を考慮した現在の状態の推定

観測データから推定された各状態の評価値と、過去の状態から推論された結果より各状態に属するグレード（所属度）を計算する。過去の状態から推論された状態ｉ（$1 \leq i \leq n$）に対する事前所属度$\xi(i)$と観測データから推定された各状態の評価値より、状態ｉの所属度$\varepsilon(i)$は式（５）のようになる。

$$\varepsilon_k(i) = \frac{\xi_k(i) C_k(i)}{\Sigma_i \xi_k(i) C_k(i)} \qquad (5)$$

各変数は以下のように定義する。

$\xi_k(i)$：ｔ＋ｋ期の状態ｉの事前状態の所属度

$\Sigma_i \xi_k(i)=1$

$C_k(i)$：ｔ＋ｋ期（$1 \leq k \leq p$）の状態ｉの評価値

$C_k(i) \in [0, 1]$

$\varepsilon_k(i)$：ｔ＋ｋ期の状態ｉにおける所属度

$\Sigma_i \varepsilon_k(i)=1$

②各意思決定における次期の状態の推定

意思決定ｌ（$1 \leq l \leq m$）を行ったときの状態ｉ（$1 \leq i \leq n$）から状態ｊ（$1 \leq j \leq n$）へのファジィ関係$f_l(i,j)$と、式（５）で得た$\varepsilon_k(i)$より、意思決定ｌを行ったときの次期状態ｊの確信度$f_{l(k+1)}(j)$を式（６）より求める。

$$f_{l(k+1)}(j) = \Sigma_i \varepsilon_k(i) f_l(i,j) \qquad (6)$$

各変数は以下のように定義する。

$f_l(i,j)$：意思決定ｌにおける状態ｉと状態ｊのファジィ関係の確信度

$\Sigma_i f_l(i,j)=1$

$f_{l(k+1)}(j)$：意思決定ｌのｔ＋（ｋ＋１）期に状態ｊである確信度

$\Sigma_j f_{l(k+1)}(j)=1$

式（６）より得られた各意思決定のファジィ関係の確信度と、推定された意思決定の評価値に基づき、各意思決定のファジィ関係のグレードを修正する。２．２で同定された意思決定の評価値を与え、次期に状態ｊである確信度$f_{(k+1)}(j)$を式（７）より求める。

$$f_{(k+1)}(j) = \frac{{}_l\Sigma C'_k(l) f_{l(k+1)}(j)}{\Sigma_j \Sigma_l C'_k(l) f_{l(k+1)}(j)} \qquad (7)$$

各変数は以下のように定義する。

$C'_k(l)$：t+k 期の意思決定状態ｌの推論評価値

$C'_k(l) \in [0, 1]$

$f_{(k+1)}(j)$：t(k+1) 期の状態ｊに対するグレード

$\Sigma_j f_{(k+1)}(j)=1$

このようにして得られたグレード$f_{(k+1)}(j)$は次期の事前状態所属度となる。すなわち、

$$\xi_{(k+1)}(i) = f_{(k+1)}(j) \qquad (8)$$

とする。

ｐ－１期間（ｔ期～ｔ＋（ｐ－１）期）の同定された各状態とその評価値、および各意思決定とその評価値に対し、これらの推論を行い、ｔ＋ｐ期の事前状態の所属度を計算する。その値とｔ＋ｐ期の同定された各状態とその評価値によって現在の意思決定ごとの状態推移の確信度を求め、推論結果とする。

2.3 まとめ

本節では時系列的なデータを取り扱う問題領域を対象としたファジィエキスパートシステムを提案した。時系列的なデータでの推論方法として、状態推移で捉える方法を示した。以下、３節では資金調達問題に応用し、推論方法を明確に示すとともにその評価を行う。

3. 資金調達問題への応用

3.1 資金調達問題の概要

人間的な要因を含む複雑な経済的および社会的システムでは、すべての側面を正確に記述することは困難である。ファジィ集合論に基づいたファジィ関数を用いることによって、このようなシステムの現象に含まれるあいまいさを効果的に表現できる。本稿では、その経済問題の中の企業の資金調達問題[3,4]に本システムを適用する。企業は、その目的とする事業を遂行するために、資本を必要とする。この必要とする資本量は、財務指標の時間的変化に大きく作用される。そこで、その傾向を解析、処理する必要がある。

具体的には、調達源泉として、短期借入金、長期借入金、社債（普通社債、転換社債等含む）、株式を考え、財務指標の時間的変化を時系列データとしてとらえ、過去の状態変化をもとに、次期に最良と思われる各資金調達額比率を推論する。以下で実行結果を示す。

3.2 実行結果

3.2.1 適用ルール

システムの各推定部で適用するルールを以下の方法により用意する。

①状態推定ルール

状態推定部において、観測データより対象の内部状態を推定する状態推定ルールは、企業の財務状態を最もよく表現していると思われる財務指標１３項目を観測変数として取り上げ、１５期分の観測データをクラスター分析することにより、各状態の分類することにより作成する。観測データは、電気機器メーカーＦ社の１９７４年～１９８８年のデータを会社年鑑より引用した。財務指標項目と各状態におけるメンバシップ

表１　各状態におけるメンバシップ関数のグレード

財務指標	状態１	状態２	状態３	状態４
売上高	.12	.55	.15	.03
営業利益	.32	.89	.49	.02
経常利益	.32	.80	.51	.06
当期利益	.36	.95	.55	.03
資本金	.14	.42	.36	.12
総資本	.36	.20	.69	.09
営業利益率	.39	.21	.78	.12
総資本利益率	.69	.49	.85	.13
自己資本比率	.15	.57	.65	.76
１株当り利益	.41	.72	.61	.03
１株当り配当	.29	.35	.66	.20
最高株価	.38	.16	.30	.27
最低株価	.30	.88	.44	.12

関数のグレードを表１に示す。

メンバシップ関数のグレードは、「年変化率の度合が大きい」というファジィ集合に対する所属度を示す。観測値からメンバシップ関数のグレードを算出する方法として式（９）を用いた。

$$\mu = \frac{(\text{各状態平均値}) - (\text{最小値})}{(\text{最大値}) - (\text{最小値})} \qquad (9)$$

なお、状態１は平衡期、状態２は好景気（売上高良好）、状態３は好景気（安定）、状態４は下降期、の状況を表すと解釈できる。

②意思決定推定ルール

過去の意思決定を推定する意思決定推定ルールの意思決定の分類も、状態の分類同様に１５期分の観測データをクラスター分析して行った。

意思決定推定ルールの条件部にあたる意思決定項目と各意思決定におけるメンバシップ関数のグレードは各意思決定の資金調達額比率を式（９）を用いて変換した。その値を表２に示す。

表２　各意思決定のメンバシップ関数のグレード

意思決定	A	B	C	D
長期借入金	.95	.85	.05	.02
短期借入金	.65	.88	.16	.15
社　　債	.08	.08	.83	.25
株　　式	.08	.07	.68	.98

③ファジィ関係

意思決定支援部で用いる状態間のファジィ関係、および各状態の事前所属度も状態推定ルール作成に用いたデータより作成する。

これらのルールに対し、以下の入力データを与え推論を行う。

3.2.2　入力データ

状態推定に関するデータとして財務指標１３項目に関するメンバシップ関数のグレードを入力データとし、意思決定推定に関するデータとして意思決定４項目に関するメンバシップ関数のグレードを入力データとする。それぞれの入力データ期間は５期間、及び４期間とし、各期におけるメンバシップ関数のグレードを表３、４に示す。

3.2.3　実行結果

3.2.2に示した入力データをもとに、推論プロセスにしたがって各推定部での推定結果を示す。

表３　状態推定に関する入力データ

財務指標	t 期	t+1期	t+2期	t+3期	t+4期
売上高	0.09	0.11	0.10	0.14	0.17
営業利益	0.67	0.40	0.38	0.47	0.45
経常利益	0.73	0.28	0.52	0.40	0.35
当期利益	0.59	0.42	0.46	0.70	0.43
資本金	0.03	0.37	0.20	0.10	0.42
総資本	0.34	0.32	0.93	0.42	0.75
営業利益率	0.54	0.59	0.59	0.90	0.88
総資本利益率	0.72	0.74	0.76	0.87	0.92
自己資本比率	0.11	0.49	0.82	0.82	0.71
１株当り利益	0.71	0.39	0.49	0.79	0.49
１株当り配当	1.00	0.00	0.35	0.55	0.63
最高株価	0.29	1.00	0.26	0.64	0.28
最低株価	0.38	0.38	0.54	0.79	0.47

表４　意思決定推定に関する入力データ

意思決定	t 期	t+1期	t+2期	t+3期
長期借入金	0.57	0.62	0.54	0.59
短期借入金	0.90	0.96	1.00	0.73
社　　債	0.22	0.05	0.11	0.29
株　　式	0.03	0.46	0.27	0.13

①状態推定結果

５期間の状態推定結果を表５に、４期間の意思決定推定結果を表６に示す。各数値は推論評価値を示す。

②意思決定推定結果

①の結果に基づき、最終的な推論結果として各意思決定における状態推移の確信度を表７に示す。

表５　内部状態推定結果

状態	1	2	3	4
t　期	.651	.571	.714	.317
t+1 期	.589	.708	.916	.304
t+2 期	.521	.804	.857	.257
t+3 期	.572	.730	.983	.277
t+4 期	.422	.620	.760	.203

表６　意思決定状態推定結果

状態	A	B	C	D
t　期	.868	.876	.188	.397
t+1 期	.847	.934	.204	.318
t+2 期	.741	.883	.380	.295
t+3 期	.312	.434	.899	.641

表７　各意思決定の状態推移確信度

状　態	1	2	3	4
意思決定 A	.315	.315	.185	.185
意思決定 B	.602	.145	.240	.014
意思決定 C	.349	.123	.349	.179
意思決定 D	.123	.179	.575	.123

3.3　考察

意思決定を選択する際の判断の基準として、その意思決定を行なったときに次期に良い状態（状態２、３）に推移する推移確信度の大きさが一つの目安として考えられる。それに基づいた選好は表７よりＤになる。実際に行なわれた意思決定はＤであり、推定結果がうまく対応していることを示している。

4.　あとがき

本稿では、時系列的なデータによる推論を行うファジィエキスパートシステムとして、個々のデータが示す状況に応じて対象の内部状態を推定し、時系列的なデータの変化を現在の状態と過去の状態のファジィ関係のグレードの変化で表現した。これにより状態の因果関係による意思決定の変化を考慮することができた。しかし、最終的な推論結果が各意思決定における状態推移の確信度でしか得られない。そこで、意思決定に対する効用関数を導入し、それに基づいて意思決定を行うことが効果的と思われる。

【参考文献】

1)　寺野寿郎,浅居喜代治,菅野道夫:ファジィシステム入門,オーム社(1987)

2)　Chen,S.M.:"A New Approach to Handling Fuzzy DecisionMaking Problems",IEEE SMC,Vol.18,No.6,pp.1012-1016(1988)

3)　尾関,松丸,山下,中林:"企業評価を考慮した資金調達モデルに関する研究",日本経営工学会誌,pp.18-24(1988)

4)　尾関,松丸,山下,中林:"資金調達額の時系列解析-企業評価を考慮した資金調達モデルに関する研究（第２報）",日本経営工学会誌,pp.20-27(1988)

問い合わせ先：〒732　東広島市西条町下見
広島大学工学部　第二類
松原行宏
TEL. 0824-22-7111　EXT.3481
FAX. 0824-22-7195

TB3-3

火災判断ファジィエキスパートシステムの開発

Development of Fire Judgement Fuzzy Expert System

兼田真由美 Mayumi Kaneda　中西 慎治 Shinji Nakanishi　栗尾 孝 Takashi Kurio　野村 淳二 Junji Nomura　中森 義輝 Yoshiteru Nakamori

松下電工（株） ＩＳセンター
Information System Center Matsushita Electric Works,Ltd

甲南大学理学部
Faculty of Science Konan University

ABSTRACT

Intelligent fire/non fire judgement system is proposed,which has fuzzy rules utilized for transforming numerical sensor data along with time into qualitative languages,such as increasing,decreasing etc.However,those rules are difficult to code because antecedent variables of the rules are intuitively selected by a judgement expert.In this paper,a clustering process is discussed,which can help him to select suitable fuzzy variables.

1．まえがき

従来の火災報知システムは、タバコの煙や湯気などと、火災との識別ができないために、非火災報(誤報)を発することがある。これは、煙、温度の各センサの出力値が予め設定されているしきい値を越えると発報するという単純な判断論理に起因する。初期消火や避難誘導及び所轄消防署への通報を的確に行うためには非火災報を低減する必要がある。このためには、現時点における煙濃度、温度のみに注視した判断ではなく、それら属性の時系列データに基づき、過去から現在までの変化の傾向を定性的に捉えた判断プロセスの導入が不可欠になる［1］［2］。

我々はこれまで、データがレベルを越えかつ上昇中なのである事象が生じている、といった火災、非火災判断の専門家のもつあいまいな知識を予め有し、現在時々刻々得られるデータを知識に照らして状況判断を行うシステムを開発してきた［2］［3］［4］。システムの概略を図１に示す。システム稼動時は図１上欄に示すように煙、温度、ＣＯガスセンサからの時系列データを取り込み定性表現に変換し、知識であるルールと照合、「火災」「非火災」の判断結果をモニタに表示、音声報知システムにより報知していく。ここで、定性表現を用いることにより、センサ出力に含まれる微小ノイズやインパルス的な変動をカットでき、さらにより人間の言語表現に近い形でデータの変化特徴を表現できる。

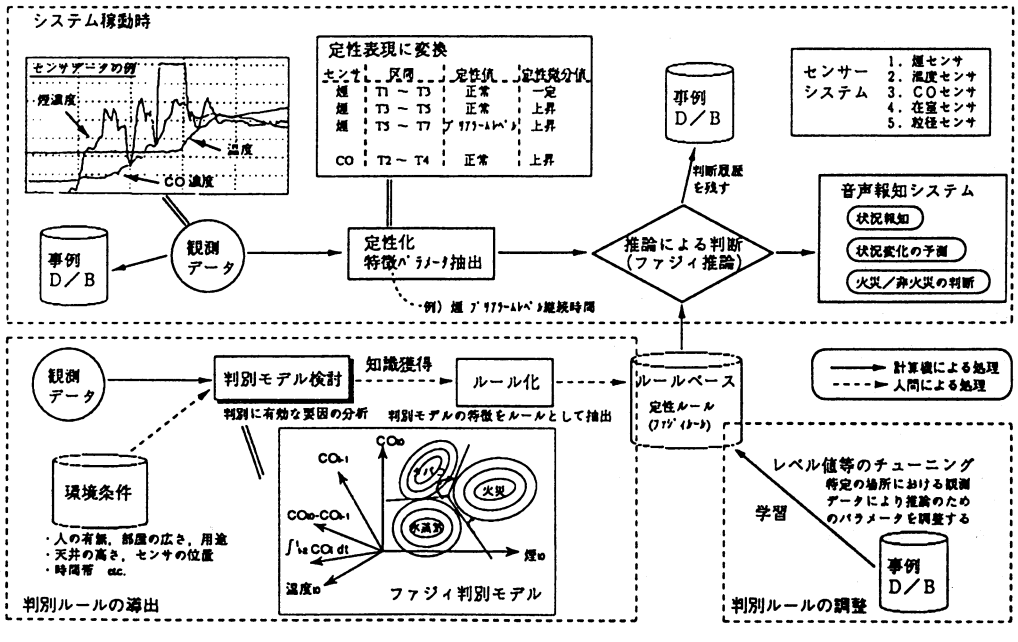


図１．火災判断ファジィエキスパートシステムの概略

ルールは、火災、非火災の簡易実験を起こし、そのとき得られる時系列データの変化傾向を専門家が定性的に把握、上昇などの言語を用いて抽出、記述していた。しかし、そのプロセスにおいて、ルール前件部に当てられる変数は専門家の直感的な選択により決定されており、困難を要していた。そこで本報告では、いくつかの変数が選択されるとそれら変数間の関係がクラスタリングされ、専門家に提示されることにより、専門家自身が本当に必要と考える変数組を容易に選択できるプロセスについて考える。組が決定され、それらの定性的な関係を専門家が把握できれば、それらはあいまい規則により表現できることになる。［5］

2　専門家との対話による知識の抽出

専門家のもつあいまいな知識を獲得、表現するためには、その専門家がある時点でどの属性に注目しているのか、その量に対してどのような観測特性を示すかについて調べる必要がある。ここでは、火災、非火災現象の予め得られているデータに対して、専門家が選択する変化特徴に基づくクラスタリング結果の提示によって、専門家が判断の時点で実際に観測している変化特徴および量を決定していくことを考える。変化特徴としては、極大値、上昇や下降の傾きなどを挙げることができるが、専門家が、それら特徴量間の定性的関係について知りたい場合、いくつかを選択すれば関係が図示される。「非火災」現象の水蒸気、タバコと火災それぞれの模擬実験により得られたセンサデータをもとに、水蒸気現象を判断する際用いる諸特徴の同定プロセスについて述べる。同現象においては、図2に示すような時系列データが得られる。水蒸気の発生時に煙濃度が急激に上昇し、プリアラームレベル、アラームレベルを越え、すぐに急激に下降するといった特徴が見られる。専門家は煙濃度の上昇、下降の傾きにより現象が特徴づけられると考え、煙濃度があるレベルを越えて下降し始めるまでを上昇中、煙濃度が下降し始めてあるレベル以下になるかあるいは再び上昇し始めるまでを下降中とし、それぞれについての線形近似により得られる傾きを注目すべき特徴量とする。いま、上昇中の傾きを選択した場合、システムは図3に示すようなクラスタリング結果を提示する。

x軸に上昇中の傾き、y軸に極大値を表示している。これにより専門家は、煙濃度上昇中の傾きが大きくかつ極大値が高い領域にクラスタ1（マル印○，●）、両特徴とも小さい領域にクラスタ2（三角印△，▲）が存在すると把握する。じつは、白抜きは水蒸気が生起したときのデータ、黒塗りは火災のデータであることから、前者はクラスタ1にその多くが含まれており、後者はクラスタ2に多くが含まれている。以上のことから専門家は、煙濃度の上昇中の傾きと同濃度の極大値を水蒸気現象の生起を判断する上で重要な特徴量となることを確信する。しかしながら、クラスタ1に含まれる黒塗りのマル（●）は、火災時のデータであるのに水蒸気のクラスタ（クラスタ1）に含まれるとされており、専門家はさらに他の特徴量、ここでは、下降中の傾きを選択することで、この特異点（●）を分離する。

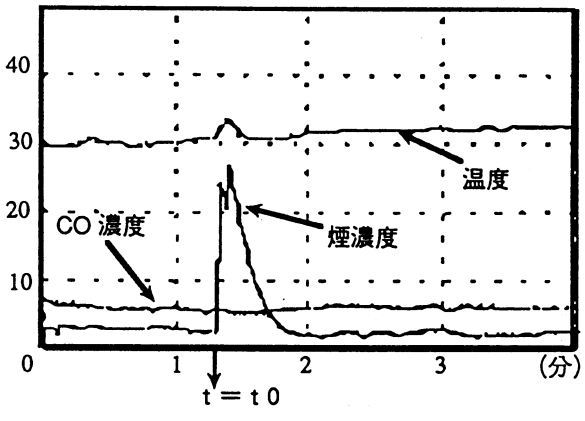


図2．水蒸気のセンサ出力変化の一例

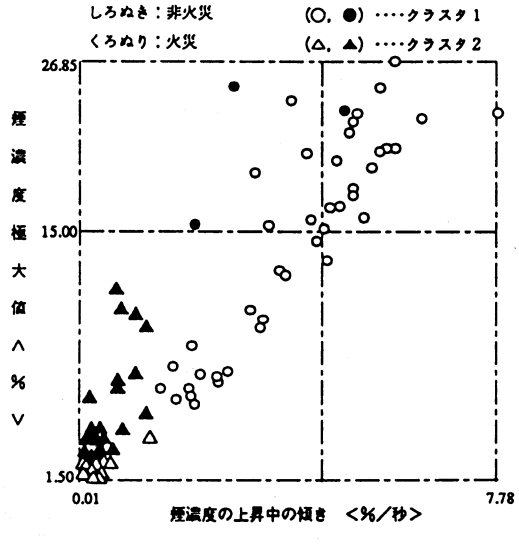


図3．上昇中の傾きによるクラスタリング結果

3．ファジィ規則の表現

2において専門家が把握した定性的関係には、煙濃度の上昇中の傾きが大きくかつ同濃度の極大値が大きい場合は水蒸気である、のように、あいまいな観測が含まれる。このような記述をルール化し、表現するにはファジィ変数を用いるのが適切であると考えられる。そこで、高い、大きいなどのファジィ数をメンバーシップ関数として表現するために、そのパラメータの決定が必要とされる。いま、水蒸気の判断ルールの前件部に煙濃度の極大値が考えられており、水蒸気クラスタにおける極大値の重心の値（15.00%）が帰属度1になるように関数が設定される。当ルールにおいては、後件部に確信度のファジィ数をとることにしている。なお現在のところでは、メンバーシップ関数の幅は、専門家が任意に決めるようにしている。図4に水蒸気の判断ルールの一例を示す。

4．ファジィ推論プロセス［6］

推論プロセスは、次の3つの段階に分けることができる。

（1）特徴データの入力値に対する各規則の前件部の適合度を求める。

（2）（1）で求めた適合度を基に各規則の推論結果(事象の確信度)を求める。

（3）各規則の推論結果を合成して最終的な確信度を求める。

次のような2つのR1、R2からなる2入力（x，y）1出力（z）の場合を考えてみる。

R1：IF x is A1 and y is B1
　　THEN z is C1

R2：IF x is A2 and y is B2
　　THEN z is C2

ここで、A1、B1、A2、B2、C1、C2はファジィ集合で、A1、A2⊂X、B1、B2⊂Y、C1、C2⊂Zである。いま、2つの入力値がx0、y0とすると、これらの入力に対する各規則の適合度は次のようになる。

R1の適合度　$w1 = \mu_{A1}(x0) \wedge \mu_{B1}(y0)$

R2の適合度　$w2 = \mu_{A2}(x0) \wedge \mu_{B2}(y0)$

ここで、$\mu_{A1}(x0)$、$\mu_{A2}(x0)$は、それぞれA1、A2のx0におけるグレード、$\mu_{B1}(y0)$、$\mu_{B2}(y0)$は、それぞれB1、B2のy0におけるグレードである。

つぎに、これらの適合度を後件部のファジィ集合に反映させて個々の規則の推論結果を求める。

R1の推論結果　$\mu_{c1'}(z) = w1 \cdot \mu_{c1}(z)$　$\forall z \in Z$

R2の推論結果　$\mu_{c2'}(z) = w2 \cdot \mu_{c2}(z)$　$\forall z \in Z$

ここで、・はスカラー倍である。

最後に、各規則の推論結果を非ファジィ化し、最終確信度の合成を行う。非ファジィ化の方法は、重心法を用い、$\mu_{c1'}(z)$、$\mu_{c2'}(z)$から、それぞれz1、z2が得られたとすると、最終確信度の合成は以下に示すように、「火災」と「非火災」で異なる計算方法を用いている。

火災の場合　$z0 = z1 + z2 - z1 \cdot z2$

非火災の場合　$z0 = max(z1, z2)$

図5に示すように、ファジィ推論プロセスにより、時々刻々の火災、タバコ、水蒸気それぞれの確信度がグラフ表示される。

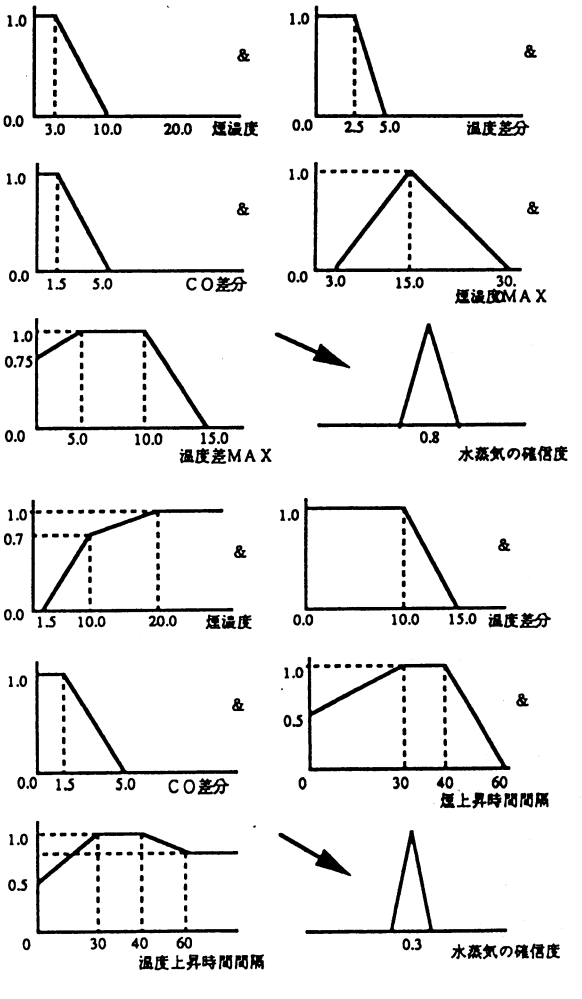


図4．ファジィルールの例

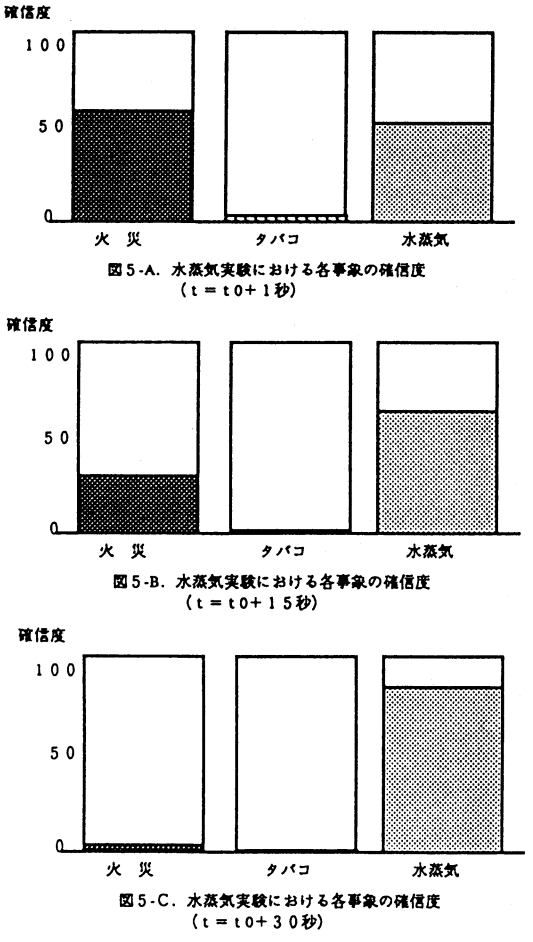


図5．ファジィ推論結果の表示例

5．あとがき

本報告では状況を早く報知し、かつ誤報の少ない火災判断システム実現のために、ファジィ推論を用いた時々刻々の状況提示及びルール作成について考察を行った。本報で述べた「火災」「非火災」判別のためのルール作成支援に、時系列センサデータの特徴量でのクラスタ分析を導入しているが、これは、ルール生成のための一手法と考えている。

今後はセンサの設置環境、状況に対応した判断ルールの作成及び、実際にインテリジェントビルにおいて実用化実験を行っていく予定である。

最後に本研究に際し御助力戴いた消防庁消防研究所佐藤晃由室長はじめ研究員の方々および今回の原稿作成に際し多大なご協力をいただいた京都大学の西山高史氏に深謝致します。

参考文献

[1]小野、石井、室井：初期火災の多次元計測、計測自動制御学会論文集、Vol.24, No.8（1988）, 794～801

[2]野村、栗尾、中西、西山、椹木、片井、岩井、佐藤、竹元、河関：複数センサデータの定性的解釈に基づく火災・非火災現象パターンの同定、第10回知識工学シンポジウム,（1989）, 149～154

[3]中西、栗尾、兼田、野村、佐藤、竹元、河関：火災判断ファジィエキスパートシステム、日本火災学会研究発表会概要集,（1990）, 59～62

[4]兼田、中西、栗尾、野村、中森、佐藤、竹元、河関：火災判断におけるファジィモデリング技術の応用日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集,（1990）, 206～207

[5]中森、甲斐沼：ファジィシミュレーションとその環境予測への応用、システム制御情報学会論文誌、Vol.2, No.5（1989）, 166～174

[6]菅野：ファジィ制御、日刊工業新聞社（1988）

問い合わせ先：

〒571　大阪府門真市大字門真1048番地
松下電工株式会社　ISセンター
兼　田　真　由　美
TEL　06－908－6835
FAX　06－906－4631

TB4-1

Software Development Tools for the FC110 Digital Fuzzy Processor

Jon Teichrow, Erik Horstkotte and Masaki Togai, Ph. D.
Togai InfraLogic, Inc.
30 Corporate Park Suite 107
Irvine, CA 92714 USA
Phone: (714) 975-8522
FAX: (714) 975-8524

This paper introduces the FC110 Development System (FC110DS), which is a set of software tools that can be used to develop fuzzy expert systems for the Togai InfraLogic FC110 DFP™ [1]. Whether a user is interested in developing software for custom FC110 based systems or for Togai InfraLogic supported hardware platforms, the FC110DS, which consists primarily of a compiler, a relocatable assembler, and a linker, provides both high and low level programming support.

Introduction

Figure 1 below is an overview of the FC110 software development process, from fuzzy knowledge base capture to final board implementation. This paper is concerned with the highlighted area of the figure, while information regarding the remainder of the figure has been previously described [2]. In short, a user developing software for the FC110 typically builds and tunes a software-only based system to determine whether or not fuzzy logic is appropriate for the application. Once this has been done, the user recompiles the same fuzzy logic knowledge base with the FC110DS and integrates the FC110 DFP and related software into the application.

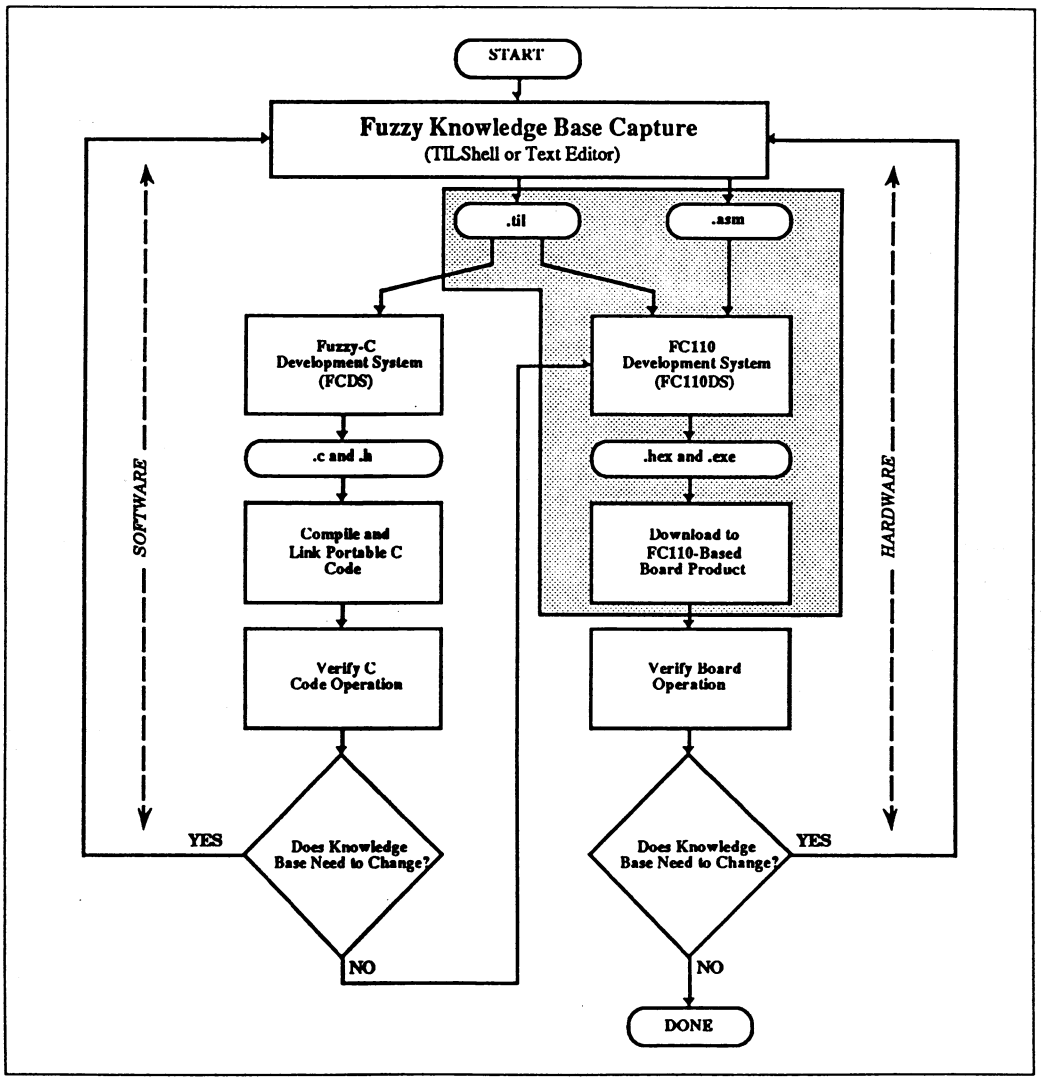


Figure 1 – The FC110DS Software Development Life Cycle

The FC110 Development System

The FC110DS consists of the FC110 FPL Compiler, the FC110 Assembler, and the FC110 Linker. The FC110 Compiler and the FC110 Assembler each produce relocatable object modules that are combined by the FC110 Linker to produce absolute load images for the FC110, and C interface code for the host driver software to link with. Of course, if the developer is creating a standalone FC110 system and has no need for the C interface code, the user can disable the emission of the C code via the FC110 Linker.

A user of the FC110DS can develop software for the FC110 chip at two levels of coding abstraction. The first is at a high level of abstraction using the FC110 FPL Compiler. As input, the FC110 Compiler accepts a language called the Togai InfraLogic Fuzzy Programming Language (FPL™) which allows the user to intuitively write fuzzy logic knowledge bases. FPL uses a simple block structured, object-based approach to describe fuzzy rulebases, membership functions, and variables. It is important to note that when the user first develops a prototype for the software using the Fuzzy-C Development System, the same FPL file containing the fuzzy knowledge base can be used for the second phase of development involving the FC110 FPL Compiler.

The second way to program for the FC110 is at the assembly level; a much lower level of abstraction than FPL. In FPL, a programmer writes rules (such as what follows) which are then compiled into FC110 machine code.

```
RULE Rule1
        IF Theta is Low THEN
                Acceleration is High
END
```

At the assembly level however, the programmer writes mnemonic instructions that have a one-to-one correspondence with FC110 machine code. Here's an example of FC110 Assembly code:

```
get_derror:     load    D(Error),r1
                load    r1, r2
                sub     D(lasterr),r1
                store   r2, D(lasterr)
                add     r1, r1
                store   r1, D(dError)
                rts     always, r0.w
```

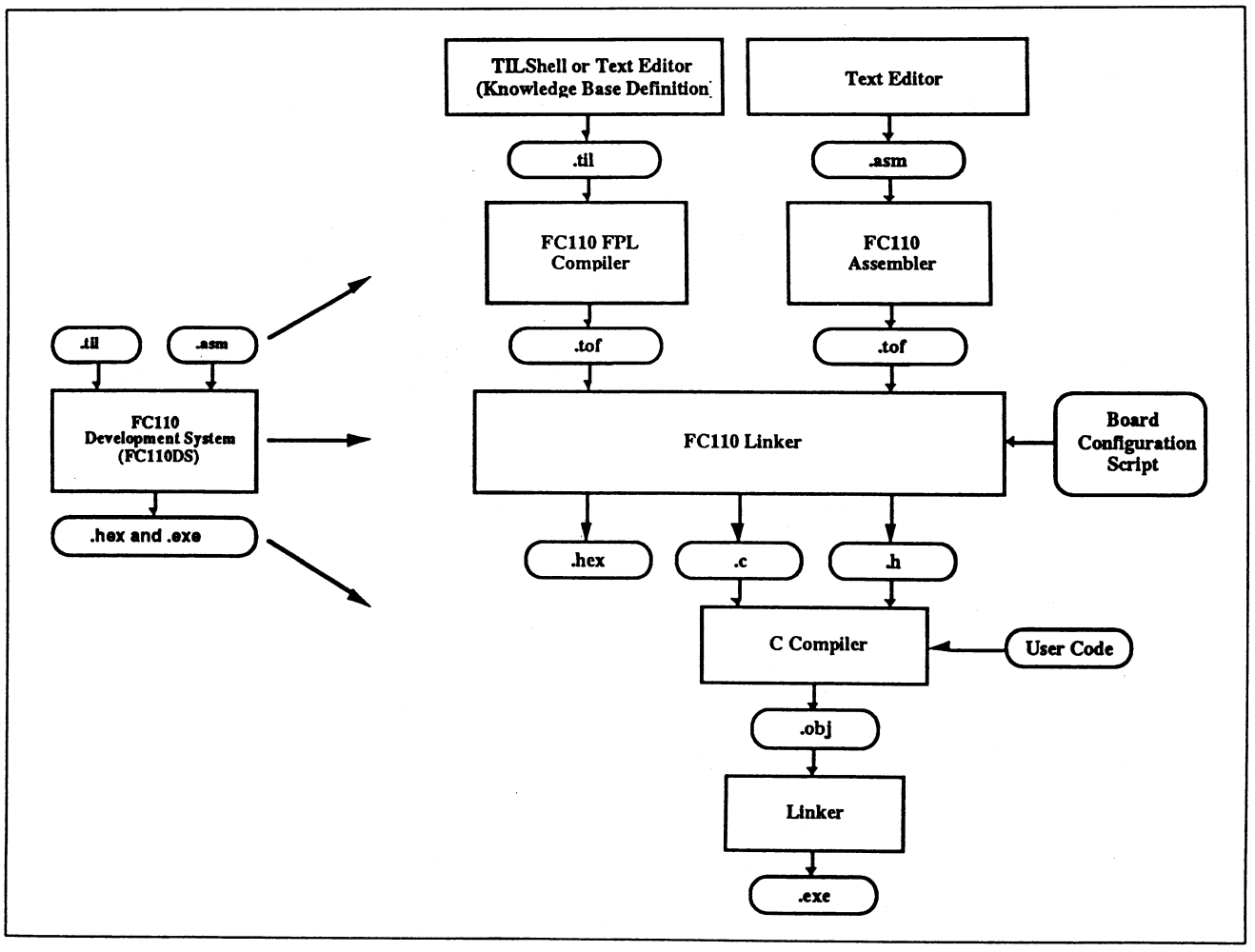


Figure 2 – The FC110DS Block Diagram

The FC110 FPL Compiler

The FC110 Compiler generates optimized machine code for the FC110 DFP Chip based on an input file (written in FPL) that describes a fuzzy knowledge base. The output from the FC110 Compiler is written to an intermediate relocatable object file (a ".tof" file), such that other knowledge bases compiled by the FC110 Compiler or produced from the FC110 Assembler can be linked together.

To facilitate the construction of fuzzy knowledge bases, FPL breaks down the components of the knowledge base into different objects, each representing a different part of the knowledge base. For example, all variables used in an FPL file belong to the class of VAR objects.

The following pseudo code describes the output code that the FC110 Compiler emits. One piece of code is executed to initialize the FC110 and the other is the main loop executed after the FC110 has been initialized.

- Upon FC110 Power-up or Reset

```
Set FC110 mode (8051/6800)
Initialize the stack pointer
For each initialized VAR
   Load the initial value into SRAM
```

- Main Loop

```
Repeat
   Signal host the FC110 is ready
   Halt and wait for host to signal
   Clear the ICR
   Process fuzzy rules
   Load output data into SRAM
Forever
```

The FC110 Relocatable Assembler

The FC110 Assembler converts a source program written in FC110 assembly language into a relocatable ".tof" file that can be processed by the FC110 Linker. An FC110 Assembler source file is made up of a series of lines. An individual source file line can either be an instruction, a pseudo operation, or a comment. An example FC110 Assembler source file containing each of the types of lines is shown in Listing 1.

```
.mod          demoasm

; Shared SRAM section
.sect         shared sram
.pub          Error, dError
.in.s         Error, dError
.out.s        dError

Error:        .ds.b  1
dError:       .ds.b  1
lasterr:      .ds.b  1

; Code section
.sect         code kb
.pub          get_derror

get_derror:
              load   D(Error),r1
              load   r1, r2
              sub    D(lasterr),r1
store         r2, D(lasterr)
              add    r1, r1
              store  r1, D(dError)
              rts    always, r0.w

; Initialization code
              .sect  init kb
              load   #0,r1
              store  r1, D(lasterr)
```

Listing 1 – FC110 Assembly Code

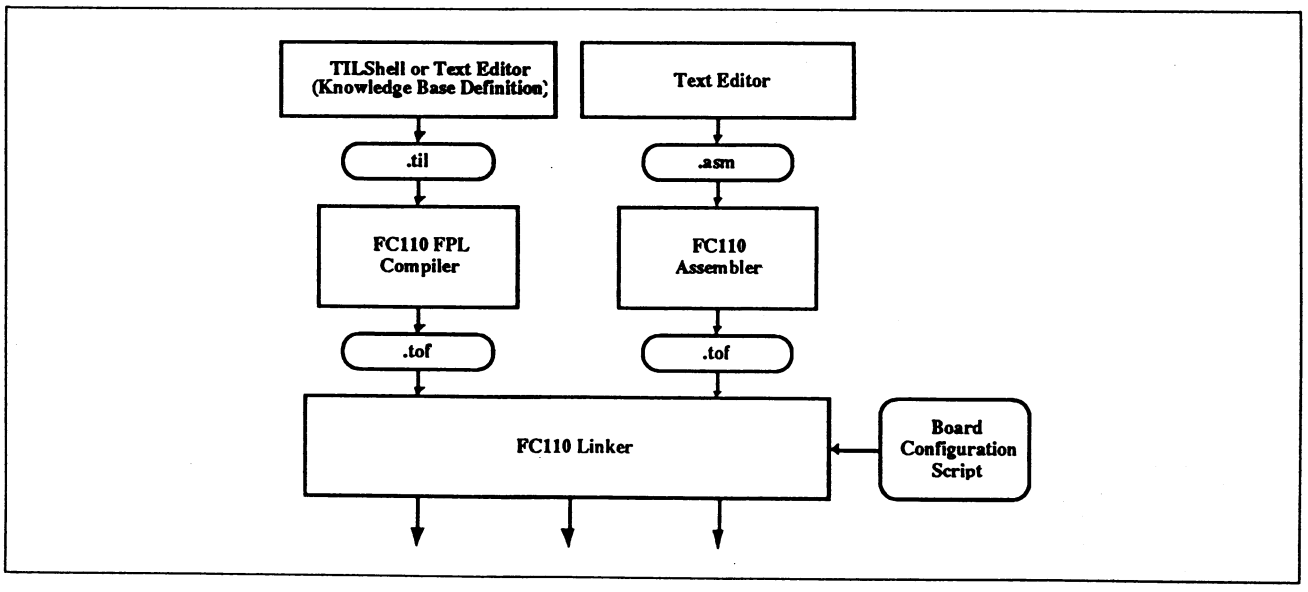


Figure 3 – Hybrid Automatic/Custom Fuzzy Development

The FC110 Relocatable Linker

The third major program block in the FC110DS is the FC110 Linker. The FC110 Linker is responsible for finding all the various parts a user's knowledge base code and bringing them together. The three main inputs to the program are any automatically generated code from the FC110 Compiler, any custom code from the FC110 Assembler, and a board configuration file. The board configuration file contains all the board specific information required by the FC110 Linker (which FC110-based board you plan to use, the board setup, and so on, see Table 1).

The FC110 Linker generates three types of files. The first file type is a .hex file. The .hex file contains the code that will eventually be loaded into the target board knowledge base memory. This code can either be downloaded directly to the board, if the knowledge base memory is RAM, manually burned-in if the memory is a PROM, or permanently programmed into a ROM. The last two file types are the .c file and its associated header file, the .h file. The .c and .h files are responsible for performing both board initialization and variable loading and fetching before and after knowledge base firing.

With the TILShell graphical editor, the FC110 Compiler and the FC110 Assembler at your command, a user wields powerful code generating possibilities, from completely customized code generation using the FC110 Assembler, through fully automatic code generation using the FC110 Compiler, to a combination of both (Figure 3).

file	Execute a script.
CFILE file	Emit all C source to the named file [see cfile and file].
C format	Select the specified C file format.
DO file	Execute a script.
ENTRY tag name	Define an entry point in the current hex file [see entry, tag and name].
HELP [item]	Display this text, or the text for the item [see help].
HEX format	Select the specified hex file format [see hex and format].
HFILE file	Emit all C header source to the named file [see hfile and file].
KBSIZE size	Limit the size of the emitted hex file to the specified number of words [see kbsize and size].
MAIN name	Specifies a user-defined main procedure.
MAP file	Emit a map for the current hex file to the named file [see map and file].
MODE modes	Specifies the MODE instruction for the FC110.
QUIT	Exit from the linker.
SEARCH file [file ...]	Search the specified files for modules needed to define the entries defined [see search and file].
SECTION name type [base]	Control the location and linking order of the named section [see section, name, type and base].
SPLIT offset	Emit a hex file that stores the code offset words higher than the execution address [see split and offset].
SRAMSIZE size	Specifies the number of bytes of SRAM that can be used.
SWAP	Swaps bytes in the emitted hex file.
SYMBOLS file	Emit a debugger symbol table to the named file [see symbols and file].
WRITE file	Starts the actual link process, writing the hex output to the specified file.

Table 1 – FC110 Linker Script Language

References

[1] Rodney J. Corder, "A High-Speed Fuzzy Processor," Proceedings of IFSA, 1989.

[2] J. Teichrow, E. Horstkotte, and M. Togai, "The Fuzzy-C Compiler: A Software Tool for Producting Portable Fuzzy Expert Systems," Proceedings of IFSA, 1989.

TB4-2

ファジィ推論プロセッサのためのファジィ化A/D変換器
A FUZZIFYING A/D CONVERTER FOR FUZZY LOGIC PROCESSORS

池田　博
Hiroshi IKEDA

日産自動車(株)　中央研究所　電子研究所
Electronics Laboratory, Central Engineering Laboratories, NISSAN MOTOR Co., Ltd.

Abstract: A nonlinear A/D converter is proposed, which converts analog inputs into digital outputs of membership grades according to externally selectable membership functions. The possibilities of realizing circuitry of such type are considered for flash A/D, successive approximation A/D, and sigma-delta type A/D converters. A Prototype chip is designed and implemented with 2μm CMOS process. The chip performs 8bit A/D conversion with successive approximations and reference to membership functions, fuzzification, simultaneously. By using the *fuzzifying* A/D converter, the convertion time can be reduced, in principle, by 20 to 40% for fuzzy inference use. Some possible fuzzy controllers are suggested with the fuzzifying A/D converters.

1. はじめに

ファジィ推論のためのハードウエア・エンジンが提案されてから[1]、いろいろなタイプのハードウエアが研究・開発され、具体的に応用されているものもある。ファジィ推論自体は、汎用のワークステーションやマイコンでできるが、専用のプロセッサを活用することにより、汎用マイコンでは達成できない高速推論や、推論速度は速くはないがルール数の多いインテリジェントな制御・処理が可能となる。

ファジィ推論用の専用プロセッサには、大きく分けてアナログ・プロセッサ[2]とデジタル・プロセッサ[1、3-5]がある。アナログのタイプは、推論速度が速く並列化に向いているが、拡張性・柔軟性に乏しく、デジタル・プロセッサと併用することにより使いよいコントローラを構成している[6]。デジタル・プロセッサには、全くのカスタムVLSI[3]や、RISCプロセッサ[4]、メモリ主体のプロセッサ[5]等があり、マイコンに近いレベルから専用VLSIまで、いろいろなレベルが提案されている。どのチップを使うかはシステムによるわけで、要求される推論速度やコストなどを考慮して決める。

このように、ファジィ推論プロセッサとしては、デジタルで構成されることが多い。ファジィ推論では、メンバーシップ関数という、図形情報のようなものを扱うわけであるから、融通の効く記憶装置が容易にできるデジタル回路が適していると思われる。この議論は、ニューロチップの最近の例[7]と比べると興味深い。アナログ回路では、重み係数の記憶が難しいにもかかわらず、ニューロン回路が小さくできるために、多くの試作が発表されている。

ファジィ推論のプロセッサとして、デジタルVLSIを想定すると、実際の応用に対して問題になるのは、アナログ入力に対するA/D変換時間である。通常は汎用のA/D変換器(別IC、あるいはプロセッサ内蔵)を用いて、デジタル入力に変換する(図1)。この時、プロセッサの処理速度が高速であれば、推論速度はA/D変換時間でほぼ決まることになる。従って、推論速度を上げるには、A/D変換器を専用化する方向が考えられる。

ここでは、いくつかのタイプのA/D変換器について、アナログ入力を直接デジタルのメンバーシップグレードに変換する構成を検討する。また、プロセッサに内蔵するのに適した逐次比較型について、具体的にプロトタイプを試作したので報告する。

2. ファジィ化A/D変換器

図2のように、A/D変換と同時にメンバーシップ関数を参照してグレード値で出力すれば、ファジィ推論全体として高速化される。ここでは、このA/D変換器をファジィ化A/D変換器と呼ぶ。さらに、あらかじめ一つのメンバーシップ関数を指定すれば、グレードがゼロでない部分のビット数だけ変換すればよい(図3)。このように、メンバーシップ関数の参照(通常はメモリのアクセス)の省略と、変換するビット数を減らすことで、大幅に速くなる。以下、いくつかの型のA/D変換器について具体的な回路構成を簡単に考察する。

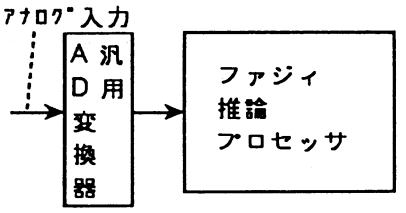


図1. 通常のファジィ・コントローラ

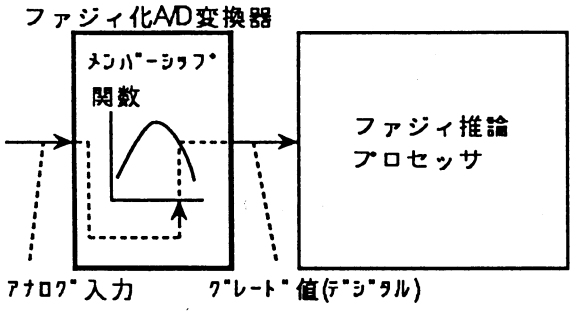


図2. ファジィ化A/D変換器の概念

2.1 フラッシュ型(並列型)A/D変換器

画像処理で使われるフラッシュ型では、コンパレータを精度分だけ並べて同時に比較する(8ビットなら256個)。それらの出力をエンコードしてデジタル値とする。この場合は簡単で、エンコーダをメンバーシップ関数状にすればよい。一つのアナログ入力に対して、二つ以上のグレード値が出力される。

フラッシュ型を用いれば、どの応用でもかなり高速化されるが、コスト、消費電流の点で実際的ではない。

2.2 逐次比較型A/D変換器

中程度の変換速度で、最も広く使われているのが逐次比較型である。この型では、内部のD/A変換器のデコーダをメンバーシップ関数状にすればよい。しかし、一つのデジタル値に対して二つ(あるいは、それ以上)のアナログ値が対応するので、逐次比較の方向を判断する必要がある。これは、次の節で詳しく説明する。

逐次比較型は応用範囲も広く、回路規模も大きくないのでプロセッサに内蔵できる。実際、マイコンや他のプロセッサに内蔵されているのは、この逐次比較型である。

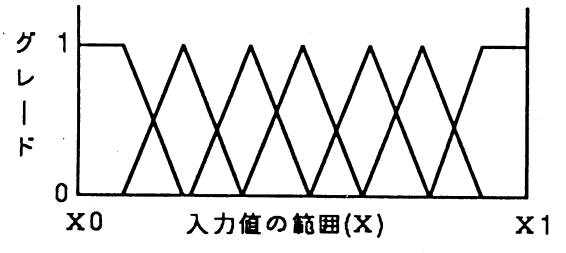


図３.メンバーシップ関数の例
入力Ｘに対して、Ｘ0からＸ1の範囲で7ラベルのメンバーシップ関数がある。

2.3 シグマ・デルタ型A/D変換器

最近、オーディオ帯のA/D変換器として、注目を浴びていて、DSPに内蔵されたものもある。これは、アナログ量をデューティ比がそれに比例するパルスに変換し、そのパルス幅をカウントすることによりデジタル量に変換する。パルスは再び内部D/A変換によって入力のアナログ量と比較される。即ち、全体として一種のサーボ系をなしている。

この変換器をファジィ化A/D変換器にするには、内部D/A変換器をメンバーシップ関数状にすればよい。ただし、D/A変換特性が増加関数か減少関数かで、帰還の極性を切り替えないと、サーボ系を構成できなくなる。今回は試作していないが、興味深い。

3. 逐次比較型ファジィ化A/D変換器

逐次比較型では、内部のD/A変換器の出力を逐次切り替えてアナログ量と比較し、D/A変換器の出力を最大限に近づけた時の入力デジタル値が、変換されたデジタル量となる(図4)。

このA/D変換器にメンバーシップ関数を組み込むには、内部D/A変換器をメンバーシップ関数型の非線形のものにして、あとは逐次比較の手順がうまく行くように制御論理を組めばよい。これを8ビットA/D変換器で具体的に設計し、試作したので、以下、順に説明する。

3.1 ブロック図と回路構成・動作

図5にブロック図を示す。非線形D/A変換器は、図3の横軸を出力アナログ量、縦軸を入力デジタル量とした特性をハード的に持つ。具体的には、D/A変換器内のデコーダ部分を、互いに重なり合うデコーダ・ブロックに分け、各デコーダ・ブロックはメンバーシップ関数型(プロトタイプでは三角形)にデコードされる。従って、デコーダ・ブロックでは、一つのデジタル量に対してアナログ量が2つある。デコーダ・ブロック間では、D/A変換器内の基準電位がオーバラップして

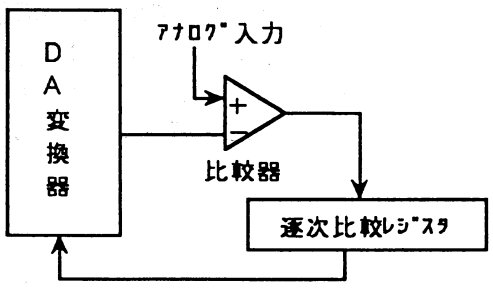


図4. 逐次比較型A/D変換器の構成

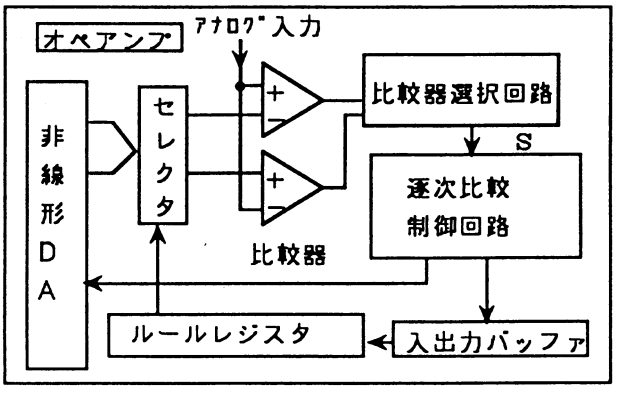


図5. 逐次比較型ファジィ化A/D変換器の構成

入力されている。ICパターン的には、少々工夫を要するブロックである。

非線形D/A変換器からは、各メンバーシップ関数から2個ずつのアナログ値が出るので、図3の関数では合計14個が出る。これをルールレジスタの内容に応じて選択し、指定されたメンバーシップ関数に対応するアナログ量2個を一対の比較器に送る。ルールレジスタの内容は、入出力バッファを通じて、外部から書き込むことができる。

一対の比較器は図6のように接続されており、アナログ入力(A1, A2, A3)が、メンバーシップ関数のどの位置にあっても、逐次比較の正しい次のステップに行くように構成できる。出力Sが0のときはD/A変換器のデジタル値をアップの方向へ、1のときはダウンの方向に行くように、逐次比較制御回路を構成してある。2値関数のメンバーシップ関数では、比較器選択回路は単純なORゲートでよい。さらに複雑なメンバーシップ関数の形状では、別の回路を考える必要がある。以上の構成は、入力アナログ量が、非線形D/Aより出力されるメンバーシップ関数のどちらの斜線にあるか判断し、そこに接続された比較器を選択することに対応する。

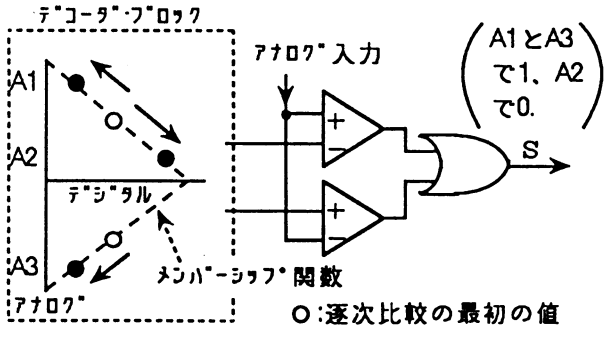


図6. 比較器と選択回路の動作

メンバーシップ関数の形状は、非線形D/Aのデコーダがプロトタイプでは固定のゲートであるため変更できないが、チップに組み込んだオペアンプにより平行移動することは可能である。移動量は内部のレジスタの値で調節する。

3.2 試作ICの概要

以上のような設計で、プロトタイプ・チップを試作した。プロセスは、ポリシリコン・ゲート、メタル1層配線の2μmCMOSを用いた。チップサイズは、1mm×2mmであった。写真1に、試作ICの顕微鏡写真を示す。大きなブロックの配置は、ほぼ図5と同様になっている。

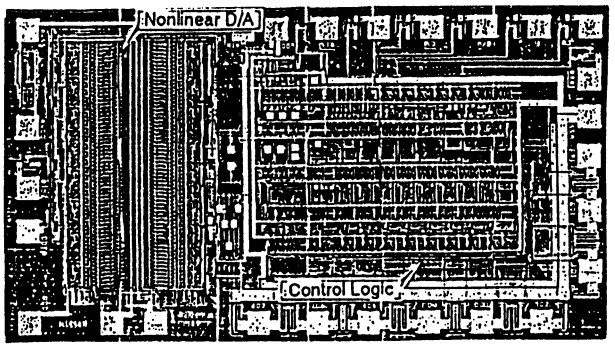


写真1. 逐次比較型ファジィ化A/Dの試作チップ

3.3 評価結果

基本的な動作について評価したので、簡単にまとめる。制御信号を書き込みモードにして、ルールレジスタの内容を変えると、A/D変換の形がメンバーシップ関数に応じて変わる。それぞれのメンバーシップ関数については、逐次比較により、所定の2値関数が表現されている(図7)。

変換特性は、変換時間が最小約250μs(実質5ビット分、通常のA/D変換をすると400μsになる。)であり、精度は±(1/2)LSB以内である。

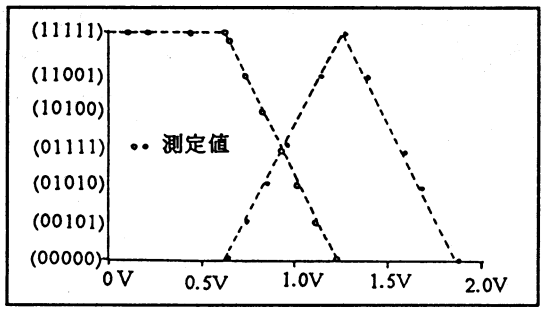


図7. ファジィ化A/D変換器の変換動作

3.4 特徴のまとめと可能な性能

試作したチップにみるように、逐次比較型ファジィ化A/D変換器の特徴は次のようにまとめられる。

(1)メンバーシップ関数を参照する必要がない。ファジィ推論プロセッサにおけるメモリアクセス時間だけ高速化される。

(2)あらかじめメンバーシップ関数を指定するので、変換ビット数が少なくなり、高速になる(試作では、8/5=1.6倍)。

(3)平行移動によるメンバーシップ関数の調整が可能である。

さらに、今回の試作には盛り込まなかったが、回路構成のいくつかの変更で、次のことが可能である。

(4)比較器を並列に並べ、すべてのメンバーシップ関数を同時にA/D変換する。

(5)D/Aの基準電位をオペアンプで変えることで、メンバーシップ関数の形状をかなり自由に変えられる。

(6)D/Aのデコーダの切り替えにより、通常の線形のA/D変換もできる(三角形のメンバーシップ関数の場合)。

3.5 応用例

このA/D変換器の応用としては、大別して次の2つが考えられる。

(a)個別のICとして使う。

(b)プロセッサの内蔵A/Dとして使う。

すべてアナログ入力ならば、複数のファジィ化A/D変換器を並べて、それらのデジタル出力の組み合わせの最小値を求めれば、条件部の推論結果である「適合度」のセットが揃うことになる。ファジィ化A/D変換器とデジタル比較器で、条件部の演算ができるので、ファジィ推論の後件部が非ファジィのような簡単な場合は、ファジィ化A/D変換器と簡単な論理ICのいくつか(あるいは、ゲートアレイ)で、ファジィ・コントローラが構成できてしまう。

プロセッサの内蔵A/Dとして用いる応用も魅力がある。逐次比較型で設計しているので、十分内蔵できるレベルである。この場合、プロセッサのコアとの制御信号、データ転送の詳細については十分考察する必要がある。

4. まとめ

ファジィ推論プロセッサの前段処理として、メンバーシップ関数を組み込んだA/D変換器を提案し、アナログ入力に対して、推論が高速化されることを示した。A/D変換とメンバーシップ関数参照が、シリアルでなく、「同時に」行なわれるからである。いくつかの代表的なA/D変換器のタイプについて、構成の可能性を検討した。

8ビットの逐次比較型ファジィ化A/D変換器を、基本の構成に絞って設計・試作して、所望の動作を確認した。

最後に、簡単な応用について議論した。アナログ入力がほとんどであるようなシステムでは、このファジィ化A/D変換器を用いて、容易にファジィ・コントローラが作れる。

＜参考文献＞

[1] M. Togai and H. Watanabe,"An Inference Engine for Real-Time Approximate Reasoning:Toward an Expart on a Chip",IEEE EXPART,Vol.1,No.3,pp55-62,'86.

[2]T. Yamakawa,"A Simple Fuzzy Computer Hardware System Employing MIN&MAX Operations",Proc. 2nd IFSA Congress, pp827-830, '87.

[3]H. Watanabe, W.D.Dettloff,and K.E.Yount,"A VLSI Fuzzy Logic Controller with Reconfigurable, Cascadable Architecture",IEEE J. Solid State Circuits,Vol.25,No.2, pp376-381, '90.

[4]R.J.Corder,"A High-Speed Fuzzy Processor",Proc.3rd IFSA Congress, pp379-381, '89.

[5]H.Arikawa and K.Hirota,"Virtual Paging Fuzzy Chip &Fuzzy Workstation as its Design Environment",Proc. 3rd IFSA Congress, pp647-650, '89.

[6]Y.Tasaka,"Hybrid Bus Fuzzy Controller with Analog Fuzzy Chips",Proc. 3rd IFSA Congress,pp280-283,'89.

[7]H.P.Graf and L.D.Jakel,"Analog Electronic Neural Network Circuits", IEEE Circuits and Devices Magazine, Vol.7, pp44-49, '89.

問い合わせ先: 〒237　横須賀市夏島町1
日産自動車(株)
中央研究所　電子研究所
池田　博
TEL 0468-62-5183　FAX 0468-65-8104

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

TB4-3

ファジィ推論専用プロセッサの開発

IMPLEMENTATION OF A FUZZY INFERENCE PROCESSOR

佐々木守　上野文男　井上高宏　白井雄二

Mamoru SASAKI, Fumio UENO, Takahiro INOUE and Yuji SHIRAI

熊本大学　工学部　　八代高専

Fuculty of Engineering, KUMAMOTO University　Yatsushiro National College of Technology

abstract : This paper describes two types of fuzzy micro-processors. One is an antecedent processor, the other is a consequent processor. Each processor has a suitable architecture for the process carried out in each part, i.e. the antecedent processor has a SIMD (Single-Instruction Multi-Data-Stream) type parallel architecture and the consequent processor has a functional memory type parallel architecture. The features of these processors are high speed operations and flexibilities of the rule configuration. For example, the maximum inference speed is 7.5 MFLIPS (Mega Fuzzy Logic Inference Per Second), and the antecedent processor can process 960 rules.

1. まえがき

ファジィ推論の応用システムを実時間で使用する場合，処理速度の点からハードウエアレベルのファジィ情報処理装置が要求される[1]-[3]．また，応用が進んでいるルールタイプのファジィ推論の実用システムを構築する場合，ルール等の学習方法が研究されているが，現段階では，cut and tryでルールやメンバーシップ関数のパラメータを決定している．ルールやパラメータの決定作業をより効率的に行なうため，開発環境の整備は重要である[2]．マウスやマルチウインドによるマンマシンインタフェースの充実とともに，ハードウエアによる高速シミュレータも必要になる．そこで今回，ルールタイプのファジィ推論専用プロセッサを開発した．以下では，開発したファジィ推論専用プロセッサの設計方針，機能，特長等を報告する．２章では，ルールタイプのファジィ推論アルゴリズムの並列実行を検討して，最適な並列処理方法，および，そのVLSIアーキテクチャを決定する．３．４章では各構成ブロックの機能，特長を説明する．５章では本プロセッサを用いたシステム構成，およびその応用について考察する．

2. ファジィ推論の並列実行

ルールタイプのファジィ推論の並列実行を考える場合，各ルールごとその処理が独立しているので，一つのルールの処理を並列実行する単位に選ぶことが自然である[3]．しかし，ルール数が増加した場合，次のような問題が生じる．

(1)各ルールを完全に独立に処理するためには，ルールごと一つの処理ユニットを割り当てねばならず，ルール数の増加にともない，回路規模の増大が問題になる．

(2)推論結果を統合する処理で，ルール数だけの引数に対する論理演算（MAX演算）を行なうため，ルール数が増加した場合，各ルールの推論結果を統合する処理が推論速度のクリティカルになってくる．

以上のことから，ルール数の増加にともない，並列処理の粒度（処理単位）を大きくした方が有利になる．

一方，メンバーシップ関数の種類は応用例から10種類以下の場合がほとんどである．そこで，後件部のラベル（メンバーシップ関数）が等しいルール群を集め，一つの新しいルールをつくる．この新しいルールを並列処理の単位にすることで，処理ユニット数を後件部のラベル数に抑えることができ，さらに，推論結果を統合する演算の引数の個数もラベル数にすることができる．入力数２，出力数１，後件部のラベル数２の場合を例に考えると，次の４つのルールは，

```
if  x1 is A11, x2 is A12,  then y is C1
if  x1 is A21, x2 is A22,  then y is C2
if  x1 is A31, x2 is A32,  then y is C2
if  x1 is A41, x2 is A42,  then y is C1
```

次のように，２つのルールにまとめられる．

```
if (x1 is A11, x2 is A12) or
     (x1 is A41, x2 is A42) then y is B1
if (x1 is A21, x2 is A22) or
     (x1 is A31, x2 is A32) then y is B2    (1)
```

式(1)では，前件部は加法標準形になっている．また推論過程において，or結合子をルール統合演算子に対応させるとルールをまとめる以前の推論結果とまったく同じ結果を得る．MIN-MAX推論法を採用すると，入力x1=x1', x2=x2'の前件部に対する適合度w1は

$$w1=[A11(x1')\wedge A12(x2')]\vee[A41(x1')\wedge A42(x2')] \quad (2)$$

と求められる．但し，∧はMIN演算，∨はMAX演算である．

次に，後件部のラベルBiに対する推論結果Bi'を

$$Bi'(y) = wi\cdot Bi(y), \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

として求める．ルール全体の推論結果B'は，各ルールの推論結果から，

$$B'(y) = \sum Bi'(y)$$

$$= \sum wi \cdot Bi(y) \qquad (4)$$

確定値y'が必要な場合は，重心法を採用してメンバーシップ関数B'から，

$$y' = \frac{\sum B'(y) \cdot y}{\sum B'(y)} \qquad (5)$$

上に示した推論アルゴリズムは式(2)の前件部を処理する部分（レベル１）と式(3),(4),(5)の後件部を処理する部分（レベル２）に分けることができる．それぞれのレベルで処理される内容を並列実行の立場から考察すると，レベル１ではルールごとに一つの処理ユニットを割当て，適合度wiを並列に求めることができる．一方，レベル２では，式(4)が示すように，各ルールの推論結果を統合する処理で，ルール数だけの引数に対する論理演算（MAX演算）を行なう必要があり，多入力演算器等の演算レベルでの並列性が要求される．以上のことから，推論アルゴリズム全体を一つのアーキテクチャで実現せずに，レベル１，２，それぞれの処理内容にあった並列アーキテクチャを採用する．レベル１では，各ルールごと同一の演算を異なるデータに対して行なうので，ルール数だけのプロセッシングエレメント(PE)を用意してSIMD(Singl-Instruction Multi-Data-Stream)方式の並列アーキテクチャを採用する．またレベル２では，先に提案した多入力MAX演算アルゴリズム[4]をハードウェア化するのに適した機能メモリタイプの並列アーキテクチャを採用する．機能メモリとは，記憶素子間に論理回路を配置して記憶素子数の非常に多くのデータを引数とする演算を効率よく実現できるアーキテクチャであり，画像処理や連想メモリとして用いられている．以上のような設計方針でファジィ推論専用プロセッサを開発した．その詳細を前件部（レベル１），後件部（レベル２）に分けてそれぞれ説明する．

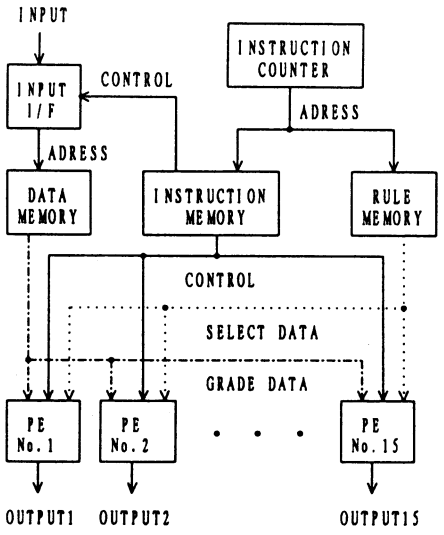


図１　前件部プロセッサ

３．前件部（レベル１）プロセッサの構成

図１に前件部プロセッサのブロック図を示す．各ブロックの機能，特長を説明する．

(1)データメモリ

データメモリは，前件部で用いられるメンバーシップ関数を格納する．メンバーシップ関数のフォーマットは，要素数64，グレード16レベル（4ビット）で，１つのメンバーシップ関数は64×4＝256ビットで表現される．データメモリは，４つのメモリバンクから構成され，各バンクはメンバーシップ関数を14種類格納できる．データはバンクを指定する２ビットのバンクアドレスとメンバーシップ関数の要素を指定する６ビットのエレメントアドレスの合計８ビットによって読み出される．エレメントアドレスは推論入力に対応する．データバスには，指定されたバンクの14種類のメンバーシップ関数の指定された要素のグレードが一括して読み出される．また連続して読み出されるデータのアドレスを同時に与えて，そのデータをメモリの出力部で切り換えるインタリーブ方式を採用して高速読み出しを実現した．

(2)ルールメモリ

ルールメモリはメンバーシップ関数の種類を表すラベルを格納する．このラベルは式(1)のルールではA11，A12等に対応し，ハードウエア上では各PE(Processing Element)がデータバス上の14種類のグレードデータから受け取るべきデータを選ぶセレクト信号になる．セレクト信号は4ビットで14種類のラベルおよびMAX演算，MIN演算のNOP処理ラベルを指定できる．また，ルールメモリでもインタリーブ方式を採用して高速読み出しを実現している．

(3)命令メモリ

PEおよび入力部インタフェースに対する命令列を格納している．内容は命令カウンタによって順番に読み出される．PEに対する命令はMIN演算繰り返し終了フラグ，MAX演算繰り返し終了フラグ，推論の終了フラグから構成され，その内容が直接PEを制御するタイミング信号になる．入力部インタフェースに対する命令は入力変数格納レジスタのアドレス，その変数が使用するデータメモリのバンク指定である．命令メモリの内容を書き換えることでPEに対する制御タイミングを直接変えることができ，ルールの形式（入力変数の個数，前件部を加法標準形と見たときの項数など）を任意に設定できる．

(4)Processing Element(PE)

図２にPEの構成図を示す．入力部のセレクタで自分の必要とするデータを選択する．次に前件部を表す加法標準形の各項ごとの論理積をMIN演算器で実行して，項と項との論理和をMAX演算器で実行する．MIN演算器とMAX演算器の間にレジスタを設けてパイプライン処理を実現してスループットを向上させている．また，後件部プロセッサではビットシリアル演算を採用しているので，求めた適合度はシフトレジスタでパラレルーシリアル変換された後，MSBからシリアルデータとして出力される．

(5)入力部インタフェース

入力変数を格納するための16個のレジスタ群から構成され，命令メモリから入力変数格納レジスタのアドレスとその変数が使用するデータメモリのバンク指定

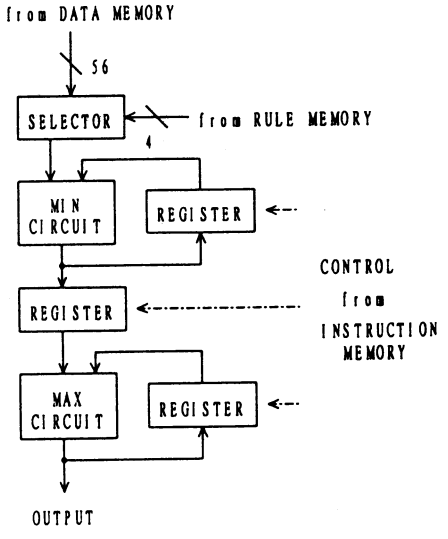


図２　PE（前件部）の構成

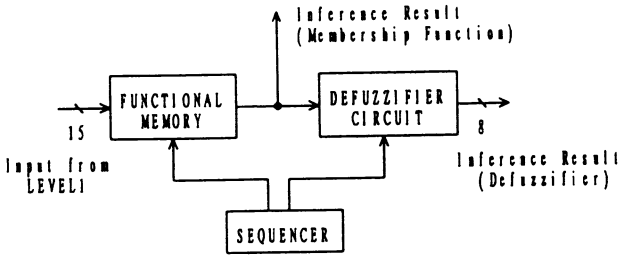


図３　後件部プロセッサ

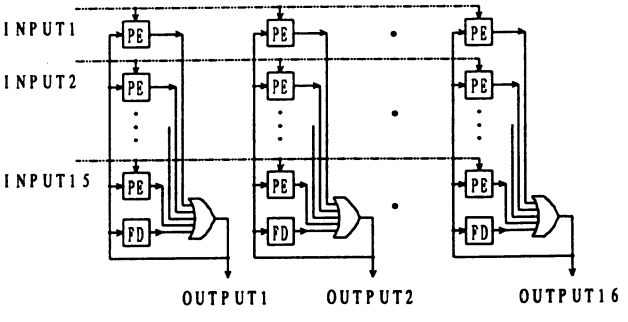


図４　機能メモリの構成

を受取り，データメモリのアドレスを生成する．また，推論実行中に次の推論入力データを設定でき，入力データ設定のための実行待ち時間をなくした．

4．後件部（レベル２）プロセッサ

図３に後件部プロセッサのブロック図を示す．式(3),(4)の処理をする機能メモリと式(5)の計算をする非ファジィ化回路，およびそれらを制御するシーケンサから構成される．図４に後件部処理のための機能メモリの構成を示す．マトリックス状に配置したPE群の１行で１つのメンバーシップ関数を表す．各PEはメンバーシップ関数の１つの要素に対応する．PEは横方向を１ビットの入力バスで接続され，１つのメンバーシップ関数を表すPE群に同一のシリアルデータが放送される．また，縦方向のPEの出力は１つの多入力OR回路（ロジック回路）に送られ，等しい要素に対応するPE群の出力が論理和演算で統合される．

(1)Processing Element (PE)

図５にPEの構成図を示す．データラッチには，対応するメンバーシップ関数の対応する要素のグレード(4ビット）が格納される．グレードはセレクタによってMSBから順次１ビットずつ読み出される．MIN演算器では，読み出されたデータと入力データとのMIN演算をビットシリアルに行う．ここで，MAX/MIN演算をビットシリアルに計算するアルゴリズムを説明する．C=MAX(A,B)を例に説明するが，A,B,Cはnビットのバイナリナンバ，ai,bi,ci = 0,1 (i=0,1,･･･,n)は，それぞれA,B,Cのi番目のビットを表す．ciは次の漸化式で求めることができる．

$$ci = (Qai \cdot ai) + (Qbi \cdot bi) \quad (6)$$
$$Qai-1 = Qai \cdot (\overline{ci} + ai) \quad (7)$$
$$Qbi-1 = Qbi \cdot (\overline{ci} + bi) \quad (8)$$

但し，･，＋は２値論理のAND,OR演算子，Qai，Qbiは，MSBからiビット目までの比較結果を保持する状態変数．漸化式(6),(7),(8)を i=n-1 から 0まで初期値Qan-1=Qbn-1=1で繰り返すとC=MAX(A,B)が求まる．MIN演算の漸化式は，式(6),(7),(8)と双対な式になる．

$$ci = (Qai + ai) \cdot (Qbi + bi) \quad (9)$$
$$Qai-1 = Qai + (\overline{ci} \cdot ai) \quad (10)$$
$$Qbi-1 = Qbi + (\overline{ci} \cdot bi) \quad (11)$$

（但し，初期値Qan-1 = Qbn-1 = 0）

上記のMAX/MIN演算の漸化式は容易に多入力化できる．C=MAX(A1,A2,･･･,Am)を例に説明する．但し，Aj(j=1,2,･･･,m)，Cはnビットのバイナリナンバ，aji，ci = 0，1(i=0,1,･･･,n)は，それぞれAj,Cのi番目のビットを表す．ciを求める漸化式は，

$$ci = (Qa1i \cdot a1i)+(Qa2i \cdot a2i)+ \cdots +(Qami \cdot ami)$$
$$= c1i + c2i + \cdots + cmi \quad (12)$$
$$cji = Qaji \cdot aji \quad (13)$$
$$Qaji-1 = Qaji \cdot (\overline{ci} + aji) \quad (14)$$

図５のMIN演算器では，式(9),(10),(11)をロジック回路とフリップフロップで実現している．多入力MAX演算器では，同様に式(13),(14)を実現して，式(13)のcjiを出力する．これはPEの出力になり，すでに説明したように一つ上位の階層で各PEの出力を多入力OR回路で結合して，式(12)を実現している．また，MIN演算器と多入力MAX演算器の間にレジスタを設けてパイプライン処理を実現してスループットを向上させている．

(2)再帰推論処理部

再帰型ファジィ推論は推論結果の振動を抑えるなどの効果が確認され，将来その応用が期待できる．今回，後件部プロセッサに機能メモリタイプのアーキテクチャを採用したので，再帰型推論は容易に実現できた．再帰推論処理部の動作を説明すると，まず，フリップフロップで推論結果を一時記憶する．それに忘却係数を掛けて，次の推論結果に多入力MAX演算器を通して重ね合わせる．忘却係数をゼロにすると，再帰推論は行なわず，通常のファジィ推論を行なう．

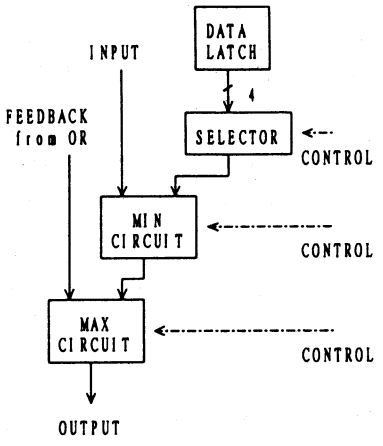


図５　PE（後件部）の構成

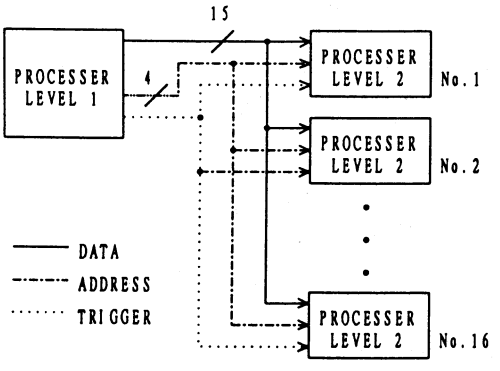


図６　システム構成

５．チップの諸元とシステム構成，応用

３，４章で説明した前件部プロセッサ，後件部プロセッサをそれぞれ１チップで実現した．1.2μmCMOSプロセス，スタンダードセル方式で設計した．諸元を表１に示す（モード設定で後件部プロセッサの構成を変えることができる）．設計したプロセッサを用いたシステムの構成図を図６に示す．図６では，前件部チップがマスタ，後件部チップがスレーブとして働き，後件部チップは前件部チップからのトリガを受取り，推論を開始する．後件部プロセッサは１チップで２つまでの出力変数を取り扱うことができる．さらに多くの出力変数が必要な場合は，前件部チップの推論出力バスに16個まで後件部チップを接続できる（図６参照）．この場合，後件部チップに識別のための4ビットアドレスを割当て，前件部チップから出力される後件部識別アドレスによりバス上のデータ，および推論開始のトリガが自分に対するものかどうか判断する．

前件部プロセッサ，後件部プロセッサはアーキテクチャ，およびその処理内容が異なり，それぞれ単体でも各種の応用が期待できる．たとえば，前件部プロセッサは２章で説明したMAX/MIN演算による加法標準形を複数同時に実行でき，パターン認識やクラスタリングなどへ応用が期待できる．一方，後件部プロセッサはMAX-MIN合成演算を高速に実行でき，ファジィ関係を用いた故障診断や医療診断などへの応用が期待できる．

表１　諸元

	前件部プロセッサ	後件部プロセッサ	
		MODE=0	MODE=1
ルール数（最大）	960	——	——
入力数　（最大）	16	——	——
推論速度（最大）	7.5MFLIPS　（クロック30MHz使用）		
出力数	——	1	2
ラベル数	14	15	15
メンバーシップ関数の要素数	64	32	16

６．まとめ

ファジィ推論の実時間応用システムが構築でき，また，ルール設計のためのハードウエアシミュレータとしても使用できるファジィ推論専用プロセッサを開発した．その特長は高速推論，およびルール構成の柔軟性である．本プロセッサによってファジィ理論の新たな応用分野が期待される．最後にチップ化にあたり，御討議並びに御援助頂いた沖電気工業株式会社　片白剛史氏を始め関係諸氏に深く感謝致します．

参考文献

(1)T.Yamakawa : "Fuzzy microprocessors rule chip and defuzzifier chip", Proc. of The International Workshop on Fuzzy System Applications, pp.51-52, (1988).

(2)M.Togai and S.Chiu : "A fuzzy chip and a fuzzy inference accelerator for real-time approximate reasoning", Proc. 17th IEEE Int. Symp. Multiple-Valued Logic, pp.25-29,(1987).

(3)H.Watanabe, W.Dettloff and K.Yount : "A VLSI fuzzy logic controller with reconfigurable, cascadable architecture", IEEE J. SC vol.25, no.2, pp.376-382, (1990).

(4)M.Sasaki, T.Inoue, F.Ueno and Y.Shirai : "A fuzzy hardware for MAX-MIN composition", Proc. of The International Workshop on Fuzzy System Applications, pp.33-34, (1988).

［問い合わせ先］
〒860　熊本市黒髪 2-39-1
熊本大学　工学部　電気情報工学科
佐々木　守
TEL : 096-344-2111(内)3842
FAX : 096-345-1553

TC1-1

メンバーシップ関数の一解釈とファジィ集合演算についての一提案

A proposal of fuzzy set operators with an interpretation of membership functions

間渕　重昭
Shigeaki MABUCHI
神戸商船大学　輸送科学科
Transportation Science, Kobe University of Mercantile Marine.

Abstract:Grade of membership is assumed to be determined as the ratio of evidences supporting a given element's membership to a fuzzy subset to all the necessary evidence grounds relevant to the judgment of its membership. This ratio gives an interpretation of membership grade as a conditional probability conditioned by the element.

Then by assigning dependence relations of the evidences to those of the fuzzy subset, the set operators are defined as probabilistic operators with dependence relations.

The properties of the operators is studied and it is found that the proposed operators satisfy all the basic properties satisfied by the crisp set operators. Also discussed is an application to a fuzzy inference in fuzzy controllers.

1．はじめに

ファジィ理論はその応用面においても近年著しい発展をみせているが、手法的あるいは考え方が必ずしも十分に確立されているとはいえない問題として集合演算則の選択の問題がある。つまり、数多く存在するファジィ集合演算則の中から適用対象の文脈からみて、どの演算則を使うのが適切かという問題に対して、現在はまだ十分な解答が用意されていないと考える。

これは又クリスプ集合演算のみたす基本的諸性質をすべて満足するファジィ集合演算は、パラメタ付のものでない限り存在しないという事実［１］とも関連する。たとえば変化しうる状況に適切に対応しうるためには、一般には複数個の演算則あるいはパラメタ付のものを用いざるを得ない。その際場当り的に演算則またはパラメタ値を選ぶということではなく一貫性のある選択方針をもってするのが望ましい。Ｌｅｕｎｇはこの意味で状況に応じて調節可能なパラメタをもつ演算則が必要との指摘をしている［２］。

上述の問題とかかわりのある問題として、メンバーシップ関数（以下ＭＦと略記）の決定の問題があるが、これについても一般的に確立された決定方式とか考え方があるとはいいがたい。通常ＭＦは主観的にきめてよいとされているが、全く任意にというのではファジィ・モデル構成の上で一貫性を欠くなどの不都合をともなう可能性がある。

以上の点を考慮して、本稿では集合演算則との関係を念頭においたＭＦの作り方の基礎概念と、適用対象の状況に応じて定まるパラメタ付演算則の提案をし、これに対する検討を加える。

2．メンバーシップ関数の概念的構成法

ＭＦを主観的にきめるとしても、その際も人は何らかの根拠にもとずいてきめているはずである。その主観的決定過程を想像して、次のようなＭＦの構成手順を考える。

全体集合Ｘとその要素ｘを考え、Ｘの中のファジィ部分集合Ａを

$$\{ (x,\ \mu_A(x)) \},\quad \forall x \in X$$

なる順序対の集まりと定義する。ここで$\mu_A : X \to [0,\ 1]$は$x \in X$を閉区間［０，１］に写すＭＦである。

ｘがＡに属するか否かを判断するには、そのために必要な参照事項を十分に集め、その事項の中から$x \in A$を支持する根拠となるものを選びだすものと想定する。そのような根拠がその反対の根拠に比べ多いほどｘのＡへの帰属度が大きいとみるのが自然であろう。したがってこれを次のように表す。

$x \in A$にかかわる上述の参照事項の集合を根拠集合G_Aと呼び、その根拠要素$u \in G_A$のうち$x \in A$（$x \notin A$）を支持する要素の集合を肯定（否定）集合A_e（$\bar{A}_e$）とする。すなわち

$$A_e = \{ u \mid u \ \text{spt}\ x \in A;\ u \in G_A \}$$

但しspt はsupportの略記とする。ここでG_A、ｕ、A_eなどは与えられたｘに対してきまるので、詳しくはG(x)、u(x)、A_e(x)の形に書くべきだが、以下では常にｘが与えられたという条件の下で議論するのでこれら引数の表記は簡単のため省略する。

肯定根拠の多さの程度を次に示す重みつき頻度の形で評価できると考え、これでｘが与えられたという条件の下でのＡの条件付確率Ｐ(Ａ | ｘ) が定義できるものとし、ＭＦ$\mu_A(x)$はこの条件付確率であると解釈する。

$$\left.\begin{aligned} &\mu_A(x) \equiv P(A \mid x) \triangleq m(A_e) / m(G_A),\quad \forall x \in X \\ &m(Ae) = \sum_{u \in G_A} m(u)\chi_{A_e}(u),\qquad m(G_A) = \sum_{u \in G_A} m(u) \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

ここで$m: G_A \to [0, 1]$はG_A上の根拠の重み関数（重み分布）、χ_{A_e}はA_eの特性関数である:

$$\chi_{A_e}(u) = \begin{cases} 1, & \text{if } u \in A_e \\ 0, & \text{if } u \notin A_e \end{cases} \qquad (2)$$

注１）$m(A_e)$は上の定義では線形評価の一種となっている。これはもっと一般性のある測度で定義してもよいし、意味づけとしてはuが肯定要素であることの確信度を表わす関数値の総和と考えることもできる。またはもっとも簡単には単なる要素の数とする考え方もあろう。つまり$m(A_e)$はA_eの濃度とする。但しこのときuはできるだけ均等で独立な要素になっていると想定する。

２）G_Aはここでは有限集合と仮定している。

３）本質的にはG_AやA_e自体もファジィであろうし、mの値も確定的にはなりにくい。その場合$P(A \mid x)$の値がファジィ数または区間値になる。その場合の議論は別の機会にゆずる。

４）（１）に至る考え方はＭＦの概念的構成であって、その実際上の実現手段としては統計的方法など種々考えられ、これまでのいくつかのＭＦ構成に関する方法［２］－［５］なども、被験者を根拠集合の要素と考えるなど根拠集合の考え方によって、ここでの概念的構成法の実現例とみることもできる。

５）HisdalもＭＦを条件付確率と解釈した考えを提出しているが［６］、この結論に至る考え方が異なる。

uは$u \in A_e$か$u \notin A_e$、i.e.、$u \in \bar{A}_e$で他の場合はありえないと仮定しているので次が成り立つ。

$$G_A(x) = A_e(x) \cup \bar{A}_e(x), \qquad \forall x \in X \qquad (3)$$

$$\chi_{A_e}(u) + \chi_{\bar{A}_e}(u) = 1, \qquad \forall u \in G_A$$

$$m(A_e) + m(\bar{A}_e) = m(G_A)$$

$$P(A \mid x) + P(\bar{A} \mid x) = 1, \qquad \forall x \in X \qquad (4)$$

$$P(X \mid x),\ P(\emptyset \mid x) = 0 \qquad (5)$$

次に２つのファジィ部分集合Ａ,Ｂの直積$A \times B \subset X \times X$を考える。Ａ,Ｂに対してそれぞれ根拠集合$G_A$、$G_B$が対応し、

$$u \in A_e \Rightarrow x \in A, \qquad v \in B_e \Rightarrow x \in B,$$

とする。当然

$$(u \in A_e)\ \mathrm{and}\ (v \in B_e) \Rightarrow (x \in A)\ \mathrm{and}\ (x \in B) \Leftrightarrow x \in A \cap B$$

$$A_e \cap B_e = \{(u,v) \mid (u,v)\ \mathrm{spt}\ x \in A \cap B\ ;\ (u,v) \in G_A \times G_B\}$$

と書け、同様に$A_e \cap \bar{B}_e$、$\bar{A}_e \cap B_e$、$\bar{A}_e \cap \bar{B}_e$も表せる。

又（１）－（４）などの拡張として

$$\chi_{A_e \cap B_e}(u,v) = \begin{cases} 1, & \text{if } (u,v) \in A_e \times B_e \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$m(A_e \cap B_e) = \sum_u \sum_v m(u,v) \chi_{A_e \cap B_e}(u,v),$$

$$m(G_A \times G_B) = \sum_u \sum_v m(u,v)$$

但し$m(u,v)$は$G_A \times G_B$上での重み分布（$m: G_A \times G_B \to [0, 1]$）.

$$\mu_{A \cap B}(x) \equiv P(A \cap B \mid x) \triangleq m(A_e \cap B_e) / m(G_A \times G_B), \qquad \forall x \in X \qquad (6)$$

$$G_A \times G_B = (A_e \cap B_e) \cup (A_e \cap \bar{B}_e) \cup (\bar{A}_e \cap B_e) \cup (\bar{A}_e \cap \bar{B}_e)$$

$$\chi_{A_e \cap B_e}(u,v) + \chi_{A_e \cap \bar{B}_e}(u,v) + \chi_{\bar{A}_e \cap B_e}(u,v) + \chi_{\bar{A}_e \cap \bar{B}_e}(u,v) = 1, \quad \forall (u,v) \in G_A \times G_B$$

$$P(A \cap B \mid x) + P(A \cap \bar{B} \mid x) + P(\bar{A} \cap B \mid x) + P(\bar{A} \cap \bar{B} \mid x) = 1, \quad \forall x \in X \qquad (7)$$

次に条件付根拠、つまりある根拠要素$u \in G_A$が$x \in A$を支持するならば、別の根拠集合G_Bの要素vも$x \in B$を支持するという関係:

$$u \in A_e \Rightarrow v \in B_e \quad \text{あるいは} \quad \chi_{B_e \mid A_e}(v \mid u) = 1 \qquad (8)$$

が存在するときvはuにより条件付けられた根拠要素といえる。このとき$\chi_{A_e \cap B_e}(u,v) = \chi_{A_e}(u) \chi_{B_e \mid A_e}(v \mid u)$などと書けるとする。これらを利用すると

$$m(A_e \cap B_e) + m(A_e \cap \bar{B}_e) = \sum_{u \in G_A} \sum_{v \in G_B} m(u,v) (\chi_{A_e \cap B_e}(u,v) + \chi_{A_e \cap \bar{B}_e}(u,v))$$

$$= \sum_{u \in G_A} \sum_{v \in G_B} m(u,v) \chi_{A_e}(u) [\chi_{B_e \mid A_e}(v \mid u) + \chi_{\bar{B}_e \mid A_e}(v \mid u)]$$

$$= \sum_{u \in G_A} \chi_{A_e}(u) \sum_{v \in G_B} m(u,v) = \sum_{u \in G_A} m(u) \chi_{A_e}(u) = m(A_e)$$

$$P(A \cap B) + P(A \cap \bar{B}) = P(A)\ [P(B \mid A) + P(\bar{B} \mid A)] = P(A)$$

などと書ける。

3．集合演算則

ここではファジィ集合演算は次の確率演算式に従うものとする:

$$\mu_{A\cap B}(x)\equiv P(A\cap B|x)=\gamma_{AB}(x)P(A|x)\,P(B|x) \qquad (9a)$$

$$\mu_{A\cup B}(x)\equiv P(A\cup B|x)=P(A|x)+P(B|x)-\gamma_{AB}(x)P(A|x)\,P(B|x) \qquad (9b)$$

$$\mu_{\bar{A}}(x)\equiv P(\bar{A}|x)=1-P(A|x) \qquad (9c)$$

$$for \quad \forall\, x\in X.$$

ここで$\gamma_{AB}(x)$は次式で与えられ、従属度変数と名付けることとする。

$$\gamma_{AB}(x)=P((A|B)|x)/P(A|x)=P((B|A)|x)/P(B|x) \qquad (10)$$

演算則（９）はパラメタγ_{AB}をもつパラメタ付集合演算則で、２．の議論から導ける。

さらに２．の議論から明かなようにファジィ部分集合Ａ，Ｂの意味内容は対応する根拠集合G_A、G_Bの中にとりいれられた形になっていて、特に両者の間の関係は根拠要素$u\in A_e$、$v\in B_e$の従属関係の形で適用対象の文脈を表わしているといえる。そして両者の間の相互関係は全体としてパラメタγ_{AB}値を介して演算則にくみこまれている。なお以下ではγ_{AB}やＰの引数ｘは特に指定の必要ない限り省略する。

［定義］　$\gamma_{AB}>1$（$0\leqq\gamma_{AB}<1$）のとき集合ＡとＢは正（負）従属関係にあるといい、

$\gamma_{AB}=1$のとき集合ＡとＢは独立であるという。

正従属のとき（１０）からＰ（Ａ|Ｂ）＞Ｐ（Ａ）（Ｐ（Ｂ|Ａ）＞Ｐ（Ｂ））で、これは ｘ∈Ｂ（ｘ∈Ａ）を支持する根拠があるときの方が、そうでないときよりｘ∈Ａ（ｘ∈Ｂ）であることがより明白になることを意味する。

負従属のときはＰ（$\bar{A}$|Ｂ）＞Ｐ（$\bar{A}$）（Ｐ（$\bar{B}$|Ａ）＞Ｐ（$\bar{B}$））で、このときは ｘ∈Ｂ（ｘ∈Ａ）によって逆にｘ∉Ａ（ｘ∉Ｂ）が強化されることになる。

他の従属度指数とγ_{AB}との関係として以下の式が導かれる。

$$\left.\begin{aligned}&\gamma_{A\bar{B}}=1+(1-\gamma_{AB})P(B)/P(\bar{B}),\quad \gamma_{\bar{A}B}=1+(1-\gamma_{AB})P(A)/P(\bar{A})\\&\gamma_{\bar{A}\bar{B}}=1+(\gamma_{AB}-1)P(A)P(B)/P(\bar{A})P(\bar{B})\end{aligned}\right\}\ (11)$$

４．演算則（９）の諸性質

（９）で定義したファジィ集合演算則は以下に示すような諸性質を持つ。

次のⅠ）、Ⅱ）は境界条件と呼ばれるものである。

Ⅰ）$\chi_{A_e}(u)=1$　for　$\forall\, u\in G_A$．このときＰ（Ａ）＝１で

Ｐ（Ａ∩Ｂ）＝Ｐ（Ｂ）、Ｐ（Ａ∪Ｂ）＝Ｐ（Ａ）＝１、$\gamma_{AB}=1$

Ⅱ）$\chi_{A_e}(u)=0$　for　$\forall\, u\in G_A$．このときＰ（Ａ）＝０で

Ｐ（Ａ∩Ｂ）＝Ｐ（Ａ）＝０、Ｐ（Ａ∪Ｂ）＝Ｐ（Ｂ）、$\gamma_{AB}=1$

ここで次の用語を定義しておく

［定義］ある$(u,v)\in G_A\times G_B$において

$$v\in G_B \ spt\ x\in B \Rightarrow u\in G_A \ spt\ \ x\in A,\ i.e.,\ \chi_{A_e|B_e}(u|v)=1 \qquad (12)$$

のときＡはＢに少なくとも部分従属であるといい、任意の$(u,v)\in G_A\times G_B$において（１２）が成り立つときＡはＢに全従属であるという。

Ⅲ）全従属の場合次が成り立つ。

（ａ）正従属⇔論理積、和（max-min演算則）が成立;

たとえば　Ｐ（Ａ|Ｂ）＝１が成立し、このとき

Ｐ（Ａ∩Ｂ）＝Ｐ（Ｂ）、Ｐ（$\bar{A}$∩Ｂ）＝０、$\gamma_{AB}=1/P(A)$.

同時に　Ｐ（$\bar{B}$|$\bar{A}$）＝１、Ｐ（$\bar{A}$∩$\bar{B}$）＝Ｐ（$\bar{A}$）.

Ｐ（Ｂ|Ａ）＝１が成立する場合も同様（上でＡとＢを交換すればよい）。

（ｂ）負従属⇔限界積、和が成立;

Ｐ（Ａ|$\bar{B}$）＝１が成立し、このとき

Ｐ（Ａ∩$\bar{B}$）＝Ｐ（$\bar{B}$）、Ｐ（$\bar{A}$∩$\bar{B}$）＝０、$\gamma_{AB}=[P(A)+P(B)-1]/P(A)P(B)$.

またはＰ（$\bar{B}$|Ａ）＝１が成立しこのとき

Ｐ（Ａ∩$\bar{B}$）＝Ｐ（Ａ）、Ｐ（Ａ∩Ｂ）＝０、$\gamma_{AB}=0$

（ｃ）独立⇔代数演算則が成立.

注６）根拠要素毎の依存関係については正従属と独立とが区別できない。

正、負いずれの全従属でも、独立でもない中間的な場合も含め、集合演算則がこれら集合間の従属の程度に応じて自動的に変わる。したがって理論の応用対象の状況あるいは性質がこの従属関係にうまく写されていれば、場当り的でなく対象の状況に応じてきまる演算則が得られることになる。

Ⅳ）交換律、結合律、分配律、べき等律、定数法則、吸収律、排中律、無矛盾律、二重否定の法則、ドモルガンの法則などが成立する。

このうち一部についてそれらが成立することを示す。

べき等律　　Ａ∪Ａ＝Ａ、　Ａ∩Ａ＝Ａ

Ｐ（Ａ|Ａ）＝１は明かであるので（９）、（１０）により

Ｐ（Ａ∩Ａ）＝Ｐ（Ａ）Ｐ（Ａ|Ａ）＝Ｐ（Ａ）、Ｐ（Ａ∪Ａ）＝Ｐ（Ａ）＋Ｐ（Ａ）－Ｐ（Ａ∩Ａ）＝Ｐ（Ａ）

無矛盾律　$A \cap \bar{A} = \phi$

$P(A \cap \bar{A}) = P(A)\,P(\bar{A}|A) = P(A)\,[1 - P(A|A)] = P(A)\,(1-1) = 0$

$\Leftrightarrow\ A \cap \bar{A} = \phi.$

5．ファジィ制御における推論法に関する考察

本稿で提出したＭＦの構成法と集合演算則の考えを、その一つの応用例としてファジィ制御におけるファジィ推論法に適用してみる。

制御規則が計測値ｙ、ｚ、操作量ｗに対して

$$y = A_i \text{ 且つ } z = B_i \Rightarrow w = C_i, \quad i = 1, \cdots, n \qquad (13)$$

であたえられているとする。ここでA_i、B_i、C_iはファジィ集合とする。

多くの場合各制御規則からの推論結果$w = C'_i$は

$$\mu_{C'_i}(w) = \mu_{A_i}(w) \wedge \mu_{B_i}(w) \wedge \mu_{C_i}(w), \qquad \wedge \text{ はｍｉｎ} \qquad (14)$$

により定め、これらを統合した結論は次式から得ている。

$$C = C'_1 \cup \cdots \cup C'_n \qquad (15)$$

計測値、操作量の上におけるファジィ集合のＭＦの構成の仕方は（４）で表わされる考え方からすると、ｙなどの任意の値において、その値に対するすべてのファジィ集合のＭＦ値の合計が１になるよう定めるべきである。これからすると図１の（ａ）のようになり、その（ｂ）、（ｃ）は好ましくないということになる。

次に（１４）は$(A_i \cap B_i) \cap C_i$なる集合演算に対応すると考えられるが、通常A_iとB_i、さらにこれらとC_iは独立とみなされることが多く、その場合代数積にすべきであるということになる。そうでないとき、これら集合間の従属度合が導き出されるならば（９ａ）に従う演算が妥当といえる。

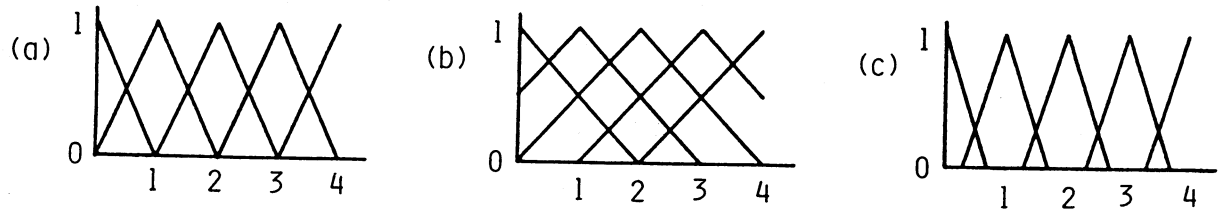


図１　ＭＦの構成例．（ａ）のようにすべきで（ｂ）、（ｃ）は好ましくない例と考える

（１５）に関してはｍａｘ演算が多く使われているが、各C_iの持つ意味内容は本来的には全従属で負従属になっている、あるいはそうなっているべきである。このことからすると限界和なる演算によるべきとなる。全従属でない場合で従属度指数が推定できれば（９ｂ）による演算が適切といえる。

これらの結論はすべて水本が実験的な検討から得た結論［７］と極めてよく符合しているのは興味深い。

6．むすび

ファジィ理論によるモデルを作成する場合、適用対象の状況に応じて定まるパラメタ付のファジィ集合演数則と、その演算則への適合を念頭において考えたメンバシップ関数の概念的構成法の提案を行った。又この演算則の性質を調べ、クリスプ集合演算のみたす基本的諸性質が、この演算則においても成立つことをみた。すなわちこの演算則は、たとえば分配律や排中律もみたすが、これは状況に応じて自動的にパラメタが変わることによるもので、これら諸性質を満足するように場当り的にパラメタ値を変えるというやり方の結果ではない。

一例としてファジィ制御におけるファジィ推論への適用をとりあげ、本提案の考え方からして適切とされるメンバーシップ関数の構成と推論方式を示した。

しかし本提案によるメンバーシップ関数の作り方では、タイプ１形のファジィ集合とするには、実際上も本質的にもかなりあらっぽい割り切りをせざるをえない。したがって少なくとも区間値形のメンバーシップ関数として議論を発展させる必要がある。

文献

［１］R.Bellman and M.Giertz, On the analytic formalism of the theory of fuzzy sets, Information Sciences, 5 (1973) 149-156

［２］Y.Leung, Spatial analysis and planning under imprecision, Elsevier (1988) 8.2.2.

［３］A.M.Norwich and I.B.Turksen, A model for the measurement of membership and the cosequences of its empirical implementation, Fuzzy Sets and Systems 18 (1984) 1-25

［４］M.R.Civanlar and H.J.Trussell, Constructing membership functions using statistical data, Fuzzy Sets and Systems 18 (1986) 1-13

［５］［２］と同じ、8.2.1

［６］E.Hisdal, Are grades of membership probabilities?, Fuzzy Sets and Systems 25 (1988) 325-348

［７］水本，ファジィ制御向きのファジィ推論法，計測と制御，28 No.11 (1989) 959-963

TC1-2

順序制約に基づいたファジィ集合概念の表現とその学習同定
Representaions of Fuzzy Concepts by Order Constraints and Their Identification by Instance Generalization

片井 修, 井田 正明, 椹木 哲夫, 岩井 壮介
Osamu KATAI, Masaaki IDA, Tetsuo SAWARAGI, Sosuke IWAI
京都大学 工学部
Faculty of Engineering, KYOTO University

Abstract:

A way to acquire fuzzy concepts from instance information is introduced based on the idea that instance information can be generalized to form a region constraint in which the true fuzzy concept is located when we are informed of a certain regularity on the fuzzy concept in question.

The resultant region constraints are closely related to type 2 fuzzy sets and are called 2nd order constraint-interval fuzzy sets which are shown to be more general notion than type 2 fuzzy set.

Also, the set operations and the defuzzification methods on the 2nd order constraint-interval fuzzy set are introduced.

Key words: instance generalization, interval, 2nd order constraint, deffuzification, set operation

1. はじめに

従来より、ファジィ集合によるあいまいさの表現においては、メンバーシップ関数の同定が、本質的な問題として残っている。例えば「中背」という表現に関していえば、典型的な中背が170cmであるとした場合に、なぜ160cmのグレード値が0.5であって、0.6ではないのか、という問題が生じる。このように人間の持つあいまいさをグレード値でもって表現することは、我々の直感を必ずしも反映するものではない。

われわれは、この種のあいまいさを表現する際に本質的な情報はグレード値ではなく、全体集合上に存在する制約関係であると考え、とくに全体集合が全順序構造を持つ場合に、あいまいさを「区間の集まり」として表現する「区間制約ファジィ集合」の概念を提案した[1]。このようにあいまいさをクリスプな集合の集まり（集合族）として表現する方法は、従来より、フロー集合概念[2]あるいはα-カット[3]として研究されている。しかしながら、これらには「制約指向」の考え方が必ずしも明確に意識されているわけではなく、また我々が採用している立場では、フロー集合あるいはα-カットの場合に前提とされる、族を構成する集合間の包含関係を必ずしも前提としない、制約構造としての一般性を有している。すなわち、全体集合X上の区間制約ファジィ集合Cは、以下のような形で与えられる。

$$C=\{C\lambda\}_{\lambda\in\Lambda},$$

$$C\lambda=[\underline{x}\lambda, \overline{x}\lambda] \quad \text{for} \quad {}^{\forall}\lambda\in\Lambda \qquad (1)$$

ここにΛは一つの全順序集合である。すなわち、集合（全体集合上の制約区間）族の間に包含関係 $C\lambda'\supseteq C\lambda$ for $\lambda\geq\lambda'$ は前提とせず、単にこれらの間に順序構造が設定されていると考える。このような制約構造は、図1に示すMinMax図を用いて表現することができる。図上の曲線を「区間制約メンバーシップ関数」と呼ぶ。それ

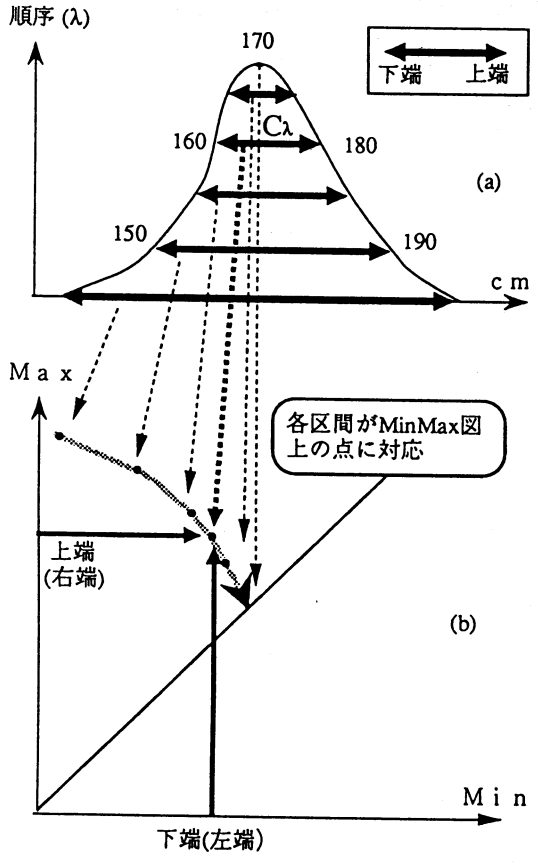


図１　区間制約ファジィ集合と
MinMax図上の
区間制約メンバーシップ関数

ぞれの区間 Cλ は、ある視点 λ から見て妥当と思われる制約区間を表している。

通常の単峰性のメンバーシップ関数で表示されるファジィ集合に関する区間制約メンバーシップ関数は”右下がり”の曲線として表示される。

全体集合が半順序集合である場合には、Cλ はそれぞれ一つの領域として捉えられ、このとき C を「領域制約ファジィ集合」と呼ぶ[4]。

2．サンプルデータからの区間制約ファジィ集合の構成

ここでは、データ取得から区間制約メンバーシップ関数の同定に至るプロセスを提案する。これによって、これまでのファジィ集合論よりもより本質的にあいまいさを取り扱うことができると考えられる。

ここでは、あいまいな表現の例として「中背」という概念を取り上げる。まず、十分に沢山の人を集め、これらの人を（別の）ある個人の主観的な判断によって、中背の程度による順番に整列させる。つまり、「中背」の順序によって全順序付ける。ここでは、全順序付けられるという仮定を置く。例えば、図２に示すように順序付けが行われたとする。これをMinMax図の上で表現すると、図１に示したような単なる曲線ではなく、図２に示すように順序づけられた矩形領域 $A_{\gamma i}$ (i = 1,2, ... ,7) の集まりとなる。これらは、未知である真の区間制約メンバーシップ関数がこれら矩形領域を順次通過している意味において、区間制約ファジィ集合の存在範囲に関する制約、いわば”制約の制約”と理解さ

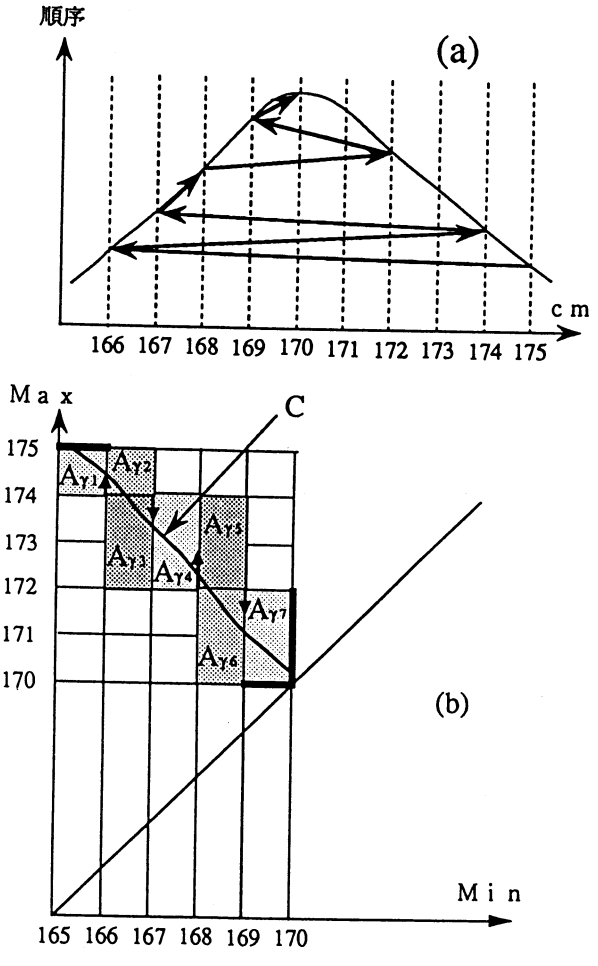


図２　１対比較による2階区間制約
ファジィ集合の構成

れ、以後このような形で与えられる集合を「2階区間制約ファジィ集合」と呼ぶ。これら矩形領域は以下のようにして求められる。すなわち、図2(a)で示される順序関係をＭｉｎＭａｘ図上での真の区間制約メンバーシップ関数Ｃの存在領域に置き直すと、同図(b)中の矢印で示される範囲が求まる。これに、先にも述べたように、Ｃが（単峰性に対応する）右下がりの曲線であると仮定すると、これら（順序関係を与える）事例群は一般化されて図中の矩形領域群を生成することになる[5]。容易に分かるように、Ｃはこの領域をはみ出すことはない。厳密に定義すると、2階区間制約ファジィ集合は、MinMax図上の上半面領域

$$X=\{(\underline{x},\overline{x}):\ \underline{x},\overline{x}\in X,\ \underline{x}<\overline{x}\} \qquad (2)$$

上の（これを全体集合とする）（2次元の）領域制約ファジィ集合として与えられる。すなわち、$A=\{A_\gamma\}_{\gamma\in\Gamma}$ が区間制約ファジィ集合$C=\{C_\lambda\}_{\lambda\in\Lambda}$に関する2階区間制約ファジィ集合であるとは、それが以下のような条件を満足する集合族であることをさす。

Γ：全順序集合

$$\text{s.t.}\quad X\supseteq A_\gamma \quad \text{for}\ {}^{\forall}\gamma\in\Gamma \qquad (3)$$

ある写像ｐが存在し

$p:\Lambda\to\Gamma$　onto（全射）

s.t.　p: 単調非減少(monotonically nondecreasing)

(4)

$$C_\lambda\in Ap(\lambda)\ \text{ for }\ {}^{\forall}\lambda\in\Lambda \qquad (5)$$

上式中最後の包含関係は、真の制約区間C_λが、λ の増大に呼応して順次必ず対応する制約領域$Ap(\lambda)$に含まれている必要があることを意味している（図3参照）。

このＡに対して、MinMax図上のつぎのような領域を導入する。すなわち、

$$[A]=\bigcup_{\gamma\in\Gamma}A_\lambda \qquad (6)$$

これはＡに含まれる種々の制約領域をおしなべて全体としてどのような制約となっているかを示すものであり、これをＡの「包絡制約集合」と呼ぶことにする。これから新たに（Ｃに関する）別の2階区間制約ファジィ集合を導くこともできる。もちろんこのためには、Ｃに関する適切な仮定を必要とする。例えば、Ｃが先にも述べたように右下がりの曲線であると仮定するとき、図4に示すように、元のＡから種々の読み替えが可能となる。このような意味で、2階区間制約ファジィ集合は、いわゆるタイプ2ファジィ集合[6]よりも広い概念であることが分かる。

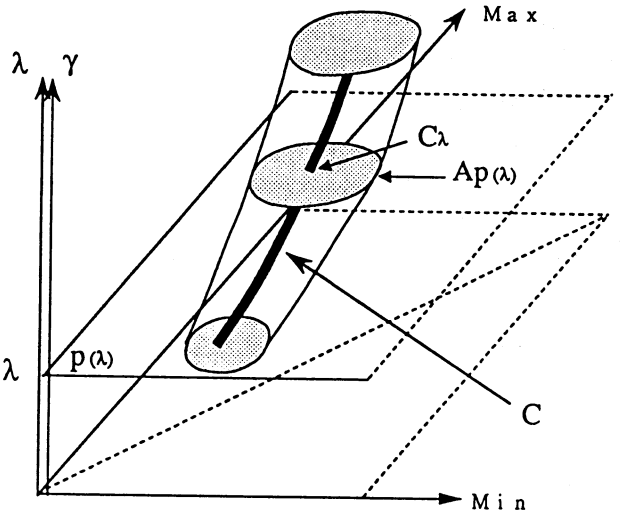


図3　レベルとMinMax図の関係

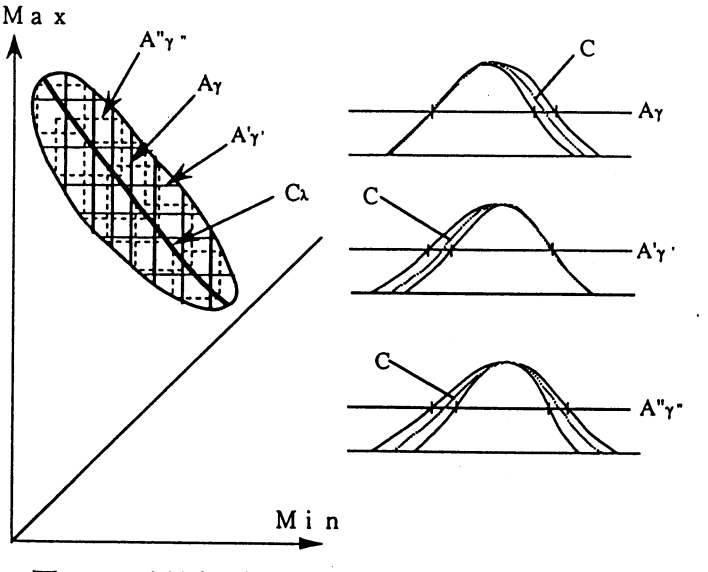


図4　2階区間制約ファジィ集合の読み替え

3．2階区間制約ファジィ集合間の関係

2つの（あるいは2つ以上の）2階区間制約ファジィ集合を扱う場合には、これらの間の相互関係を設定しておく必要がある。すなわち、通常のファジィ集合論においては、共通の値域[0, 1]をもつメンバーシップグレードが（両者に）存在することから、これを通して両者の関係が自動的に付けられ集合演算が可能となる。しかし、ここでのアプローチにおいては、それぞれの集合は別々の全順序集合によって順序づけられており、これらの間に何らかの関係を新たに導入しなければ両者の間の集合演算を行なうことができない。

区間制約ファジィ集合においては、二つの区間制約ファジィ集合 $C=\{C\lambda\}_{\lambda\in\Lambda}$ と $D=\{D\lambda'\}_{\lambda'\in\Lambda'}$ それぞれに対する全順序集合 Λ と Λ' の間の（同一レベルを表す）同値関係 Σ ($\Lambda\times\Lambda'\supseteq\Sigma$) を導入し、同一レベル毎の区間演算によって集合演算を行っている。すなわち、

$$(C\wedge D)\lambda=(C\wedge D)\lambda'=C\lambda\wedge D\lambda'$$
$$\text{for } {}^{\forall}\lambda\in\Lambda,\ {}^{\forall}\lambda'\in\Lambda,\ \text{s.t.}\ (\lambda,\lambda')\in\Sigma \quad (7)$$

$$(C\vee D)\lambda=(C\vee D)\lambda'=C\lambda\vee D\lambda'$$
$$\text{for } {}^{\forall}\lambda\in\Lambda,\ {}^{\forall}\lambda'\in\Lambda,\ \text{s.t.}\ (\lambda,\lambda')\in\Sigma \quad (8)$$

ここに Σ は、λ と λ' の間の1対1の対応関係を表す、すなわち、

$$(\lambda,\lambda'_1),(\lambda,\lambda'_2)\in\Sigma \text{ ならば } \lambda'_1=\lambda'_2 \quad (9)$$
$$(\lambda_1,\lambda'),(\lambda_2,\lambda')\in\Sigma \text{ ならば } \lambda_1=\lambda_2 \quad (10)$$

一方、2階区間制約ファジィ集合においては、このような全順序集合間の1対1の対応関係が既知という設定よりも、同一レベルのものが存在する範囲が与えられていると考える方が自然である。もちろんこの範囲は、妥当性のある範囲、すなわち対応する（同一レベルの）真の制約区間を含む領域を指定している必要がある。すなわち、上述の区間制約ファジィ集合CおよびDそれぞれに対する2階区間制約ファジィ集合をAおよびB ($A=\{A\gamma\}_{\gamma\in\Gamma}$, $B=\{B\gamma'\}_{\gamma'\in\Gamma'}$) とするとき、これらを規定する順序$\Gamma$と$\Gamma'$の間にはつぎの条件を満たす関係 Δ が与えられているものとする。

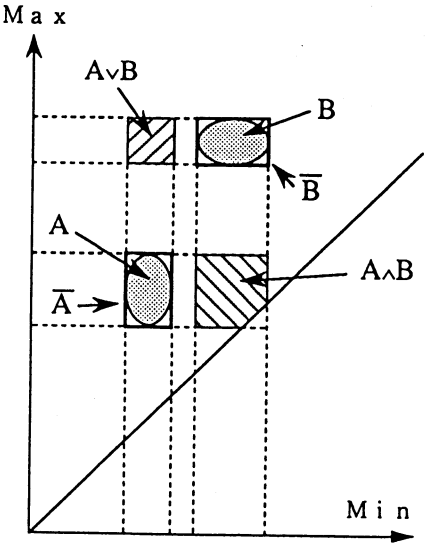


図5　2階制約集合の集合演算

$$\Gamma\times\Gamma'\supseteq\Delta \quad (11)$$
$$(\lambda,\lambda')\in\Sigma \text{ ならば } (p(\lambda),p'(\lambda'))\in\Delta \quad (12)$$

4．2階区間制約ファジィ集合の間の集合演算

上のように関係づけられた2つの集合の間のAND演算、OR演算について考える。その前に、MinMax図上での2つの領域A，BのAND、OR演算を考える。図5に示すように、それぞれの領域が矩形でなくとも、演算結果は基本的には矩形になる。換言すれば、図示のように、AとBをそれぞれをその閉包$\overline{A}$と$\overline{B}$に置き換えて演算をしても結果は同一のものとなる。このように、他の2階区間制約ファジィ集合との演算を考えるときには、個々の制約領域は矩形であるとして扱ってもよいことがわかる。

さて、2つの2階区間制約ファジィ集合 $A=\{A\gamma\}_{\gamma\in\Gamma}$ と $B=\{B\gamma'\}_{\gamma'\in\Gamma'}$ がΓとΓ'の間の関係 Δ によって互いに関連付けられている場合について、これらのAND演算を以下のように与える。

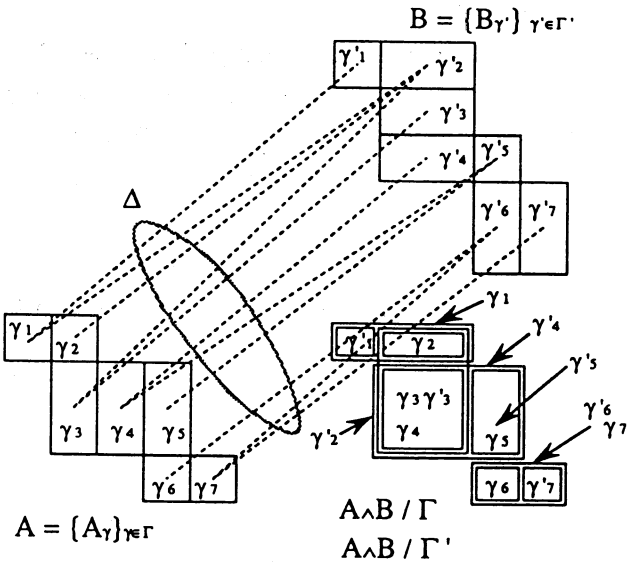


図6　2階区間制約ファジィ集合の
AND演算結果

$$A \wedge B/\Gamma = \{E\gamma\}_{\gamma\in\Gamma},$$
$$E\gamma = A\gamma \wedge \bigcup_{(\gamma,\gamma')\in\Delta} B\gamma' \qquad (13)$$
$$A \wedge B/\Gamma' = \{F\gamma'\}_{\gamma'\in\Gamma'},$$
$$F\gamma' = \bigcup_{(\gamma,\gamma')\in\Delta} A\gamma \wedge B\gamma' \qquad (14)$$

演算の結果はやはり2階区間制約ファジィ集合として与えられる。ただし、A，B何れの順序構造Γあるいは Γ' を、演算結果を捉える視点としての順序として採用するかによって、結果の集合が変わることになる（図6参照）。上の定義がＡＮＤ演算として妥当であることは、式 (7), (8), (11), (13), (14) を用いることによって容易に示すことができる。また、つぎの関係を示すことができる。

$$[A \wedge B/\Gamma] = [A \wedge B/\Gamma']$$

すなわち、これら演算結果の2階区間制約ファジィ集合は、包絡制約集合としては同一のものを与えることになる。

先にも述べたように、これら演算結果を構成する制約領域 Eγ および Fγ' は全て矩形になっていることにも注目する必要がある。

ＯＲ演算についても、上と同様に、

$$A \vee B/\Gamma = \{E\gamma\}_{\gamma\in\Gamma},$$
$$E\gamma = A\gamma \vee \bigcup_{(\gamma,\gamma')\in\Delta} B\gamma' \qquad (15)$$
$$A \vee B/\Gamma' = \{F\gamma'\}_{\gamma'\in\Gamma'},$$
$$F\gamma' = \bigcup_{(\gamma,\gamma')\in\Delta} A\gamma \vee B\gamma' \qquad (16)$$

と定義する。これがＯＲ演算として妥当であることを示すことができる。上と同様に、

$$[A \vee B/\Gamma] = [A \vee B/\Gamma']$$

が示され、両者の包絡情報の一致することがわかる。

5．非ファジィ化の方法

2階区間制約ファジィ集合の非ファジィ化法を考える。区間制約ファジィ集合の場合と同様に、重心法と制約法の2つを導入する[1]。図7に示すように、重心法として、真の区間制約ファジィ集合（曲線Ｃ）の存在する範囲である包絡制約集合の面積重心（からの射影）を採用する。

このような、可能性のある制約区間群全体の平均的な捉えかたによる非ファジィ化法ではなく、個々の制約をより重視した非ファジィ化法である制約法を図8に示すように与える。これは、$A=\{A\gamma\}_{\gamma\in\Gamma}$ の全ての制約領域に共通に満たされることが保証される最大の区間の中央値として与えられる。

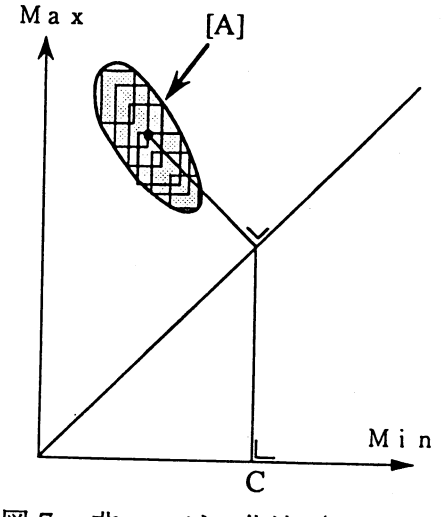


図7　非ファジィ化法（重心法）

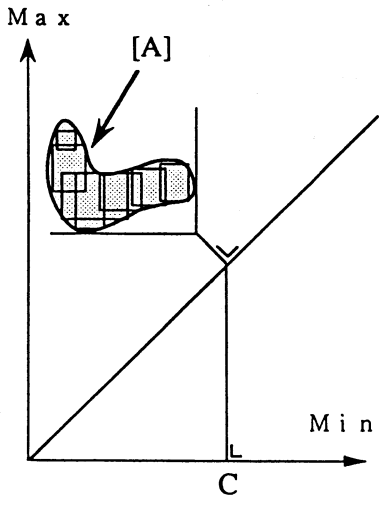


図８　非ファジィ化法（制約法）

ここで注意すべきことは、これら非ファジィ化が、包絡制約集合のみに依存して決まっており、したがって、集合演算結果そのものは採用される順序構造に依存したものとなるが、その非ファジィ化の結果は、何れの方法についても、これら順序構造には依存せずに、元の２つの２階区間制約ファジィ集合から一意的に決まったものとなることである。

６．おわりに

本論文においては、ファジィ集合を制約指向の観点から捉え、ファジィ集合が存在する領域に関する制約としての２階区間制約ファジィ集合の概念を導入するとともに、これを対象間の順序関係として与えれる事例情報から学習獲得する方法について検討した。

ここで示した立場を採用することによって、ファジィ集合同定の際にネックとなるメンバーシップグレード値の特定という問題を扱う必要がなくなり、より直観に合致した形でファジィ集合概念を同定することが可能となる。

さらに、この２階区間制約ファジィ集合合概念の下でのファジィ情報処理を行なうために、このような集合間の集合演算ならびに非ファジィ化の方法を導入した

（参考文献）

(1) Katai, O., Ida, M., Sawaragi, T. and Iwai S.: Treatment of Fuzzy Concepts by Order Relations and Constraint-Oriented Fuzzy Inference, Proc. of NAFIPS '90, A Quarter Century of Fuzziness, (1990)

(2) Negoita.C.V, Ralescu,D.A.: Applications of Fuzzy Sets to Systems Analysis, Birkhauser Verlag (1975)

(3) 寺野、浅居、菅野（編）：ファジィシステム入門、オーム社、(1987)

(4) Katai, O., Ida, M., Sawaragi, T. and Iwai S.: Fuzzy Inference Rules and Their Acquisition from Constraint-Oriented Perspectives, Proc. of International Conference on Fuzzy Logic and Neural Networks, IIZUKA '90 (1990)

(5) Katai, O., Sawaragi, T. and Iwai, S.: A Framework for Learning and Reasoning via Order Relations, in Z. W. Ras (ed.), Methodologies for Intelligent Systems, 4, North-Holland (1989)

(6) 水本：ファジィ理論とその応用、サイエンス社 (1988)

問い合わせ先：
〒606 京都市左京区吉田本町
京都大学工学部精密工学科
片井 修
Tel 075-753-5201　Fax 075-771-7286

TC1-3

エントロピーバランスを考えたファジィ数の演算

Operations of Fuzzy Numbers with Entropy Balance

塚本　弥八郎
Yahachiro TSUKAMOTO
名城大学短大部商経科
Dept. of Commerce & Economics, Meijo Univ.

Abstract : The usual method of operations of fuzzy numbers is based on the extension principle, which leads to sup-min composition. When we take into account a natural propagation of the uncertainty from the antecedents to the consequent, it might result on some of over or under fuzzification.

In this paper sup-* composition is considered, where * stands for t-norm including sup-min composition. We will try to find an appropriate class of t-norm from the view point of entropy balance in the sense of nonspecificity.

1．はじめに

ファジィ数の演算方式は拡張原理により定式化されている。しかし、あいまいさが伝播してゆく様子については十分深い注意がなされていない。

本研究では、入力側の二つのファジィ数のもつあいまいさ（エントロピー）と、一般にエトロピー吸収過程である演算構造とを考慮に入れて、出力側とのエントロピーがバランスするような方式を考える。

ファジィ推論が持つべき規範の一つに、前提のあいまいさを結論に自然に移行させる、ということがある。しかし、何が自然な移行なのかということは、それほど簡単なことではない。不確実性の度合いを示す指標として、エントロピー概念がある。これを直接用いて議論できれば都合が良いのだが、最近では、種々のエントロピーが提案されており[1]、それぞれの意味と違いについて、留意が必要である。

他方、ファジィ数の演算は、広い意味でファジィ推論の一つと考えられる。つまり、写像としての演算の定義域を全体集合とするファジィ数と演算それ自体が、諸前提であり、演算結果のファジィ数は、結論と見なすことができよう。

エントロピーの種類については、まず大きく二つに分類される、すなわち、ファジィネスの度合い（あるファジィ集合とそれに最も近いクリスプ集合との距離を表す）と特定のしにくさ（ある変数が、どれか一つの値をとることは分かっているが、定かでない程度を表す）があり、前者はFuzzinestic Entropy また後者は Nonspecificity と呼ばれている。

この二つは全く異なる指標であり、とくに後者はさらに、二つに分けられる。Possibilistic Entropy と Probabilitistic Entropy である。

Klir & Higashi [2] は、可能性分布が持つ特定のしにくさを定式化しており、他方確率的エントロピーについては、十分すぎる程の研究がある。

ファジィ数の演算方法については、Zadeh の拡張原理に基づく Max-min合成が一般に使われているが、最近ではたとえば、Fuller [3] は、Sup-T 合成について研究している。ただし、T は t-norm を意味する。

本研究は、Sup-T 合成から出発して、前述したようなエントロピーバランスの立場から見て適当な t-norm のクラスを求めようとするものである。 ただし、今回は Nonspecificity の意味でのエントロピーを考える。とくに、足し算、掛け算あるいはミニマムなどの演算は、一般に、エントロピーを吸収する処理過程であることに注意しつつ、そのバランスを考える。

2．エントロピーのいくつかの定義

はじめに、よく用いる記号を定める。

A ：X（R）のファジィ集合（ファジィ数のとき）
μ：メンバーシップ関数
A_α：Aのαレベル集合，　|B|：Bの基数
L（B）：Bのルベーグ測度
p：密度関数，　e ：2.7182818
H：エントロピー，　l^n： l^n -distance

Kosko によるファジィエントロピーの定義:

$$H_n(A) = l^n(A,\overline{A}) / l^n(A,\underline{A}) \quad \text{for } n \geq 1 \tag{1}$$

ただし、$\overline{A}$($\underline{A}$)はA に最も近い(遠い) クリスプ集合。

Klir によるファジィエントロピー

$$H(A) = \int_0^1 \mathrm{Log}_2 |A_\alpha| \, d\alpha \qquad (2)$$

確率的エントロピー

$$H(p) = -\int_{-\infty}^{\infty} p(x) \, \mathrm{Log}_2 p(x) dx \quad (-\lim_{\Delta \to 0} \log_2 \Delta) \qquad (3)$$

（１）は、クリスプに対してのファジィネスの程度、（２）は、ファジィ集合での特定しにくさの程度、（３）は、密度関数での Nonspecificity を表す。他にも、（２）に対して、Ａがファジィ数のとき、

$$H(A) = \int_0^1 \log_2 (2^{|A_\alpha|} - 1) \, d\alpha \qquad (4)$$

また、（３）で、一様分布のとき、つまり特定性について区間〔a, b〕情報が与えられると、計算して

$$H(〔a, b〕) = \mathrm{Log}_2 (b - a) \qquad (5)$$

（５）で、a = b 、すなわち、点情報を得たときは相対エントロピーは無限大となることに注意する。

３．演算構造が吸収するエントロピー

このことについて 2･3 の例で考えてみよう。

例１）X＝｛1, 2｝ Y＝｛2,3,4 ｝とし、足し算を

$$+ \ : \ X \times X \to Y \qquad (6)$$

のような写像として考える。本稿では、Ｘ×Ｘ上の変数を入力変数またＹ上の変数を出力変数と呼ぶことにする。

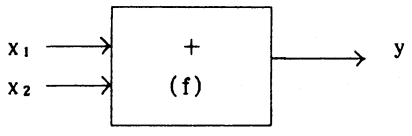


Fig.1　足し算の関数表現

入力変数について一様分布を仮定すると、そのエントロピーは

$$H_i = \mathrm{Log}_2 4 \ (= 2 \text{ bit})$$

また，出力側のエントロピーは、

$$H_o = H_o(\ \{1/4,1/2,1/4\} \ ) \quad (= 1.5 \text{ bit})$$

その差（0.5 bit)は、H_* として、足算が吸収した分である。実は、これは、出力値を知ってなおかつ残る入力側のエントロピーの期待値でもある。すなわち、一般に次式が成立する。

$$H_i = H_f + H_o \qquad (7)$$

（見方を変えれば伝達エントロピーの定義式でもある。）

例２）$X = \{x_1, x_2, \text{-----}, x_n\} \subset [0, 1]$ として、つぎのようなミニ演算について考える。

$$\wedge \ : \ X \times X \to X \qquad (8)$$

入力変数について一様分布を仮定すると、つぎの結果を得る。

$$H_i = \mathrm{Log}_2 n^2$$

$$H_o = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \, \mathrm{Log}_2 (2i - 1)$$

ただし、

$$\omega_i = (2i - 1)/n^2, \quad \sum \omega_i = 1, \quad \omega_i > 0 \quad (i = 1,2, \text{---}, n).$$

ここで、$r_n = H_o / H_i$ とおくと、

$$r_n \to 1/2 \ (n \to \infty)$$

すなわち、nが大きいと、このようなミニ演算は半分近くのエントロピーを食べる。

例３）　ＸとＹをそれぞれ実数区間〔a, b〕と〔c, d〕の一様分布に従う変数とし、Ｚ＝Ｘ＋Ｙ　について見る。以下の計算では、a = c = 0,　b ≦d とおいても、一般性を失わない。

$$p(z) = \begin{cases} z/(bd) & : \ 0 \leqq z \leqq b \\ 1/d & : \ b \leqq z \leqq d \\ (b+d-z)/(bd) & : \ d \leqq z \leqq b+d \end{cases}$$

$$H_i = \mathrm{Log}_2(bd), \quad H_o = (b/2d)\mathrm{Log}_2 e + \mathrm{Log}_2 d$$

$$\therefore \quad H_* = \mathrm{Log}_2 b - (b/2d)\mathrm{Log}_2 e \qquad (9)$$

このように、演算により吸収されるエントロピーの量が計算されるが、任意の入力分布については、解析的には計算は、非常に困難である。

４．ファジィ数の演算

x,y,z ∈R とし、Ａ，Ｂ，Ｃ　でファジィ数を表す。

２項演算を　z = f(x,y)　とする。Sup-T 合成では、ファジィ数の演算は次式で与えられる。各　z　R　について、

$$\mu_C(z) = \sup_{(x,y)\in f^{-1}(z)} (\mu_A(x) * \mu_B(y)) \quad (10)$$

ただし、* は t-norm である。
(10)で、* = min のときは、通常の拡張原理による max-min 合成となり、α－レベル集合を用いて、

$$C\alpha = A\alpha + B\alpha \quad (11)$$

なる区間演算になる。Sup-T 合成では、まず、つぎのように、T_α を定める。

$$T\alpha = \{(x,y) \mid \mu_A(x) * \mu_B(y) \geqq \alpha\} \quad (12)$$

これを用いて、Cαは、つぎのように表せる。

$$C\alpha = [\inf_{(x,y)\in T\alpha} f(x,y),\ \sup_{(x,y)\in T\alpha} f(x,y)] \quad (13)$$

実際、(13)式は、Sup-T 合成についての一般形で、＊を定めることにより、例えば、つぎのような計算ができる。
例４）A，Bが三角形のメンバーシップ関数で表されており、＊＝drastic product のとき、

$$C\alpha = \begin{cases} \mu_A^{-1}(1) + B\alpha & \text{if} \quad L(B\alpha) \geqq L(A\alpha) \\ A\alpha + \mu_B^{-1}(1) & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

このケースでは、二つのファジィ数の中心の値を足し、幅の広い方だけファジィ化してやればよい。
＊が、ミニのときに比べて、あいまいさは非常に小さくなる。Ｎ個のこのようなファジィ数を足しても、最も幅の広いもののみが残ることになる。

５．エントロピーバランスの考慮

ファジィ数を問題にする場では、変数がどれか一つの値をとっていることは分かっているが、一点として　specify できないし、またその必要性もないというケースが考えられる。このようなノーマルなファジィ集合に対してのエントロピーメジャーとしては、fuzzinesstic　なものより、nonspecificity を使うべきである。本稿ではつぎのように考える。
(13)式で与えられるαレベル集合を（1-α）の確実性で、変数がそこで一様分布しているような区間と見なす。それが、足し合う二つのファジィ数のαレベル集合のもつ nonspecificity とバランスをもつような、そういう t-norm を求められないかと考える。

まず、結果が(9)式で与えられる例３を用いて検討してみよう。　$A\alpha = [0, b]$，$B\alpha = [0, d]$として、H_0 に等しくなるような区間の大きさをwで表すと、

$$w = d\,e^{(2b/d)} \quad (15)$$

中心は、(b+d)/2 (= g)なので、結局Cαがつぎのようになればよい。

$$C\alpha = [g - w/2,\ g + w/2] \quad (16)$$

しかし、これと等価な(13)式における t-norm を見出すことは容易ではない。ただし、(16)の結果は*=min から得られる幅(b+d) よりも一般に小さく、最大で、b＝d のとき約83% まで縮小する。たとえば、パラメータ付の Frank の t-norm などを用いて解を求めることが考えられる。今回は、このような t-norm がmin と product の間に存在することを図解で示す。また、同じ図により bounded product 以下の t-norm に対しては、drastic product と同じ結果をもたらすことが分かる。下図で、$\mu_A(x)$ と $\mu_B(y)$ は u　と　v　で表している。

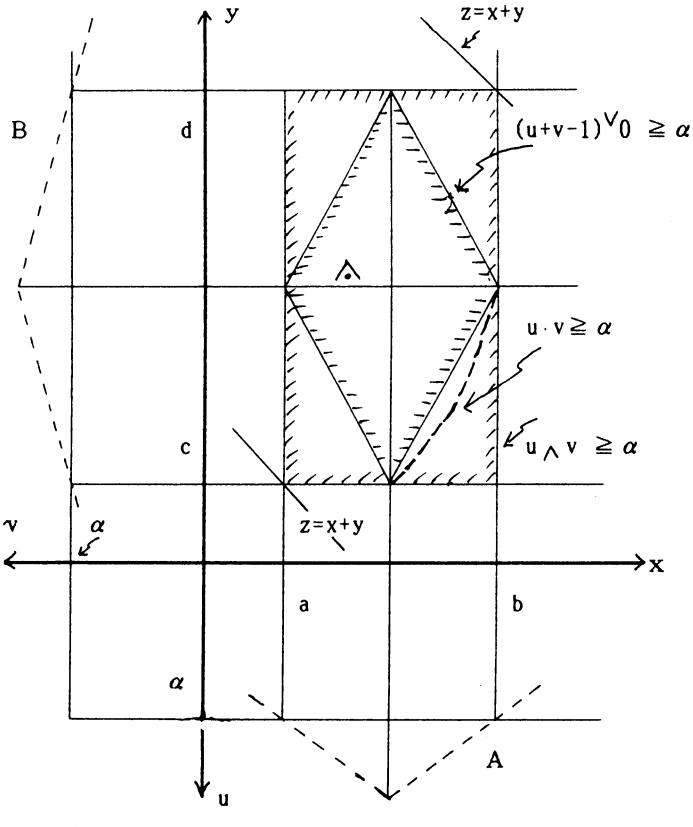


Fig. 2　Tαと Cαの求解

つぎに、Klir の Possibilistic Entropy Measure, (2) 式で考えて見よう。もし、Aα, Bα, Cαが与えられたとすると、演算 fにより吸収されるエントロピーは、次式で表される。

$$H_f = \int_0^1 \mathrm{Log}_2 (| A\alpha | \, | B\alpha |) / | C\alpha | \, d\alpha \qquad (17)$$

ディスクリートな表現では、

$$H_f = \sum_{i=1}^{n} \Delta\alpha_i \, \mathrm{Log}_2 (| A\alpha | \, | B\alpha |) / | C\alpha | \qquad (18)$$

この場合には、吸収されるエントロピーが一致するようなCαを求めることになる。

6．おわりに

通常のファジィエントロピーとここで扱った特定しにくさの度合いとは全く異なるものであり、本来あいまいさの伝播というときには、両者を考慮に入れる必要がある。しかし、今回は、Nonspecificityについてのみとりあげた。 このことと、具体的なt-norm のクラスの計算については今後の課題としたい。

参 考 文 献

(1) Kosko, B. : Fuzzy Entropy and Conditioning, Information Sciences, 40, 165-174, (1986)

(2) Higashi, M. and G. J. Klir : Measure of uncertainty and Information based on Possibility Distribution, Int. J. of General Systems, 9, 43-53, (1983)

(3) Fuller, B. : On T-Sum of Fuzzy Numbers, BUSEFA, 39, 24-29, (1989)

問い合わせ先: 〒468 名古屋市天白区塩釜口1-501
名城大学短期大学部
塚本 弥八郎
TEL 052-832-1151 EX.3647
FAX 052-833-4767

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

TC2-1

Ｇödel含意を用いた様相測度に基づくファジィ数の順序付け指標

Ranking Indices of Fuzzy Numbers Based on Modality Measures Using Gödel Implication

乾口雅弘，　久米靖文
Masahiro INUIGUCHI,　Yasufumi KUME
大阪府立大学　工学部
College of Engineering, University of Osaka Prefecture

Abstract：A ranking method for fuzzy numbers using fuzzy max is not included in four ranking methods in the setting of possibility theory proposed by Dubois and Prade. The reason is that the inclusion relation of fuzzy sets is not induced from Dienes implication which construct the necessity measure in possibility theory. In this paper, we introduce Gödel implication in addition to Dienes implication. Gödel implication can be induced from minimum operation and the inclusion relation of fuzzy numbers can be induced from Gödel implication. 48 ranking indices are proposed and the relationships among them are investigated.

1．はじめに

人間の不明確な知識や、あいまいな評価を取り扱うファジィ意思決定法やファジィ数理計画法において、ファジィ集合を順序づけることは、基本的で重要な課題である。従来、ファジィ集合を順序づける種々の方法[1]が提案されている。それらの中で、意思決定者の選好を利用せず、通常の実数間の大小関係の観点から、ファジィ集合（この場合ファジィ数）を順序づける方法として、ファジィマックスに基づくもの[2,3]と、DuboisとPrade[4]による可能性理論に基づく四つの指標がよく知られている。

ファジィマックスとは、通常の実数間のmax演算を拡張原理によりファジィ数間の演算に拡張したものである。ファジィマックスを用いる順序づけ方法は、DuboisとPrade[2]およびFreeling[3]により提案された。しかし、これらの方法では、完全に大きいか大きくないかの二値的な判断のみを与え、ファジィ数間の半順序関係となり、いずれが大きいかを判断できない場合が多い。このことから、BaldwinとGuild[5]は、複数の代替案から一つの代替案を選ぶ決定問題に対しては不向きであると報告している。その後、田中ら[6,7]は、ファジィマックスの考え方にどの程度大きいかという度合を導入し、評価問題[6]、線形計画問題[7]を扱っている。この方法では、BaldwinとGuildの指摘した欠点を取り除くことができる。

一方、DuboisとPrade[4]による四つの指標は、可能性理論に基づき、可能性測度、必然性測度を用いて構成されている。BotolanとDegani[1]は、多くの例を用いて種々の順序づけ方法を比較し、DuboisとPradeの四つの指標が有効であることを報告している。なお、彼らは、ファジィマックスに基づくもの、田中らによるものは取り上げていない。

さて、ファジィマックスに基づくものと、DuboisとPradeの四つの指標の関係を考えると、それらの間には完全な対応関係はない。しかし、ファジィマックスを構成する拡張原理と可能性理論における可能性測度がいずれも、sup-min形式で表現されていることを鑑みれば、これらは必ずしも相対立するものではないと考えられる。

近年、独立に提案されてきた種々のファジィ意思決定問題、ファジィ数理計画問題の多くを、可能性理論から統一的に解釈しようとする試みがある[8,9,10]。乾口ら[11]は、新たな様相測度として、Gödel含意に基づく測度を提案し、その性質を吟味している。Gödel含意はmin演算から構成され、逆に、Gödel含意からmin演算を構成することもできるので、連言演算としてmin演算を用いる可能性理論にGödel含意を導入することは不合理ではないと考えられる。

Gödel含意に基づく必然性測度は、従来の必然性測度では取り扱えないファジィ集合間の包含関係を取り扱うことができる。また、ファジィマックスに基づく順序づけ方法がファジィ集合間の包含関係と可能性測度を用いて表現できることが、DuboisとPrade[12]により示されている。したがって、可能性理論に基づくDuboisとPradeの四つの指標の構成方法に、Gödel含意に基づく様相測度を導入することにより、ファジィマックスに基づく順序づけ方法と密接な関係にある新たな指標を導き出すことができる。また、これにより、ファジィマックスに基づくものと、DuboisとPradeによる四つの指標との関係の明確化が期待される。

本報告では、大小関係に基づく種々の順序づけ方法を統一的に解釈するための基礎として、DuboisとPradeの四つの指標の構成方法に、従来の様相測度に加えて、Gödel含意に基づく様相測度を導入し、48種類の指標を構成する。さらに、得られた48種類の指標の相互関係（特に強弱関係）を明らかにする。

2．準備

2.1. min演算、Dienes含意、Gödel含意

本報告では、連言演算$\wedge$としてmin演算，$a\wedge b=\min(a,b)$、否定演算～として、$\sim a=1-a$を用い、これから構成される含意演算、擬連言演算のみを扱う。すなわち、

$$a\overset{D}{\rightarrow}b=\sim(a\wedge\sim b)=\max(1-a,b) \tag{1}$$

$$a\overset{G}{\rightarrow}b=\sup\{s\in[0,1]/a\wedge s\leqq b\}=\begin{cases}1 & ; a\leqq b\\ b & ; a>b\end{cases} \tag{2}$$

$$a\underset{G}{\rightarrow}b=\sup\{s\in[0,1]/\sim b\wedge s\leqq\sim a\}=\begin{cases}1 & ; a\leqq b\\ 1-a & ; a>b\end{cases} \tag{3}$$

$$a\,\underline{\wedge}\,b=\sim(a\overset{G}{\rightarrow}\sim b)=\begin{cases}0 & ; a+b\leqq 1\\ b & ; a+b>1\end{cases} \tag{4}$$

$$a\,\underline{\wedge}\,b=\sim(a\underset{G}{\rightarrow}\sim b)=\begin{cases}0 & ; a+b\leqq 1\\ a & ; a+b>1\end{cases} \tag{5}$$

なる演算を考える。連言演算と擬連言演算の集合$C=\{\wedge,\underline{\wedge},\underline{\underline{\wedge}}\}$、含意演算の集合$I=\{\overset{D}{\rightarrow},\overset{G}{\rightarrow},\underset{G}{\rightarrow}\}$とし、$\phi:C\cup I\rightarrow C\cup I$，$\zeta:C\rightarrow I$，$\eta:C\rightarrow I$，$\delta:I\rightarrow I$，$\kappa:C\rightarrow C$をそれぞ

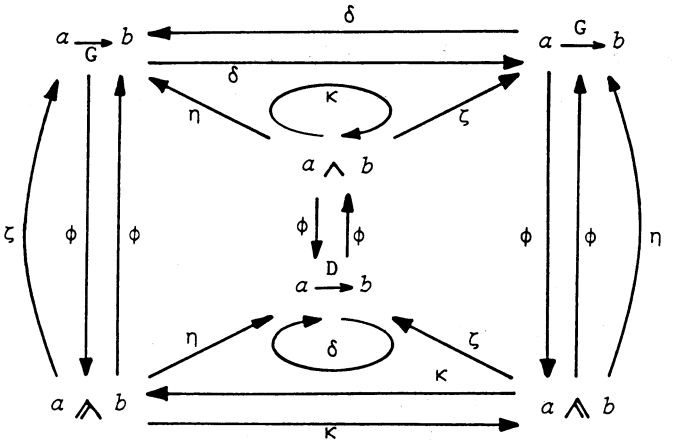


図１．含意演算、連言演算、擬連言演算の相互関係

れ、$a\phi(*)b=\sim(a*\sim b)$, $a\zeta(*)b=\sup\{s/a*s\leqq b\}$, $a\eta(*)b=\sup\{s/\sim b*s\leqq\sim a\}$, $a\delta(*)b=\sim b*\sim a$, $a\kappa(*)b=b*a$とすると、図１に示すような関係が得られる[13,14]。なお、$a,b\in\{0,1\}$ の場合を考えると明らかなように、C、Iの要素はそれぞれ、古典論理における連言、含意に対応している。

2.2. 種々の様相測度

様相論理におけるKripkeモデルとの類似性より、2.1 で述べた連言演算、擬連言演算および、含意演算を用いて、以下の可能性測度Π、擬可能性測度Λ，V、必然性測度N、擬必然性測度Γ，Lが定義できる[11]。

$$\Pi_A(B)=\sup_x\{\mu_A(x)\wedge\mu_B(x)\} \tag{6}$$

$$\Lambda_A(B)=\sup_x\{\mu_A(x)\mathbin{\&}\mu_B(x)\} \tag{7}$$

$$V_A(B)=\sup_x\{\mu_A(x)\mathbin{\&}\mu_B(x)\} \tag{8}$$

$$N_A(B)=\inf_x\{\mu_A(x)\overset{D}{\rightarrow}\mu_B(x)\} \tag{9}$$

$$\Gamma_A(B)=\inf_x\{\mu_A(x)\overset{G}{\rightarrow}\mu_B(x)\} \tag{10}$$

$$L_A(B)=\inf_x\{\mu_A(x)\underset{G}{\rightarrow}\mu_B(x)\} \tag{11}$$

ただし、A，Bはファジィ集合（可能性分布）で、μ_A、μ_Bはそのメンバシップ関数である。特に、Bが通常の集合であるとき、次式が成立する。

$$\Pi_A(B)=V_A(B) \tag{12}$$

$$N_A(B)=L_A(B) \tag{13}$$

３．様相測度に基づく不等号関係≧の拡張

本章では、可能性理論に基づくDuboisとPrade[4]の四つの順序付け指標の構成方法に従い、2.2 の六つの様相測度を用いて、48種類の順序付け指標を構成する。DuboisとPrade は不等号関係≧と＞を混ぜて定義しているが、ここでは、不等号関係≧のみを用いる。

ファジィ数Aが与えられたとき、様相測度Π，Λ，Vを用いて、“可能的にA以下のファジィ集合”$(-\infty,A]$, $(-\infty,A\rrbracket$を

$$\mu_{(-\infty,A]}(r)=\Pi_A([r,+\infty))=V_A([r,+\infty)) \tag{14}$$

$$\mu_{(-\infty,A\rrbracket}(r)=\Lambda_A([r,+\infty))$$

$$=\begin{cases}1\ ;\ x<\sup(A)_\theta \text{ or } x=\sup(A)_\theta\in(A)_\theta\\ 0\ ;\ x>\sup(A)_\theta \text{ or } x=\sup(A)_\theta\notin(A)_\theta\end{cases} \tag{15}$$

と定義できる。同様に、“可能的にA以上のファジィ集合”$[A,+\infty)$, $\llbracket A,+\infty)$を次のように定義できる。

$$\mu_{[A,+\infty)}(r)=\Pi_A((-\infty,r])=V_A((-\infty,r]) \tag{16}$$

$$\mu_{\llbracket A,+\infty)}(r)=\Lambda_A((-\infty,r])$$

$$=\begin{cases}1\ ;\ x>\inf(A)_\theta \text{ or } x=\inf(A)_\theta\in(A)_\theta\\ 0\ ;\ x<\inf(A)_\theta \text{ or } x=\inf(A)_\theta\notin(A)_\theta\end{cases} \tag{17}$$

また、様相測度N，Γ，Lを用いて、“必然的にA以下のファジィ集合”$(-\infty,A)$, $(-\infty,A\llparenthesis$、“必然的にA以上のファジィ集合”$)A,+\infty)$, $\rrparenthesis A,+\infty)$を次のように定義できる。

$$\mu_{(-\infty,A)}(r)=N_A([r,+\infty))=L_A([r,+\infty)) \tag{18}$$

$$\mu_{(-\infty,A\llparenthesis}(r)=\Gamma_A([r,+\infty))$$

$$=\begin{cases}1\ ;\ x\leqq\inf(A)_\theta\\ 0\ ;\ x>\inf(A)_\theta\end{cases} \tag{19}$$

$$\mu_{)A,+\infty)}(r)=N_A((-\infty,r])=L_A((-\infty,r]) \tag{20}$$

$$\mu_{\rrparenthesis A,+\infty)}(r)=\Gamma_A((-\infty,r])$$

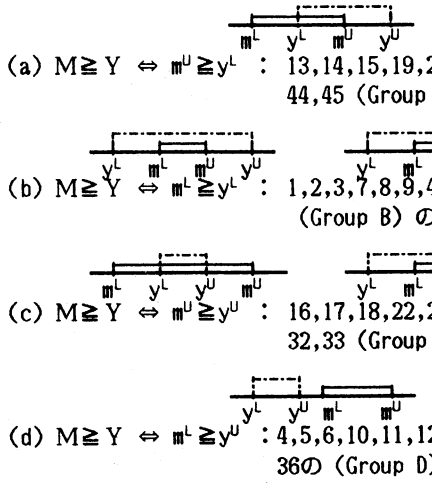
$$=\begin{cases}1\ ;\ x\geqq\sup(A)_\theta\\ 0\ ;\ x<\sup(A)_\theta\end{cases} \tag{21}$$

(15)、(17)、(19)、(21)に示すように、擬可能性測度Λ、擬必然性測度Γの性質より、$(-\infty,A\rrbracket$、$\llbracket A,+\infty)$、$(-\infty,A\llparenthesis$、$\rrparenthesis A,+\infty)$は通常の集合となる。

二つのファジィ数A，Bが与えられたとき、(14)～(21)式で定義されるファジィ集合と六つの様相測度Π，Λ，V，N，Γ，Lを組み合わせることにより、48種類の不等号関係A≧Bの成立度合、すなわち、順序付け指標が表１のように得られる。

定義より、表１の10と34、13と37、5と29、11と36、12と35、14と39、15と38、20と44がそれぞれ等しい。また、(12),(13)式より、1と3、4と6、19と21、22と24、25と27、28と30、43と45、46と48がそれぞれ、等しいことがわかる。さらに、文献[8] の命題５より、ファジィ数AおよびBが有界であるとき、7と40、16と31 がそれぞれ等しくなる。以後、簡単のため、有界なファジィ数のみを考えることにする。

特にファジィ数A，Bがそれぞれ、$M=[m^L,m^U]$, $Y=[y^L,y^U]$ なる閉区間であるとき、表１の48種は、図２に示す４種類の閉区間の不等号関係に分類される。この分類に基づき、48種類の順序付け指標を四つのグループ、Group A, Group B,



(a) $M\geqq Y \Leftrightarrow m^U\geqq y^L$: 13,14,15,19,20,21,37,38,39,43,44,45 (Group A) の場合

(b) $M\geqq Y \Leftrightarrow m^L\geqq y^L$: 1,2,3,7,8,9,40,41,42,46,47,48 (Group B) の場合

(c) $M\geqq Y \Leftrightarrow m^U\geqq y^U$: 16,17,18,22,23,24,25,26,27,31,32,33 (Group C) の場合

(d) $M\geqq Y \Leftrightarrow m^L\geqq y^U$: 4,5,6,10,11,12,28,29,30,34,35,36の (Group D) 場合

図２．48種類の順序付け指標と閉区間の四つの大小関係

表１．様相測度に基づく48種類の順序付け指標

1. $\Pi_B((-\infty,A($	2. $\Lambda_B((-\infty,A($	3. $V_B((-\infty,A($	4. $N_B((-\infty,A($	5. $\Gamma_B((-\infty,A($	6. $L_B((-\infty,A($
7. $\Pi_B((-\infty,A)$	8. $\Lambda_B((-\infty,A)$	9. $V_B((-\infty,A)$	10. $N_B((-\infty,A)$	11. $\Gamma_B((-\infty,A)$	12. $L_B((-\infty,A)$
13. $\Pi_B((-\infty,A])$	14. $\Lambda_B((-\infty,A])$	15. $V_B((-\infty,A])$	16. $N_B((-\infty,A])$	17. $\Gamma_B((-\infty,A])$	18. $L_B((-\infty,A])$
19. $\Pi_B((-\infty,A]$	20. $\Lambda_B((-\infty,A]$	21. $V_B((-\infty,A]$	22. $N_B((-\infty,A]$	23. $\Gamma_B((-\infty,A]$	24. $L_B((-\infty,A]$
25. $\Pi_A((B,+\infty))$	26. $\Lambda_A((B,+\infty))$	27. $V_A((B,+\infty))$	28. $N_A((B,+\infty))$	29. $\Gamma_A((B,+\infty))$	30. $L_A((B,+\infty))$
31. $\Pi_A()B,+\infty))$	32. $\Lambda_A()B,+\infty))$	33. $V_A()B,+\infty))$	34. $N_A()B,+\infty))$	35. $\Gamma_A()B,+\infty))$	36. $L_A()B,+\infty))$
37. $\Pi_A([B,+\infty))$	38. $\Lambda_A([B,+\infty))$	39. $V_A([B,+\infty))$	40. $N_A([B,+\infty))$	41. $\Gamma_A([B,+\infty))$	42. $L_A([B,+\infty))$
43. $\Pi_A((B,+\infty))$	44. $\Lambda_A((B,+\infty))$	45. $V_A((B,+\infty))$	46. $N_A((B,+\infty))$	47. $\Gamma_A((B,+\infty))$	48. $L_A((B,+\infty))$

Group C, Group Dに分ける。

４．性質および相互関係

表１の48種類の順序付け指標の強弱（大小）関係を調べ、図示すると、図３のようになる（証明略）。図３の実線は、実線の上端の閉曲線で囲まれるすべての順序付け指標の値が、実線の下端の閉曲線で囲まれる任意の順序付け指標の値以上であることを示している。したがって、図中の下に位置する指標ほど不等号関係Ａ≧Ｂの成立を厳しく評価し、上に位置する指標ほど甘く評価する。図３より、20と44の指標の値が最大で、最も甘く、５と29の指標の値が最小で、最も厳しいことがわかる。Group A に属する指標は図３の上に位置し、Group D に属する指標は下に位置している。また、Group B に属する指標は図３の右中央に位置し、Group C に属する指標は左中央に位置している。

不等号関係Ａ≧Ｂが成立する可能性に基づき判断するときは、図３の上に位置する指標を用い、Ａ≧Ｂが成立するという確信に基づき判断するときは、図３の下に位置する指標を用いると良い。

表１の48種類の各順序付け指標の値は、あるファジィ関係℘のメンバシップ値と考えることができる。このとき、明らかに、ファジィ関係℘は、“ファジィ数Ａがファジィ数Ｂ以上である”という関係を表し、通常の不等号関係≧の拡張である。通常の実数に対して、

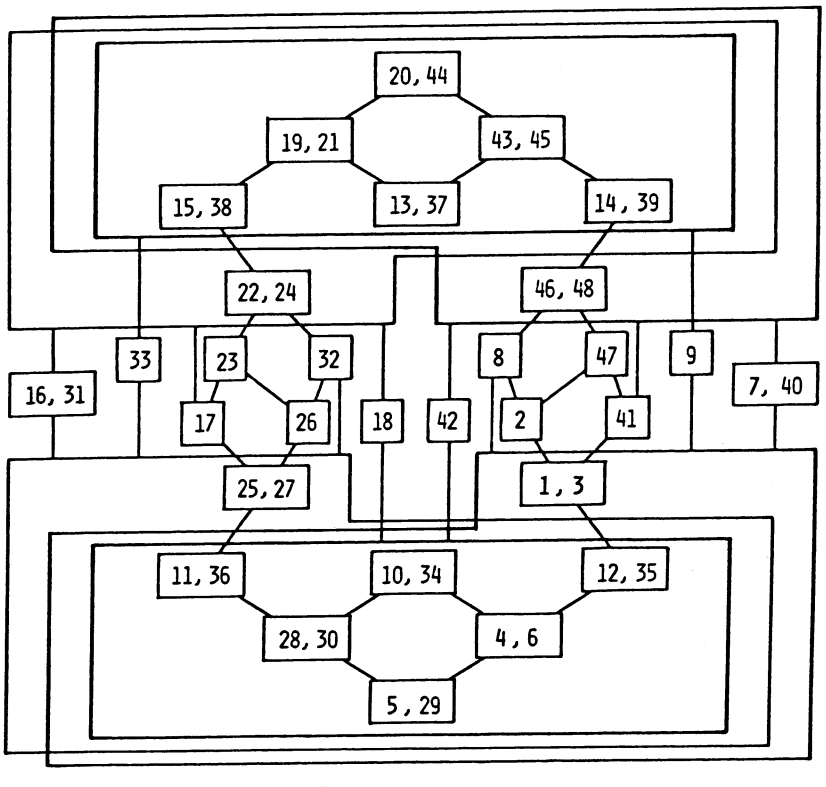


図３．48種類の順序付け指標の強弱（大小）関係

表２．各順序付け指標を用いて定義されるファジィ関係が満足する性質

	1・3	2	4・6	5・29	7・40	8	9	10・34	11・36	12・35	13・37	14・39	15・38	16・31	17	18	19・21	20・44	22・24	23	25・27	26	28・30	32	33	41	42	43・45	46・48	47
反射性	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○
弱反射性	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○
反対称性	□	△	□	○	×	△	△	△	□	□	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	□	△	□	△	△	×	×	×	×	×
弱反対称性	□	△	○	○	□	△	□	○	○	○	×	×	×	□	×	×	×	×	×	×	□	△	○	△	□	×	×	×	×	×
推移性	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○
強線形性	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○
弱線形性	○	○	×	×	○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○

不等号関係≧は全順序関係となる。全順序関係とは、反射性、反対称性、推移性、比較可能性の四つの性質を満たす二項関係である。

以下では、表１の48種類の順序付け指標により定義されるファジィ関係$\wp$が反射性、反対称性などの性質を満足するか否かを調べる。ファジィ関係に対する反射性、反対称性などの性質は、Zadeh[15]やOrlovsky[16]らにより定義されている。これらは、通常の二項関係に対する性質の拡張である。なお、ここでは、Orlovskyにより定義された反射性、反対称性、推移性、強線形性（比較可能性に対応）、弱線形性（比較可能性に対応）に、弱反射性、弱反対称性を加えて考える。これらの性質は、次のように定義される。

反射性：$\mu_{\wp}(A,A)=1$，$\forall A$（有界なファジィ数）

弱反射性：$\mu_{\wp}(A,A)>0$，$\forall A$（有界なファジィ数）

反対称性：$\mu_{\wp}(A,B)>0$ならば、$\mu_{\wp}(B,A)=0$

弱反対称性：$\mu_{\wp}(A,B)=1$ならば、$\mu_{\wp}(B,A)<1$

推移性：$\mu_{\wp}(A,B) \geqq \sup_C\{\mu_{\wp}(A,C)\wedge\mu_{\wp}(C,B)\}$

強線形性：$\mu_{\wp}(A,B)\geqq\mu_{\wp}(B,A)$ならば、$\mu_{\wp}(A,B)=1$

弱線形性：$\mu_{\wp}(A,B)=0$ならば、$\mu_{\wp}(B,A)>0$

ただし、推移性、強線形性を除き、AとBは等しくない。

上述の性質を各指標について調べると、表２のようになる。表２で、○は満足することを示し、×は満たさないことを表している。また、□はファジィ数の左右の幅が正である（左右にメンバシップ値が０より大きく１より小さい点がある）とき、△はファジィ数のメンバシップ関数が連続であるとき、満足することを表している。

表２より、すべての性質を満たすものは存在しないことがわかる。弱反射性、弱反対称性、推移性、弱線形性の四つの性質を満たすものも存在しない。したがって、いずれの順序付け指標も全順序関係を与えないことがわかる。23，47の指標は最も多くの性質を満たしている。これらは、擬必然性測度Γの性質より、通常の二項関係を与える。この二項関係は、反射性、推移性、比較可能性を満足しているので、弱順序関係となる。17，18，41，42の指標は、反射性、弱反射性、推移性、弱線形性を満たしているので、弱順序関係の一種の拡張である弱ファジィ弱順序関係を与える。

なお、単独で半順序関係（反射性、反対称性、推移性を満たす）を導く順序付け指標は存在しないが、表１の指標（特に、Group Bに属するものとGroup Cに属するもの）を組み合わせることにより、半順序関係を与える指標が得られる。たとえば、17と41を次のようにmin演算で組み合わせると、

$$\mu_{\wp}(A,B)=\Gamma_B((-\infty,A])\wedge\Gamma_A([B,+\infty)) \quad (22)$$

ファジィ関係$\wp$は、反射性、弱反射性、反対称性、弱反対称性、推移性を満たし（弱線形性は満たさなくなる）、半順序関係の一種の拡張であるファジィ半順序関係となる。

参考文献

[1] Bortolan, G. and Degani, R.: A Review of Some Methods for Ranking Fuzzy Subsets. Fuzzy Sets and Systems, Vol.15(1985), 1-19.

[2] Dubois, D. and Prade, H.: Comment on 'Tolerance Analysis Using Fuzzy Sets' and 'A Procedure for Multiple Aspect Decision Making'. Int. J. Systems Sci., Vol.9, No.3(1978), 357-360.

[3] Freeling, A.S.: Fuzzy Sets and Decision Analysis. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol.SMC-10, No.7(1980), 341-354.

[4] Dubois, D. and Prade, H.: Ranking Fuzzy Numbers in the Setting of Possibility Theory. Information Sci., Vol.30(1983), 183-224.

[5] Baldwin, J.F. and Guild, N.C.F.: Comments on the 'Fuzzy Max' Operator of Dubois and Prade. Int. J. Systems Sci., Vol.10, No.9(1979), 1063-1064.

[6] 田中，和多田，浅居：ファジィ集合による多属性代替案の評価．システムと制御，Vol.27，No.6(1983)，403-409.

[7] Tanaka, H., Ichihashi, H. and Asai, K.: A Formulation of Fuzzy Linear Programming Problem Based on Comparison of Fuzzy Numbers. Control and Cybernetics, Vol.13, No.3(1984), 185-194.

[8] 乾口，市橋，田中：様相概念に基づくファジィ選好関係の拡張とその性質．計測自動制御学会論文集，Vol.24，No.7(1988)，738-745.

[9] 乾口，市橋，久米：ファジィ数理計画問題の様相的構成．システム制御情報学会論文誌，Vol.2，No.3(1989)，69-79.

[10] 乾口，市橋，久米：様相制約条件計画問題と種々のファジィ数理計画問題．システム制御情報学会論文誌，Vol.3，No.2(1990)，46-54.

[11] 乾口，久米，市橋：Ｇödel含意を用いた可能性と必然性について．計測自動制御学会論文集，Vol.25，No.5(1989)，592-599.

[12] Dubois, D. and Prade, H.: Twofold Fuzzy Sets: An Approach to the Representation of Sets with Fuzzy Boundaries Based on Possibility and Necessity Measures. 模糊数学，Vol.3，No.4 (1983)，53-76.

[13] Dubois, D. and Prade, H.: Fuzzy Set-theoretic Differences and Inclusions and Their Use in the Analysis of Fuzzy Equations. Control and Cybernetics, Vol.13(1984), 129-146.

[14] Dubois, D. and Prade, H.: A Theorem on Implication Functions Defined from Triangular Norms. Stochastica, Vol.8 (1984), 267-279.

[15] Zadeh, L.A.: Similarity Relations and Fuzzy Orderings. Information Sci., Vol.3(1971), 177-200.

[16] Orlovsky, S.A.: Decision-making with a Fuzzy Preference Relation. Fuzzy Sets and Syst., Vol.1(1978),155-167.

TC2-2

不等号関係に基づく種々のファジィ数の順序付け方法とそれらの相互関係
Various ranking methods for fuzzy numbers based on an inequality relation and their relationships

乾口雅弘, 久米靖文
Masahiro INUIGUCHI, Yasufumi KUME
大阪府立大学 工学部
College of Engineering, University of Osaka Prefecture

Abstract : It is an important point to define a ranking method for fuzzy numbers in fuzzy decision making and fuzzy mathematical programming. There are three possible ways of defining a ranking index in the sense of an inequality relation ≧. The first one is based on extending the inequality relation ≧. The second is induced from the extended maximum operation (fuzzy max) or minimum operation (fuzzy min). The last one is defined by using extended subtraction. In this paper, we introduce 81 kinds of ranking indices defined in the above three ways. The relationships among these indices are discussed.

1. はじめに

ファジィ意思決定法やファジィ数理計画法では、ファジィ数間の順序付け指標を定義することは極めて重要である。なぜなら、順序付け指標を用いて決定を下すのであるから、指標の定義により解が左右されるからである。したがって、種々の順序付け指標の性質および相互関係を調べることは有意義であると考えられる。

ファジィ数を通常の不等号関係≧の意味で比較する場合、不等号関係≧をファジィ数間の関係に拡張する必要がある。不等号関係≧の拡張方法として、基本的に次の三つの方法が考えられる。すなわち、不等号関係≧を直接拡張する方法、ファジィ数間の演算に拡張された max演算（ファジィマックス）、 min演算（ファジィミン）を用いる方法、ファジィ数間の差を用いる方法が考えられる。

本報告では、文献[1] に引続き、これらの方法に基づく81種の順序付け指標の性質および相互関係を明らかにする。

2. 準備

2.1. 種々の様相測度

本報告では、文献[1,2] に従い、次の六つの様相測度を用いる。

$$\Pi_A(B)=\sup_x\{\mu_A(x)\wedge\mu_B(x)\} \quad (1)$$

$$\Lambda_A(B)=\sup_x\{\mu_A(x)\wedge\mu_B(x)\} \quad (2)$$

$$V_A(B)=\sup_x\{\mu_A(x)\wedge\mu_B(x)\} \quad (3)$$

$$N_A(B)=\inf_x\{\mu_A(x)\overset{D}{\rightarrow}\mu_B(x)\} \quad (4)$$

$$\Gamma_A(B)=\inf_x\{\mu_A(x)\overset{G}{\rightarrow}\mu_B(x)\} \quad (5)$$

$$L_A(B)=\inf_x\{\mu_A(x)\underset{G}{\rightarrow}\mu_B(x)\} \quad (6)$$

ただし、$a\wedge b=\min(a,b)$、

$$a\overset{D}{\rightarrow}b=\sim(a\wedge\sim b)=\max(1-a,b) \quad (7)$$

$$a\overset{G}{\rightarrow}b=\sup\{s\in[0,1]/a\wedge s\leqq b\}=\begin{cases}1 & ; a\leqq b\\ b & ; a>b\end{cases} \quad (8)$$

$$a\underset{G}{\rightarrow}b=\sup\{s\in[0,1]/\sim b\hat{\wedge}s\leqq\sim a\}=\begin{cases}1 & ; a\leqq b\\ 1-a & ; a>b\end{cases} \quad (9)$$

$$a\wedge b=\sim(a\overset{G}{\rightarrow}\sim b)=\begin{cases}0 & ; a+b\leqq 1\\ b & ; a+b>1\end{cases} \quad (10)$$

$$a\wedge b=\sim(a\underset{G}{\rightarrow}\sim b)=\begin{cases}0 & ; a+b\leqq 1\\ a & ; a+b>1\end{cases} \quad (11)$$

と定義される。また、μ_A、μ_Bはファジィ集合A，Bのメンバシップ関数である。

このように、可能性測度Π、必然性測度Nに擬可能性測度Λ，V、擬必然性測度Γ，Lを加えるのは、ファジィマックスに基づく順序付け指標を可能性理論の枠組みで扱おうとするためである[1,2]。

2.2. ファジィ関係に対して定義される性質

メンバシップ関数$\mu_\wp$をもつファジィ関係℘が与えられたとき、反射性、弱反射性、反対称性、弱反対称性、推移性、強線形性、弱線形性が次のように定義される。

反射性：$\mu_\wp(A,A)=1$， $\forall A$（有界なファジィ数）
弱反射性：$\mu_\wp(A,A)>0$， $\forall A$（有界なファジィ数）
反対称性：$\mu_\wp(A,B)>0$ならば、$\mu_\wp(B,A)=0$
弱反対称性：$\mu_\wp(A,B)=1$ならば、$\mu_\wp(B,A)<1$
推移性：$\mu_\wp(A,B)\geqq\sup_C\{\mu_\wp(A,C)\wedge\mu_\wp(C,B)\}$
強線形性：$\mu_\wp(A,B)\geqq\mu_\wp(B,A)$ならば、$\mu_\wp(A,B)=1$
弱線形性：$\mu_\wp(A,B)=0$ならば、$\mu_\wp(B,A)>0$

ただし、推移性、強線形性を除き、AとBは等しくない。

3. 不等号関係≧を直接拡張する方法

3.1. DuboisとPradeの構成方法に基づく場合

DuboisとPrade[3] の順序付け指標の構成方法に従い[4]、不等号関係≧を拡張すると、文献[1] に示すように、48種類の順序付け指標が得られる。この48種類の順序付け指標の性質および相互関係は、紙数の都合上 文献[1]を参照されたい。

これらの順序付け指標はそれぞれ、次の意味において定義されている[3,4]。すなわち、13,14,15,19,20,21の指標は“Bが可能的にA以下である可能性”、37,38,39,43,44,45 の指標は“Aが可能的にB以上である可能性”、 1,2,3,7,8,9 の指標は“Bが必然的にA以下である可能性”、40,41,42, 46,47,48の指標は“Aが可能的にB以上である必然性”、16,17,18,22,23,24 の指標は“Bが可能的にA以下である必然性”、25,26,27,31,32,33 の指標は“Aが必然的にB以上である可能性”、4,5,6,10,11,12の指標は“Bが必然的にA

以下である必然性”、28,29,30,34,35,36 の指標は“Aが必然的にB以上である必然性”という意味において定義されている。

以後、主として、この48種類の指標と以下で定義される指標を比較することにより相互関係を調べることにする。

3.2. 直積空間上で拡張する場合

二つのファジィ数A，Bが与えられたとき、Aで制限される（可能性）変数を$x \in X$、Bで制限される（可能性）変数を$y \in Y$と考え、直積$X \times Y$上の同時可能性分布(A,B)を考える。この場合、変数xとyはnon-interactive[5]であると仮定し、(A,B)を

$$\mu_{(A,B)}(x,y)=\mu_A(x)\wedge\mu_B(y) \qquad (12)$$

と定義できる。“xはy以上である”という関係$\geqq$は、直積$X \times Y$では、通常の集合になることより、様相測度を用いて、次の６種類の順序付け指標を定義することができる。

49. $\Pi_{(A,B)}(\geqq)$，　50. $\Lambda_{(A,B)}(\geqq)$，

51. $V_{(A,B)}(\geqq)$，　52. $N_{(A,B)}(\geqq)$，

53. $\Gamma_{(A,B)}(\geqq)$，　54. $L_{(A,B)}(\geqq)$，

49～51の指標は“AがB以上である可能性”（あるいは“BがA以下である可能性”）を、52～54の指標は“AがB以上である必然性”（あるいは“BがA以下である必然性”）を示していると解釈できる。$\geqq$は通常の集合であるので、49と51、52と54はそれぞれ等しくなる。

これらの順序付け指標と 3.1の48種類の順序付け指標を比較すると、

$$(a\wedge b)\wedge c=a\wedge(b\wedge c),\quad (a\wedge b)\curlywedge c=a\curlywedge(b\curlywedge c) \qquad (13)$$

$$a\wedge\sup_i b_i=\sup_i(a\wedge b_i),\quad a\curlywedge\sup_i b_i=\sup_i(a\curlywedge b_i) \qquad (14)$$

$$(a\wedge b)\overset{D}{\rightarrow}c=a\overset{D}{\rightarrow}(b\overset{D}{\rightarrow}c),\quad (a\wedge b)\overset{G}{\rightarrow}c=a\overset{G}{\rightarrow}(b\overset{G}{\rightarrow}c) \qquad (15)$$

$$a\overset{D}{\rightarrow}\inf_i b_i=\inf_i(a\overset{D}{\rightarrow}b_i),\quad a\overset{G}{\rightarrow}\inf_i b_i=\inf_i(a\overset{G}{\rightarrow}b_i) \qquad (16)$$

が成立することより、13,37と49,51、20,44と50、10,34と52,54、5,29と53がそれぞれ等しくなる。したがって、49～54の順序付け指標のもつ性質は、文献[1] の表２より明らかである。

4．ファジィマックス、ファジィミンを用いる方法

通常の実数r，sについて、

$$r\geqq s \Leftrightarrow \max(r,s)=r \Leftrightarrow \min(r,s)=s \Leftrightarrow r-s\geqq 0 \Leftrightarrow s-r\leqq 0 \qquad (17)$$

が成立する。ただし、‘⇔’は等価記号である。

本章では、(17)式の最初の二つの等価関係、すなわち、

$$r\geqq s \Leftrightarrow \max(r,s)=r \Leftrightarrow \min(r,s)=s$$

の観点から、ファジィ数間の順序付け指標を定義する。

まず、実数間で定義されているmax演算、min演算をファジィ数間の演算に拡張する。そこで、次の拡張原理を適用する。

[拡張原理]

通常の２変数関数$f:R^2\rightarrow R$が与えられたとき、この関数fをファジィ数の関数に次のように拡張することができる。

$$\mu_C(r)=\begin{cases}\sup\{\min(\mu_A(s),\ \mu_B(t)\mid f(s,t)=r\}; \\ \qquad\qquad \{(s,t)\mid f(s,t)=r\}\neq\phi \\ 0\ ;\ \{(s,t)\mid f(s,t)=r\}=\phi\end{cases} \qquad (18)$$

ただし、CはA,Bに関数fを施した結果、つまり、

$$C=f(A,B) \qquad (19)$$

である。μ_A、μ_B、μ_Cはそれぞれ、A，B，Cのメンバシップ関数である。

拡張原理を用いると、max演算、min演算はそれぞれ、次のように拡張される。

$$\mu_{\max(A,B)}(r)=\sup\{\min(\mu_A(s),\ \mu_B(t)\mid \max(s,t)=r\} \qquad (20)$$

$$\mu_{\min(A,B)}(r)=\sup\{\min(\mu_A(s),\ \mu_B(t)\mid \min(s,t)=r\} \qquad (21)$$

ここで、集合{(s，t)／max(s，t)＝r}，{(s，t)／min(s，t)＝r}は、任意のrについて空でないことに注意されたい。(20)、(21)式で定義されるファジィ数間のmax演算、min演算は、ファジィマックス、ファジィミンと呼ばれている。

さて、ファジィマックス、ファジィミンを用いて、ファジィ数間の順序付け指標F_{max}，F_{min}（この場合、指標の値は{0,1}内の値を取る）を次のように定義できる[6,7]。

55. $F_{max}=\begin{cases}1\ ;\ \max(A,B)\equiv A\\ 0\ ;\ \text{その他}\end{cases}$

56. $F_{min}=\begin{cases}1\ ;\ \min(A,B)\equiv B\\ 0\ ;\ \text{その他}\end{cases}$

ただし、$A\equiv B$は、ファジィ数AとBが分布の意味において等しいことを表し、

$$\mu_A(x)=\mu_B(x),\quad \forall x\in R \qquad (22)$$

と定義される。すなわち、Aに制限される（可能性）変数とBに制限される（可能性）変数が等しいことを表しているのではない（注１参照）。

55と56の順序付け指標は互いに等しいこと、すなわち、$F_{max}=F_{min}$が成立することが知られている[8]。

55,56の順序付け指標と、3.1の48種類の順序付け指標を比較すると、次式が成立する。

$$\begin{aligned}&F_{max}=1 \Leftrightarrow F_{min}=1\\ &\Leftrightarrow \Gamma_B((-\infty,A])=1\text{、かつ、}\Gamma_A([B,+\infty))=1\\ &\Leftrightarrow \Gamma_B((-\infty,A])=1\text{、かつ、}L_A([B,+\infty))=1\\ &\Leftrightarrow L_B((-\infty,A])=1\text{、かつ、}\Gamma_A([B,+\infty))=1\\ &\Leftrightarrow L_B((-\infty,A])=1\text{、かつ、}L_A([B,+\infty))=1\end{aligned} \qquad (23)$$

したがって、55，56の順序付け指標は、17または18と41または42を用いて表現できることがわかる。

順序付け指標55，56から導き出されるファジィ関係（この場合、通常の二項関係）は、反射性、弱反射性、反対称性、弱反対称性、推移性を満足する。したがって、半順序関係となる。

BaldwinとGuild[9]は、55,56の順序付け指標では、完全に大きいか大きくないかの二値的な判断のみを与え、ファジィ数間の半順序関係となり、いずれが大きいかを判断できない場合が多く、複数の代替案から一つの代替案を選ぶ決定問題に対しては不向きであると報告している。その後、田中ら[10,11] は、ファジィマックスの考え方にどの程度大きいかという度合を導入し、評価問題[10]、線形計画問題[11]を扱っている。この方法では、度合を導入しているので、BaldwinとGuild の指摘した欠点を取り除くことができる。そこで、田中らの考え方に基づく順序付け指標Tを次式で定義する。

57. $T=\sup\{h\mid [\max(A,B)]_k\equiv[A]_k,\ \forall k\in[1-h,1)\}$

この順序付け指標と、3.1の48種類の順序付け指標を比較すると、

$$T=L_B((-\infty,A])\wedge L_A([B,+\infty)) \qquad (24)$$

が成立する。すなわち、57の順序付け指標は、18の指標と42の指標の小さい方の値を取る。

57の順序付け指標から導かれるファジィ関係は、反射性、弱反射性、反対称性、弱反対称性、推移性を満足し、ファジィ半順序となる。

【注1】 (17)式の最初の二つの等価関係から、max(A,B)=A、min(A,B)=Bと捕らえ、二つのファジィ数max(A,B)とAの等しい度合、min(A,B)とBの等しい度合により、順序づけ指標を定義する方法も考えられる。しかし、この場合、max(A,B)およびmin(A,B)は二つのファジィ数AとBにより構成されているので、max(A,B)とAにも、min(A,B)とBにもinteraction[5]が存在する。したがって、max(A,B)に制限される変数をr、Aで制限される変数をsとすると、rが既知のもとでのsの可能性分布（条件付可能性分布）、あるいは、sが既知のもとでのrの可能性分布（条件付可能性分布）などを定める必要がある。前者の条件付可能性分布を定めることは困難であるが、後者の条件付可能性分布$\pi(\cdot/s)$は、たとえば、

$$\pi(r/s)=\begin{cases}\mu_B(r) & ; r>s\\ \mu_{[B,+\infty)}(r) & ; r=s\\ 0 & ; r<s\end{cases} \qquad (25)$$

と与えることができる。このとき、s=rとなる度合は、interaction を考慮した等号関係=の拡張方法[12,13] を用いて定めることができる。たとえば、文献[1] の表1の37に対応するものを考えると、

$$\sup_{s,r}\{\mu_A(s)\wedge\pi(r/s)\wedge\mu_{=}(r,s)\}$$
$$=\sup_{s}\{\mu_A(s)\wedge\pi(s/s)\}$$
$$=\Pi_A([B,+\infty)) \qquad (26)$$

となり、結局、37の順序付け指標に帰着される。他の場合も同様に、文献[1] の表1のいずれかの指標と一致する。

さらに、通常の実数r, sについて、

$$r\geqq s \Leftrightarrow \max(r,s)\leqq r \Leftrightarrow \min(r,s)\geqq s$$

が成立することより、Aがmax(A,B)以上である度合、min(A,B)がB以上である度合をinteraction を考慮して、文献[1] の表1と同様な順序付け指標を考えることができる[13]。ここでは、Aがmax(A,B)以上である度合を考え、それらが文献[1] の表1の25～48の順序付け指標に等しいことを示す。文献[13]より、(25)式の条件付可能性分布からは、文献[1] の表1の25～48に対応するものしか得られない。得られる順序付け指標が、表1の25～48の順序付け指標に等しいことを示すためには、

$$\inf_r\{\pi(r/s)\overset{G}{\rightarrow}\mu_{\geqq}(s,r)\}=\inf_r\{\mu_B(r)\overset{G}{\rightarrow}\mu_{\geqq}(s,r)\} \qquad (27)$$

$$\inf_r\{\pi(r/s)\overset{D}{\rightarrow}\mu_{\geqq}(s,r)\}=\inf_r\{\mu_B(r)\overset{D}{\rightarrow}\mu_{\geqq}(s,r)\} \qquad (28)$$

$$\sup_r\{\pi(r/s)\wedge\mu_{\geqq}(s,r)\}=\sup_r\{\mu_B(r)\wedge\mu_{\geqq}(s,r)\} \qquad (29)$$

$$\sup_r\{\pi(r/s)\wedge\mu_{\geqq}(s,r)\}=\sup_r\{\mu_B(r)\wedge\mu_{\geqq}(s,r)\} \qquad (30)$$

を示せば十分である。(27)式は、次のように示せる。

(i) s≧rのとき、次式が成立する。

$$\pi(r/s)\overset{G}{\rightarrow}\mu_{\geqq}(s,r)=\mu_B(r)\overset{G}{\rightarrow}\mu_{\geqq}(s,r)=1$$

(ii) s<rのとき、(25)式より次式が成立する。

$$\pi(r/s)\overset{G}{\rightarrow}\mu_{\geqq}(s,r)=\mu_B(r)\overset{G}{\rightarrow}\mu_{\geqq}(s,r)$$

(i),(ii)より、(27)式が成立する。(28)～(30)式も容易に証明できる。

このように、この場合も新たな順序付け指標は得られない。

5．ファジィ数間の差を用いる方法

本章では、(17)式の後半の二つの等価関係、すなわち、

$$r\geqq s \Leftrightarrow r-s\geqq 0 \Leftrightarrow s-r\leqq 0$$

の観点から、ファジィ数間の順序付け指標を定義する。

前章と同様に、実数間で定義されている減法をファジィ数間の演算に拡張する必要がある。乾口と久米[14]は、ファジィ数間の差が、(18)式の拡張原理に基づくもの以外に、ファジィ方程式の解に基づくものが考えられることを指摘している。以下では、文献[14]に基づき、4種類のファジィ数間の差を定義する。

まず、(18)式の拡張原理に基づく差として、次のA－Bが定義できる。

$$\mu_{A-B}(r)=\sup\{\min(\mu_A(s),\ \mu_B(t)/s-t=r\} \qquad (31)$$

差A－Bは、A，Bで制限された値のすべての組合せを考慮しているので、可能的な差と考えられる。

次に、ファジィ数の方程式

$$U+B=A \qquad (32)$$

を考える。ここで、A，Bは予め与えられたファジィ数で、(32)式はBとの和がAとなるようなファジィ数Uを求める問題である。また、U＋Bは(18)式の拡張原理を用いて、

$$\mu_{U+B}(r)=\sup\{\min(\mu_U(u),\ \mu_B(t)/u+t=r\} \qquad (33)$$

と定義される。(32)式の最大解Uは、Godel含意を用いて、

$$\mu_U(u)=\inf_r\{\mu_B(r-u)\overset{G}{\rightarrow}\mu_A(r)\} \qquad (34)$$

と与えられることが知られている [15,16]。このことより、二つのファジィ数AとBの差$A\dot{-}B$を

$$\mu_{A\dot{-}B}(u)=\inf_r\{\mu_B(r-u)\overset{G}{\rightarrow}\mu_A(r)\} \qquad (35)$$

と定義できる。同様に、ファジィ数の方程式

$$U+A=B \qquad (36)$$

より、BとAの差$B\dot{-}A$を定義できることより、AとBの差$A\dot{-}B$を

$$A\dot{-}B=-(B\dot{-}A) \qquad (37)$$

すなわち、

$$\mu_{A\dot{-}B}(r)=\mu_{B\dot{-}A}(-r) \qquad (38)$$

と定義できる。ところが、$A\dot{-}B$，$A\dot{-}B$は常に存在するとは限らず、$A\dot{-}B$が存在しない（つまり、$A\dot{-}B=\phi$）ときには、$A\dot{-}B$は存在し（正規であるとは限らない）、$A\dot{-}B$が存在しないときには、$A\dot{-}B$は存在する。そこで、$A\dot{-}B$と$A\dot{-}B$を合わせて、AとBの差$A\setminus B$を

$$A\setminus B=(A\dot{-}B)\cup(A\dot{-}B) \qquad (39)$$

と定義できる。

差$A\dot{-}B$は、ファジィ数Bがファジィ数Aに一致するために必要な最大の差を表し、差$A\dot{-}B$は、ファジィ数Aがファジィ数Bに一致するために必要な最大の差を表していると考えられる。また、差$A\setminus B$は、ファジィ数Aとファジィ数Bが一致するために必要な最大の差を示している。(31)式の可能的な差に対し、これらの差は、一方が他方に一致するために必要な差を示しているという観点から、必然的な差と考えることができる。

以下では、$A\dot{-}B$，$A\dot{-}B$のいずれかが正規（$A\setminus B$が正

規）であると仮定する。たとえば、文献[14]で取り扱っているように、A，Bが同じ形状をもつ対称なファジィ数であるとき、常にこの仮定は満足される。

上述のように、ファジィ数AとBの差として4種類の差が定義できる。(17)式の後半の二つの等価関係から、これらの4種類の差および6種類の様相測度を用いて、以下に示す24種類の順序付け指標が得られる。

58. $\Pi_{A-B}([0,+\infty))$, 59. $\Lambda_{A-B}([0,+\infty))$,
60. $V_{A-B}([0,+\infty))$, 61. $N_{A-B}([0,+\infty))$,
62. $\Gamma_{A-B}([0,+\infty))$, 63. $L_{A-B}([0,+\infty))$,
64. $\Pi_{A\dot{-}B}([0,+\infty))$, 65. $\Lambda_{A\dot{-}B}([0,+\infty))$,
66. $V_{A\dot{-}B}([0,+\infty))$, 67. $N_{A\dot{-}B}([0,+\infty))$,
68. $\Gamma_{A\dot{-}B}([0,+\infty))$, 69. $L_{A\dot{-}B}([0,+\infty))$,
70. $\Pi_{A\dot{+}B}([0,+\infty))$, 71. $\Lambda_{A\dot{+}B}([0,+\infty))$,
72. $V_{A\dot{+}B}([0,+\infty))$, 73. $N_{A\dot{+}B}([0,+\infty))$,
74. $\Gamma_{A\dot{+}B}([0,+\infty))$, 75. $L_{A\dot{+}B}([0,+\infty))$,
76. $\Pi_{A\setminus B}([0,+\infty))$, 77. $\Lambda_{A\setminus B}([0,+\infty))$,
78. $V_{A\setminus B}([0,+\infty))$, 79. $N_{A\setminus B}([0,+\infty))$,
80. $\Gamma_{A\setminus B}([0,+\infty))$, 81. $L_{A\setminus B}([0,+\infty))$,

$A\dot{-}B$あるいは$A\dot{+}B$が正規であることより、明らかに、58と60、61と63、64と66、67と69、70と72、73と75、76と78、79と81はそれぞれ等しい。また、$A\setminus B$の定義より、次式が成立する。

$$\Pi_{A\setminus B}([0,+\infty)) = \max\{\Pi_{A\dot{-}B}([0,+\infty)), \Pi_{A\dot{+}B}([0,+\infty))\} \quad (40)$$

$$\Lambda_{A\setminus B}([0,+\infty)) = \max\{\Lambda_{A\dot{-}B}([0,+\infty)), \Lambda_{A\dot{+}B}([0,+\infty))\} \quad (41)$$

$$N_{A\setminus B}([0,+\infty)) = \min\{N_{A\dot{-}B}([0,+\infty)), N_{A\dot{+}B}([0,+\infty))\} \quad (42)$$

$$\Gamma_{A\setminus B}([0,+\infty)) = \min\{\Gamma_{A\dot{-}B}([0,+\infty)), \Gamma_{A\dot{+}B}([0,+\infty))\} \quad (43)$$

58～81の順序付け指標と 3.1の48種類の順序付け指標を比較する。13,37と58,60、20,44と59、10,34と61,63、5,29 と62がそれぞれ等しくなる。また、$A\dot{-}B$が正規であるとき、64,66と17が等しくなり、$A\dot{+}B$が正規であるとき、70,72と41が等しくなることは証明できる。ところが、$A\dot{-}B$あるいは$A\dot{+}B$の正規性を仮定しても、65,67～69,71,73～75 に等しい 3.1の順序付け指標は存在しない。しかし、以下に示すように、それらとほぼ等しいものが存在する。$A\dot{-}B$が正規であるとき、65は23に、67,69は8に、68は47にほぼ等しく、$A\dot{+}B$が正規であるとき、71は47に、74は23に、73,75は 32にほぼ等しくなる(証明略)。たとえば、65は、$A\dot{-}B$が正規であるとき、$\sup(A)_0=\sup(B)_0$、かつ、$\sup(A)_0 \notin (A)_0$、かつ、$\sup(B)_0 \in (B)_0$ の場合を除き、23の順序付け指標に一致する。また、(41)～(43)式より、76～81と 3.1の48の順序付け指標との関係を、64～75を通して理解できる。たとえば、76,78 は$A\dot{-}B$が正規であるときは17に等しく、$A\dot{+}B$が正規であるときは41に等しくなる。

64～81の指標の満たす性質を考える。これらはすべて、反射性、弱反射性を満たす。64～75，79～80は推移性を満たす。$A\dot{-}B$あるいは$A\dot{+}B$の正規性を仮定していることより、64～65，70～72，79～81は反対称性、弱反対称性を満たし、67～69，73～78は強線形性、弱線形性を満たす。

6．おわりに

不等号関係の意味でファジィ数を順序付ける場合について、考えられる81種類の順序付け指標の相互関係を吟味した。その結果、3.1 の48種類の順序付け指標を用いて他の順序付け指標のほとんどを表現できることが明らかになった。

参考文献

[1] 乾口，久米：Ｇｏｄｅｌ含意を用いた様相測度に基づくファジィ数の順序付け指標．第６回ファジィシステムシンポジウム講演論文集(1990)．

[2] 乾口，久米，市橋：Ｇｏ¨ｄｅｌ含意を用いた可能性と必然性について．計測自動制御学会論文集，Vol.25，No.5 (1989)，592-599.

[3] Dubois, D. and Prade, H.: Ranking Fuzzy Numbers in the Setting of Possibility Theory. Information Sci., Vol.30(1983), 183-224.

[4] 乾口，市橋，田中：様相概念に基づくファジィ選好関係の拡張とその性質．計測自動制御学会論文集，Vol.24，No.7(1988)，738-745.

[5] Zadeh, L.A.: Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility. Fuzzy Sets and Syst., Vol.1(1978), 3-28.

[6] Dubois, D. and Prade, H.: Comment on 'Tolerance Analysis Using Fuzzy Sets' and 'A Procedure for Multiple Aspect Decision Making'. Int. J. Systems Sci., Vol.9, No.3(1978), 357-360.

[7] Freeling, A.S.: Fuzzy Sets and Decision Analysis. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol.SMC-10, No.7 (1980), 341-354.

[8] Dubois, D. and Prade, H.: Twofold Fuzzy Sets: An Approach to the Representation of Sets with Fuzzy Boundaries Based on Possibility and Necessity Measures. 模糊数学，Vol.3，No.4(1983)，53-76.

[9] Baldwin, J.F. and Guild, N.C.F.: Comments on the 'Fuzzy Max' Operator of Dubois and Prade. Int. J. Systems Sci., Vol.10, No.9(1979), 1063-1064.

[10] 田中，和多田，浅居：ファジィ集合による多属性代替案の評価．システムと制御，Vol.27，No.6(1983)，403-409.

[11] Tanaka, H., Ichihashi, H. and Asai, K.: A Formulation of Fuzzy Linear Programming Problem Based on Comparison of Fuzzy Numbers. Control and Cybernetics, Vol.13, No.3(1984), 185-194.

[12] 乾口，市橋，久米：ファジィ数理計画問題の様相的構成．システム制御情報学会論文誌，Vol.2，No.3(1989)，69-79.

[13] 乾口，久米：可能性分布間の相互関係を考慮したファジィ関係の拡張とファジィ線形計画問題への応用．システム制御情報学会論文誌，Vol.3，No.4(1990)，93-102.

[14] 乾口，久米：様相性目標計画問題．J. Oper. Res. Soc. Jpn., Vol.32, No.3(1989), 326-351.

[15] Dubois, D. and Prade, H.: Inverse Operations for Fuzzy Numbers. E. Sanchez, ed., Proc. IFAC Symposium on Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis (1983), Marseille, Pergamon, Oxford, pp.399-404.

[16] Sanchez, E.: Solution of Fuzzy Equations with Extended Operations. Fuzzy Sets and Syst., Vol.12 (1984), 237-248.

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

TC2-3

ファジィ観測からの最尤推定

Maximum Likelihood Estimation from Fuzzy Observations

奥田 徹示　　古殿 幸雄
Tetsuji OKUDA　　Yukio KODONO
前原 啓二　　浅居 喜代治
Keiji MAEHARA　　Kiyoji ASAI
大阪工業大学
OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

【ABSTRACT】 In this paper, new methods are developed for obtaining approximate maximum likelihood estimates of parameters of distribution functions under conditions where the data are fuzzy. The correction factors, usually depending on the width of fuzziness, derived by the method provide reasonably close approximations to the maximum likelihood estimates under fuzzy observations. The sampling variances of these approximations are also obtained and the loss of the amount of information due to fuzziness are discussed.

1．まえがき

ここでは，主観的なあいまいさを伴う観測値を用いる統計的な推測問題について考察する．統計学の分野において，正確な観測ができないかまたはコストの関係で，ある区間に属する事象が何件発生したかというような，いわゆるグルーピングデータに関する分析が古くよりなされてきている．特に，正規分布のような比較的滑らかな分布を念頭においたシェパードの補正は現在でも有名で，十分実用性を持っていると思われる．このシェパードの補正は，1898年のシェパード[1] の論文以来有名になったと思われる．その後，ピアソン[2] やフィッシャー[3] を初め多くの研究者によって1930年代まで多くの分析がなされたが，1943年のケンドール[4] の著書にそれまでの研究成果がまとめられている．それまでの研究では，主としてモーメントやキュムラントの推定問題を取り扱っていたが，その後，リンドレー[5]によってグルーピングデータによる最尤推定に関する研究がなされた．

本稿では，あいまいな観測をファジィ事象として表現して，ファジィ観測を用いる最尤推定法について考察する．すなわち，明確な区間ではなく，ファジィ区間を持つデータとしてファジィデータが得られたとき，これらファジィデータの代表値としてファジィ区間の中心値を用いて，通常の統計的な計算手法を用いることにより最尤推定値を求める方法について考察している．

2．ファジィ観測の形式

いま，母集団の密度関数を$f(x|\theta)$とする．θは母数を意味している．特に，必要のない場合はθを省略する．通常，観測値はある１点 $x_j \in X$ が観測されたものとして，これをデータの値として用いる．ここでは，点 x の周りのある幅 H に主観的なあいまいさが伴っている場合を考える．このようなファジィ観測を区間 $H_j=[x_j-h/2, x_j+h/2]$で定義されるファジィ事象としてとらえる．メンバシップ関数χ_j: $H_j \to [0,1]$ は，$x \in H_j$ のファジィ事象χ_jへの帰属度を表わしており，$\chi_j(x_j)=1$ であるものとする．

さて，このようなファジィ事象として観測値を受け取る場合，ここではこれをファジィ観測値，ないしはファジィデータと呼ぶことにする．このファジィ観測値の出現確率は密度関数f(x)のもとでは，ザデー[6] の定義より，

$$P_j = \int_{-h/2}^{h/2} \chi(v) f(x_j+v)\,dv \qquad (1)$$

と表わされる．ここで，$\chi(v)$は区間$[-h/2, h/2]$で定義されるメンバシップ関数で，$\chi(x)=\chi_j(x-x_j)$と変換している．この確率を，区間 H_jの中心値 x_jをこのファジィ観測値χ_jの代表点とみなし，代表値 x_jの出現確率と考える．これら代表値を用いて統計的処理を施そうとするのがここでの考え方である．本稿では，$x_{j+1}=x_j+h/2$ で，$\Sigma p_j=1$を満たすような次の３種類のメンバシップ関数を考えるもの

とする：

（三角形型）　；$\chi(v)=-2|v|/h+1$,　(2)

（２次曲線型）；$\chi(v)=(8/h^2)(|v|-h/2)^2Q+(1-8v^2/h^2)(1-Q)$,　(3)

（台形型）　；$\chi(v)=\max\{0,1\wedge(-|v|/(2e)+h/(8e)+1/2)\}$.　(4)

ただし，$Q=[2(|v|+h/4)/h]$で，[A]はAの整数部を意味するガウス記号である．また，vおよびeの範囲は$-h/2\leqq v\leqq h/2$ および $0<e\leqq h/4$ である．

そこで，d_rをファジィ事象χのr次の"F－モーメント"とし，

$$d_r=\int_{-h/2}^{h/2}x^r\chi(x)dx \qquad (5)$$

と定義すると，$d_r=O(h^{r+1})$となる．また，$d_0=h/2$となる．なお，$h(<1)$は比較的小さくとり，$O(h^4)$は無視できる程度に小さいものとする．

３．ファジィ観測データに基づく最尤推定

さて，母数がθであることを明記して，ファジィ観測値χ_jの出現確率を$P_j(\theta)\equiv Pr(\chi_j|\theta)$ と表わす．いま，n個の独立なファジィ観測値$\{X^F{}_1=\chi_1,\ldots,X^F{}_n=\chi_n\}$を得たとして，$L_F(\chi|\theta)=Pr(\chi_1|\theta)\cdots Pr(\chi_n|\theta)$を最大にする最尤推定値$\theta_F(n)$を求める問題を考える．そこで，

$$\frac{\partial\log L_F(\chi|\theta)}{\partial\theta}=0 \qquad (6)$$

を解いて$\theta_F(n)$を求めることにする．

まず，Taylor 展開を用いて，

$$P_j(\theta)=d_0f(x_j|\theta)+(d_2/2)f^{(2)}(x_j|\theta)+(d_4/24)f^{(4)}(x_j|\theta)+\cdots \qquad (7)$$

となるので，

$$\log P_j(\theta)=\log d_0+\log f+(1/2)\{f^{(2)}/f\}(d_2/d_0)+(1/24)\{(d_0d_4f^{(4)}f-3d_2^2(f^{(2)})^2)/(d_0^2f^2)\}+\cdots \qquad (8)$$

となる．したがって，

$$q(\theta)=\sum_{j=1}^{n}\left\{\log d_0+\log f+\frac{d_2}{2d_0}\frac{f^{(2)}}{f}\right\}+O(h^4) \qquad (9)$$

として，$\partial q(\theta)/\partial\theta=0$ となる$\theta_F(n)$を求めればよい．

そこで，$L(\theta)=\partial q(\theta)/\partial\theta$とおき，Newton-Raphson 法を用いて$L(\theta)=0$の解を求めることにする．初期近似解$\theta_1$を，ファジィ観測データの代表値$\{x_1,\ldots,x_n\}$による最尤推定値にとると，$\theta_1$は$L(\theta)=0$の解の十分近くに存在すると考えられるので，$L(\theta)=0$の近似解$\theta_0$は

$$\theta_0=\theta_1-\frac{L(\theta_1)}{\partial L(\theta_1)/\partial\theta} \qquad (10)$$

として求められる．したがって，$\theta_0-\theta_1=\Delta$とすると，

$$\Delta=-\frac{d_2}{2d_0}\frac{\sum_{j=1}^{n}\left\{\frac{\partial\{f^{(2)}(x_j|\theta)/f(x_j|\theta)\}}{\partial\theta}\right\}\theta=\theta_1}{\sum_{j=1}^{n}\left\{\frac{\partial^2\log f(x_j|\theta)}{\partial\theta^2}\right\}\theta=\theta_1}+O(h^4) \qquad (11)$$

となり，

$$\theta_F(n)\fallingdotseq\theta_1+\Delta \qquad (12)$$

となる．

すなわち，ファジィ観測データ$\{X^F{}_1=\chi_1,\ldots,X^F{}_n=\chi_n\}$を得たとき，その代表値$\{x_1,\ldots,x_n\}$に基づいて通常の方法で最尤推定値を求め，得られた値に補正量Δを加えれば，ファジィ観測データに基づく最尤推定値が求められることになる．通常，$O(h^4)$は微少な値になるであろうから，これを省略しても実用上は差し支えない．

なお，あいまいさの幅hを標準偏差σとの比で考えたい場合は，

$$\left.\begin{aligned}&x/\sigma=u,\ f(\sigma u)|dx/du|=g(u),\\&\chi_j(\sigma u)=\nu_j(u),\ h/\sigma=\alpha\end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

と変換しておけば，hをαに置き換えて，いままでの議論がそのまま当てはまり，$O(h^4)$は$O(\alpha^4)$で評価できる．

[例１]

正規分布 $N(\mu,\ \sigma^2)$ の場合，$\theta=\sigma^2$ として，分散の最尤推定値を求める．

$$\frac{f^{(2)}}{f}=\frac{(x-\mu)^2}{\theta^2}-\frac{1}{\theta} \qquad (14)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial\theta^2}(\log f)=\frac{1}{2\theta^2}-\frac{(x-\mu)^2}{\theta^3} \qquad (15)$$

となるので，

$$\Delta=-\frac{d_2}{2d_0}\frac{\sum_{j=1}^{n}\left\{\frac{1}{\theta_1{}^2}-\frac{2(x_j-\mu)^2}{\theta_1{}^3}\right\}}{\sum_{j=1}^{n}\left\{\frac{1}{2\theta_1{}^2}-\frac{(x_j-\mu)^2}{\theta_1{}^3}\right\}}+O(h^4)$$

$$=-\frac{2d_2}{h}+O(h^4) \qquad (16)$$

となる．すなわち，$O(h^4)$を省略して，

$$\theta_F(n)\fallingdotseq\theta_1-(2d_2/h) \qquad (17)$$

となる．また，$\theta=\mu$として，平均値を推定する場合，

$$\Delta=0+O(h^4) \qquad (18)$$

となる．これらはデータ数nとは無関係になり，モーメント法に基づくファジィ推定法の結果[7]と一致する．

４．複数の母数が存在する場合

本節では，２つの母数が存在する場合について考察する．一般にn個の母数が存在する場合も，同様の議論となる．

いま，母数θ，ϕが存在するとして，

$$q(\theta,\phi)=\sum_{j=1}^{n}\left\{\log d_0+\log f(x_j|\theta,\phi)+\frac{d_2}{2d_0}\frac{f^{(2)}(x_j|\theta,\phi)}{f(x_j|\theta,\phi)}\right\}+O(h^4) \quad (19)$$

を最大にする$\theta_F(n)$と$\phi_F(n)$とを求めればよい．

そこで，

$$L_1(\theta,\phi)=\sum_{j=1}^{n}\left\{\frac{\partial \log f}{\partial\theta}+\frac{d_2}{2d_0}\frac{\partial(f^{(2)}/f)}{\partial\theta}\right\}+O(h^4), \quad (20)$$

$$L_2(\theta,\phi)=\sum_{j=1}^{n}\left\{\frac{\partial \log f}{\partial\phi}+\frac{d_2}{2d_0}\frac{\partial(f^{(2)}/f)}{\partial\phi}\right\}+O(h^4) \quad (21)$$

とおく．3節と同様，$L_1(\theta,\phi)=0$および$L_2(\theta,\phi)=0$を満たす解を，初期近似解θ_1，ϕ_1をファジィ観測データの代表値$\{x_1,\ldots,x_n\}$による最尤推定値にとり，Newton-Raphson法を用いて近似解θ_0，ϕ_0を求める．したがって，

$$\theta_0-\theta_1=\Delta\theta,\quad \phi_0-\phi_1=\Delta\phi \quad (22)$$

とすると，$(\theta,\phi)=(\theta_1,\phi_1)$として，

$$\left.\begin{aligned}\Delta\theta\frac{\partial L_1(\theta,\phi)}{\partial\theta}+\Delta\phi\frac{\partial L_1(\theta,\phi)}{\partial\phi}&=-L_1(\theta,\phi)\\ \Delta\theta\frac{\partial L_2(\theta,\phi)}{\partial\theta}+\Delta\phi\frac{\partial L_2(\theta,\phi)}{\partial\phi}&=-L_2(\theta,\phi)\end{aligned}\right\} \quad (23)$$

から$\Delta\theta$，$\Delta\phi$が求められる．

ところで，式(20)より，

$$L_1(\theta_1,\phi_1)=\frac{d_2}{2d_0}\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial}{\partial\theta}\left\{\frac{f^{(2)}}{f}\right\}_{\theta_1,\phi_1}+O(h^4), \quad (24)$$

$$\frac{\partial L_1(\theta_1,\phi_1)}{\partial\theta}=\sum_{j=1}^{n}\left\{\frac{\partial^2\log f}{\partial\theta^2}\right\}_{\theta_1,\phi_1}+O(h^2), \quad (25)$$

$$\frac{\partial L_1(\theta_1,\phi_1)}{\partial\phi}=\sum_{j=1}^{n}\left\{\frac{\partial^2\log f}{\partial\theta\,\partial\phi}\right\}_{\theta_1,\phi_1}+O(h^2) \quad (26)$$

となる．$L_2(\theta_1,\phi_1)$についても同じである．したがって，$O(h^4)$の項を無視して$\Delta\theta$，$\Delta\phi$を求めようとすれば，

$$\left.\begin{aligned}&\Delta\theta\sum_{j=1}^{n}\left\{\frac{\partial^2\log f}{\partial\theta^2}\right\}_{\theta_1,\phi_1}+\Delta\phi\sum_{j=1}^{n}\left\{\frac{\partial^2\log f}{\partial\theta\,\partial\phi}\right\}_{\theta_1,\phi_1}=-\frac{d_2}{2d_0}\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial}{\partial\theta}\left\{\frac{f^{(2)}}{f}\right\}_{\theta_1,\phi_1}\\ &\Delta\theta\sum_{j=1}^{n}\left\{\frac{\partial^2\log f}{\partial\phi\,\partial\theta}\right\}_{\theta_1,\phi_1}+\Delta\phi\sum_{j=1}^{n}\left\{\frac{\partial^2\log f}{\partial\phi^2}\right\}_{\theta_1,\phi_1}=-\frac{d_2}{2d_0}\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial}{\partial\phi}\left\{\frac{f^{(2)}}{f}\right\}_{\theta_1,\phi_1}\end{aligned}\right\} \quad (27)$$

を解けばよいことになる．

［例2］

正規分布$N(\mu,\sigma^2)$の場合，$\theta=\mu$，$\phi=\sigma^2$として，平均と分散の最尤推定値を求める．式(27)より，

$$\left.\begin{aligned}-\Delta\theta\frac{n}{\phi_1}+\Delta\phi\sum_{j=1}^{n}\frac{\theta_1-x_j}{\phi_1^2}&=-\frac{d_2}{2d_0}\sum_{j=1}^{n}\left\{\frac{2(\theta_1-x_j)}{\phi_1^2}\right\},\\ \Delta\theta\sum_{j=1}^{n}\frac{\theta_1-x_j}{\phi_1^2}+\Delta\phi\left\{\frac{1}{2\phi_1^2}-\frac{(x_j-\theta_1)^2}{\phi_1^3}\right\}&=-\frac{d_2}{2d_0}\sum_{j=1}^{n}\left\{\frac{1}{\phi_1^2}-\frac{2(x_j-\theta_1)^2}{\phi_1^3}\right\}\end{aligned}\right\} \quad (28)$$

を解いて，

$$\theta_F(n)\fallingdotseq\theta_1,\qquad \phi_F(n)\fallingdotseq\phi_1-(2d_2/h) \quad (29)$$

となる．

5．情報量の損失

一般に，サイズnの標本$(X_1,X_2,\cdots,X_n)$をとるものとして（Xは通常の確率変数），そのときの最尤推定量を$\theta^*(n)$とする．このとき，$\sqrt{n}(\theta^*(n)-\theta)$の分布はnとともに正規分布$N(0,1/I(\theta))$に近づいて行くことが知られている．ここで，$I(\theta)$はフィッシャー情報量で

$$I(\theta)=-\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\frac{\partial^2\log f(x|\theta)}{\partial\theta^2}\right\}f(x|\theta)dx \quad (30)$$

と定義される．つまり，$\theta^*(n)$は平均がθで，その分散が$1/\{n\,I(\theta)\}$の正規分布に近づいて行く．

一方，$\theta(n)$を不偏推定量とすると，不等式

$$\mathrm{Var}(\theta(n))\geqq\{n\,I(\theta)\}^{-1} \quad (31)$$

の成立することが知られている．これはCramér-Raoの不等式で，一般的にどのような不偏推定量を持ってきても，その分散の値を$\{n\,I(\theta)\}^{-1}$よりも小さくできないこと示している．したがって，nを大きくして行けば，最尤推定量は真の母数の値を誤って推定する場合を標準偏差の観点から最小にできる．

すなわち，最尤推定量は漸近的に有効な推定量である．そこで，必ずしも漸近的に有効とは限らない推定量θ'があり，$\sqrt{n}(\theta'-\theta)$の分布が正規分布$N(0,\sigma^2(\theta))$に近づくとき，分散の比をとって，

$$\mathrm{eff}(\theta')=\{\sigma^2(\theta)\,I(\theta)\}^{-1}\leqq 1 \quad (32)$$

で定義される(漸近)効率が，推定量θ'の良さを測る尺度としてよく用いられている．したがって，本論文の場合，ファジィデータを用いて最尤推定を行っているので，その場合のフィッシャー情報量を求めれば効率が計算できることになる．

そこで，ファジィデータを用いる場合のフィッシャー情

報量を求める．まず，式 (7) および (8) より，

$$\frac{\partial^2 \log P_j(\theta)}{\partial \theta^2}=\frac{\partial^2 \log f}{\partial \theta^2}+\frac{d_2}{2d_0}\frac{\partial^2}{\partial \theta^2}\left\{\frac{f^{(2)}}{f}\right\}+0(h^4), \tag{33}$$

$$P_j(\theta)\left\{\frac{\partial^2 \log P_j(\theta)}{\partial \theta^2}\right\}=d_0\left\{\frac{\partial^2 \log f}{\partial \theta^2}\right\}f+\frac{d_2}{2}\left\{\frac{\partial^2 \log f}{\partial \theta^2}f^{(2)}+\frac{\partial^2}{\partial \theta^2}\left[\frac{f^{(2)}}{f}\right]f\right\}+\frac{d_2^2}{4d_0}\frac{\partial^2}{\partial \theta^2}\left\{\frac{f^{(2)}}{f}\right\}f^{(2)}+0(h^4) \tag{34}$$

となるので，Euler-MacLaurin の和分公式を使って，フィッシャー情報量$I_F(\theta)$は

$$\begin{aligned}I_F(\theta)&=-\sum_{j=-\infty}^{\infty}\frac{h}{2}\left\{\frac{\partial^2 \log f(x_j|\theta)}{\partial \theta^2}\right\}f(x_j|\theta)-\sum_{j=-\infty}^{\infty}\frac{hd_2}{4d_0}\left\{\frac{\partial^2 \log f(x_j|\theta)}{\partial \theta^2}f^{(2)}(x_j|\theta)+\frac{\partial^2}{\partial \theta^2}\left[\frac{f^{(2)}(x_j|\theta)}{f(x_j|\theta)}\right]f(x_j|\theta)\right\}+0(h^4)\\&=-\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\frac{\partial^2 \log f}{\partial \theta^2}\right\}f\,dx-\frac{d_2}{2d_0}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\frac{\partial^2 \log f}{\partial \theta^2}f^{(2)}+\frac{\partial^2}{\partial \theta^2}\left[\frac{f^{(2)}}{f}\right]f\right\}dx+0(h^4)\end{aligned} \tag{35}$$

となる．したがって，θ_Fの効率は

$$\begin{aligned}\mathrm{eff}(\theta_F)&=\lim_{n\to\infty}\frac{\mathrm{Var}(\theta^*(n))}{\mathrm{Var}(\theta_F(n))}\\&=1+\frac{\frac{d_2}{2d_0}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\frac{\partial^2 \log f}{\partial \theta^2}\frac{f^{(2)}}{f}+\frac{\partial^2}{\partial \theta^2}\left[\frac{f^{(2)}}{f}\right]\right\}f\,dx}{\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\frac{\partial^2 \log f}{\partial \theta^2}\right\}f\,dx}+0(h^4)\end{aligned} \tag{36}$$

となる．明らかに，上式 (36) において，効率の低下分はフィッシャー情報量の損失比率と同等である．

[例3]

正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ の場合，

$$\mathrm{eff}(\mu_F)=1-(d_2/\sigma^2)/d_0+0(h^4), \tag{37}$$

$$\mathrm{eff}(\sigma^2{}_F)=1-(2d_2/\sigma^2)/d_0+0(h^4) \tag{38}$$

となる．

たとえば，三角形型のファジィ観測で計算すると，

$$\mathrm{eff}(\mu_F)=1-\alpha^2/24+0(\alpha^4), \tag{39}$$

$$\mathrm{eff}(\sigma^2{}_F)=1-\alpha^2/12+0(\alpha^4) \tag{40}$$

となる．ただし，$\alpha=h/\sigma$ である．したがって，$\alpha=0.5$ とすると，効率の低下は約1～2%となる．

6．むすび

本論文では，ファジィ観測データを用いて最尤推定を行う方法について考察した．すなわち，ファジィ観測データの代表値を用いて通常の最尤推定値を求め，これに補正量を加えれば，ファジィ観測データに基づく最尤推定値が求められることを示した．

例3に示したように，ファジィ観測のあいまいさの幅hを標準偏差σの半分にとったとき，正規母集団のもとでは効率の低下は約1～2%である．つまり，平均や分散を推定する場合，観測がファジィであるために失われる情報量の損失比率（通常の観測に比べて）は，データ1個当り約1～2%程度である．このことは，もし我々が100個のファジィ観測値からなる標本を手にしたとき，ここでの取り扱い方をするような場合，約98～99個の正確な観測値からなる標本を手にしたことと同等になる．したがって，情報量の損失はわずかであるので，標本サイズnと無関係な補正を施すことには意味があると考えられる．

最後に，本研究を進めるに当たりご助言を頂いた本学の杉浦寅彦教授に深甚なる謝意を表する．また，本研究に対して文部省科学研究費一般研究C(63580030)の補助を受けた．ここに記して謝意を表する．

参考文献

1. Sheppard, W.H., On the Calculation of the most Probable Values of Freqency-Constants·····, Proc. Lon. Math. Soc., 29, 358, 1898.
2. Peason, K. et.al., On Corrections for the Moment-Coefficients·····, Biometrika, 12, 231, 1919.
3. Fisher, R. A.,On the Mathmatical Fundations of Theoretical Statistics, Phil. Tran. Roy. Soc.,A, 222, 309, 1921.
4. Kendall, M. G. and A. Stuart,The Advanced Theory of Statistics, Vol.1, C.Grif., London, 1943.
5. Lindley, D. V., Grouping Corrections and Maximum Likelihood Equations, Proc. Camb. Phil. Soc., 46, 106, 1950.
6. Zadeh, L. A., Probability Measures of Fuzzy Events, J. Math. Anal.Appl., 28, 421, 1968.
7. 奥田，古殿，浅居，ファジィ観測データに基づく統計的推定，計測自動制御学会論文集，26，564，1990.

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

TC3-1

Choquet積分で表される多属性効用関数

Multiattribute utility functions represented by the Choquet integral

室伏 俊明　　菅野 道夫
Toshiaki MUROFUSHI　Michio SUGENO
東京工業大学　システム科学専攻
Tokyo Institute of Technology, Dept. of Systems Science

Abstract: This paper discusses some properties of the Choquet-integral-type multiattribute utility function (C-utility function for short) $u(x)=(C)\int u_i(x_i)\,d\mu(i)$ defined on $X=\Pi_{i=1}^{n}X_i$; e.g. $X_1, X_2, \cdots, X_n$ are not always mutually preferentially independent. A characterizing theorem of the normal C-utility functions for $n\leqq 3$ is shown.
keywords: fuzzy measure, Choquet integral, multiattribute utility function, preference relation.

1. はじめに

ファジィ測度とChoquet積分を用いた，多属性の対象に関する主観的評価のモデルが提案，応用されてきており，良い結果を得ている[1,2]．ファジィ測度は加法性をもたない集合関数であるため，評価対象の選好に関する属性間の相互作用を表現でき，このことがこのモデルを優れたものにしていると考えられる．

一方，人間による評価を定量的にモデル化する理論として既に効用理論があり，意思決定問題の解決に大きく役立っている（例えば[3]）．この理論では，評価対象間の選好関係の質的構造（選好独立性，加法独立性，効用独立性など）と，評価を量的に与える関数（効用関数または価値関数）の型（加法形，乗法形など）との関係が，基本的なものについては解明されており，効用関数の同定アルゴリズムもこの関係を利用して作られている．

本論文では，ファジィ測度・Choquet積分モデルを効用関数と見なし，選好の質的構造との関係を調べる．

2. 準備

2.1. ファジィ測度とChoquet積分[4,5]

[定義2.1.1] Θを空でない集合，$\mathcal{S}$をΘの部分集合からなる族で，$\emptyset, \Theta\in\mathcal{S}$ なるものとする．このとき，

$$\mu(\emptyset)=0, \tag{1}$$

$$A,B\in\mathcal{S},\ A\subset B \Rightarrow \mu(A)\leqq\mu(B), \tag{2}$$

を満足する関数$\mu:\mathcal{S}\to[0,\infty)$を$(\Theta,\mathcal{S})$上のファジィ測度という．特に$\mu(\Theta)=1$であれば正規ファジィ測度という．$\mu$が$(\Theta,\mathcal{S})$上のファジィ測度のとき，三つ組$(\Theta,\mathcal{S},\mu)$をファジィ測度空間という．なお，$\mathcal{S}$の要素を可測集合という．

以下，$(\Theta,\mathcal{S},\mu)$をファジィ測度空間とする．

[定義2.1.2] 関数$f:\Theta\to\boldsymbol{R}$が可測であるとは，

$$\{\theta\in\Theta\mid f(\theta)\geqq\alpha\}\in\mathcal{S}\quad\forall\alpha\in\boldsymbol{R} \tag{3}$$

であることをいう．なお，$\boldsymbol{R}$は実数軸を表す．

[定義2.1.3] 可測関数$f:\Theta\to\boldsymbol{R}$の$\mu$に関するChoquet積分は次式で定義される：

$$(C)\int f\,d\mu \triangleq \int_{-\infty}^{\infty}\alpha\,dF(\alpha). \tag{4}$$

右辺はStieltjes積分であり，Fは次式で与えられる：

$$F(\alpha)\triangleq\mu(\{\theta\in\Theta\mid f(\theta)\geqq\alpha\})\quad\forall\alpha\in\boldsymbol{R}. \tag{5}$$

[命題2.1.4] 可測単関数

$$f=\sum_{j=1}^{n}a_j 1_{D_j} \tag{6}$$

$(-\infty<a_1\leqq\cdots\leqq a_n<\infty,\ \cup_{j=1}^{n}D_j=\Theta,\ D_j\cap D_k=\emptyset$ for $j\neq k$, 1_Dは集合Dの定義関数を表す$)$ のChoquet積分は次式で表される：

$$(C)\int f\,d\mu=\sum_{j=1}^{n}a_j[\mu(A_j)-\mu(A_{j+1})]. \tag{7}$$

ただし，$A_j\triangleq\cup_{k=j}^{n}D_k$，$A_{n+1}\triangleq\emptyset$ である．

Choquet積分の主な性質をあげておく．

[命題2.1.5]

・$f\leqq g\Rightarrow(C)\int f\,d\mu\leqq(C)\int g\,d\mu.$ (8)

・$(C)\int(af+b)\,d\mu=a\cdot(C)\int f\,d\mu+b\mu(\Theta)$

$\forall a\geqq 0,\ \forall b\in\boldsymbol{R}.$ (9)

・$(C)\int f\,d(a\mu)=a\cdot(C)\int f\,d\mu\quad\forall a\geqq 0.$ (10)

・μが通常の測度ならば，

$$(C)\int f\,d\mu=\int f\,d\mu. \tag{11}$$

上式の右辺は通常のLebesgue積分である．

[定義2.1.6] $N\subset\Theta$が（μに関する）零集合であるとは，

$$A,B\in\mathcal{S},\ A\triangle B\subset N\Rightarrow\mu(A)=\mu(B) \tag{12}$$

であることをいう．

一点集合$\{i\}$が零集合であるための必要十分条件は，

$$A,A\cup\{i\}\in\mathcal{S}\Rightarrow\mu(A)=\mu(A\cup\{i\}) \tag{13}$$

である．

[定理2.1.1] Nが零集合，f,gが$f(\theta)=g(\theta)\ \forall\theta\in N^c$ （N^cはNの補集合）なる可測関数ならば，

$$(C)\int f\,d\mu=(C)\int g\,d\mu. \tag{14}$$

2.2. 選好関係と効用関数[3]

以下，Xは空でない集合とする．

[定義2.2.1] X上の2項関係$\precsim$を選好関係と呼ぶ．強選好$\prec$，無差別$\sim$は，それぞれ

$$x\prec y \iff x\precsim y \text{ and not } y\precsim x,$$

$$x\sim y \iff x\precsim y \text{ and } y\precsim x,$$

で定義される．$x\precsim y$のとき，yはxより選好されるといい，$x\prec y$のときyはxより強選好されるという．また，$x\sim y$のときxとyは無差別であるという．

$X=\Pi_{i=1}^{n}X_i$ $(=X_1\times X_2\times\cdots\times X_n)$ 上に選好関係があるとき，各X_iまたは添字iを属性と呼ぶ．

Xは意思決定者の行動の結果の集合であり，$x\precsim y$は

意思決定者にとって結果yが結果xと同等か，より望ましいことを意味する．

[**定義**2.2.2] X上の2項関係$\lesssim$が**弱順序**であるとは，次の2条件を満たすことをいう：
比較可能性： $x\lesssim y$ または $y\lesssim x$,
推移性： $x\lesssim y$ かつ $y\lesssim z \Rightarrow x\lesssim z$.

以下，選好関係$\lesssim$は弱順序であると仮定する．

$X=\Pi_{i=1}^{n}X_i$ のとき，$I\triangleq\{1,2,\cdots,n\}$ とおき，任意の$J(\neq\emptyset)\subset I$ に対して $X_J\triangleq\Pi_{i\in J}X_i$ と書く．$X_{\{i\}}=X_i$ でもあるので，簡単のため，$\{i\}$, $\{i\}^c$をそれぞれi, i^cと表す．
また，集合の直積 $(S\times T)\times U$, $S\times(T\times U)$, $(U\times S)\times T$, …などをすべて同一視する．よって例えば$X=\Pi_{i=1}^{n}X_i$のとき，任意の$J(\neq\emptyset)\subsetneq I$ に対して，$X=X_J\times X_{J^c}$ である．
$x=(x_1,\ldots,x_n)\in X$のX_Jへの射影をx_Jと書く．集合と同様に点についても $x=(x_J,x_{J^c})$ などと表す．$J\cup K\cup L=I$, $J\cap K=K\cap L=L\cap J=\emptyset$ のときも $x=(x_J,x_K,x_L)$ などと書く．$J=\emptyset$や$K=\emptyset$などの場合もこの表記法を用いることにする．たとえば，$x,y,z\in X$に対し，$K=\emptyset$のとき $(x_J,y_K,z_L)=(x_J,z_L)$ である．また，(x_J,y_K,z_L)と書くときには，特に断らなくても$J\cup K\cup L=I$, $J\cap K=K\cap L=L\cap J=\emptyset$ が仮定されているものとする．

[**定義**2.2.3] $\lesssim$を$X=\Pi_{i=1}^{n}X_i$上の選好関係とする．属性iが**本質的**であるとは，$(x_i,x_{ic})<(x'_i,x_{ic})$ であるような$x_i,x'_i\in X_i$, $x_{ic}\in X_{ic}$ が存在することをいう．本質的でない属性は，**非本質的**であるという．

[**定義**2.2.4] $\lesssim$を$X=\Pi_{i=1}^{n}X_i$上の選好関係とする．$J(\neq\emptyset)\subsetneq I$ がJ^cに（またはX_JがX_{J^c}に）**選好独立**であるとは，任意の$x_J,x'_J\in X_J$に対して，
$(x_J,x_{J^c})\lesssim(x'_J,x_{J^c})$ for some $x_{J^c}\in X_{J^c}$
$\Rightarrow$ $(x_J,x_{J^c})\lesssim(x'_J,x_{J^c})$ for all $x_{J^c}\in X_{J^c}$
であることをいう．また，任意の$J(\neq\emptyset)\subsetneq I$ に対してJがJ^cに選好独立ならば，I（または $X_1,X_2,\cdots,X_n$）は**相互選好独立**であるという．

集合Xの部分集合からなるσ-代数$\mathcal{X}$を一つ固定する．ただし，一点集合はすべて可測であるとする；$\{x\}\in\mathcal{X}$ $\forall x\in X$. 可測空間$(X,\mathcal{X})$上の確率測度の全体を$\tilde{X}$と書き，可測関数$f:X\to\boldsymbol{R}$の$p\in\tilde{X}$に関する期待値を$E(f;p)$と書く．任意の$x\in X$に対して，$p(\{x\})=1$なる$p\in\tilde{X}$をxと同一視し，xで表す．$p(\{x\})=p(\{y\})=1/2$ なる$p\in\tilde{X}$を$\langle x,y\rangle$で表す．
$X=\Pi_{i=1}^{n}X_i$の場合の可測空間は，一点集合が可測である可測空間$(X_i,\mathcal{X}_i)$の直積として考える．$p_J\in\tilde{X}_J$, $q_{J^c}\in\tilde{X}_{J^c}$の直積測度を $(p_J,q_{J^c})\in\tilde{X}$ で表す．

[**定義**2.2.5] $\lesssim$を$\tilde{X}$上の選好関係とするとき，
$$p\lesssim q \Leftrightarrow E(u;p)\le E(u;q)\quad\forall p,q\in\tilde{X} \tag{15}$$
なる関数$u:X\to\boldsymbol{R}$を(**基数**)**効用関数**という．

[**定義**2.2.6] $X=\Pi_{i=1}^{n}X_i$上の効用関数uが
$$u(x)=\sum_{i=1}^{n}k_iu_i(x_i)\quad\forall x\in X \tag{16}$$
（u_iはX_i上の実数値関数，k_iは非負の定数）
と表されるとき，uは**加法形**であるという．

3. Choquet積分型多属性効用関数

以下，命題と定理の証明はすべて付録にまわす．本論文を通して $X=\Pi_{i=1}^{n}X_i$, $I\triangleq\{1,2,\ldots,n\}$ とおく．

[**定義**3.1] X上の効用関数$u:X\to\boldsymbol{R}$が**Choquet積分型**であるとは，各iに対して関数$u_i:X_i\to[0,\infty)$があり，さらに族$\mathcal{J}$上のファジィ測度μが存在して，任意の$x=(x_1,x_2,\ldots,x_n)\in X$に対して
$$u(x)=(C)\int_I u_i(x_i)\,d\mu(i) \tag{17}$$
が成り立つことをいう．ここで，右辺の$u_i(x_i)$をI上の関数$i\mapsto u_i(x_i)$と見なしていることに注意されたい．$\mathcal{J}$はすべての$x\in X$について関数$i\mapsto u_i(x_i)$を可測にする最小の部分集合族である：
$$\mathcal{J}=\{\{i\in I\mid u_i(x_i)\ge\alpha\}\mid\alpha\in\boldsymbol{R},x\in X\}.$$

μが通常の測度ならば，Choquet積分型効用関数uは加法形（(2.2.2)式；$k_i=\mu(\{i\})$ $\forall i$）になる．
以下，本節ではChoquet積分型効用関数uをもつ選好関係$\lesssim$の性質を調べる．最初に，属性の本質性とファジィ測度に関する零集合との関係を見る．

[**命題**3.2]
属性iが非本質的 $\Leftrightarrow$ $\begin{cases} u_i(x_i)=\text{const.}\ \forall x_i\in X_i \\ \text{または} \\ \{i\}\text{は零集合.}\end{cases}$

後に示すように一般に選好独立性はないが，単一属性iはつねにi^cに対する弱い選好独立性をもつ．

[**定義**3.3] $\lesssim$を$X=\Pi_{i=1}^{n}X_i$上の選好関係とする．$J(\neq\emptyset)\subsetneq I$ がJ^cに（またはX_JがX_{J^c}に）**弱選好独立**であるとは，任意の$x_J,x'_J\in X_J$に対して，
$(x_J,x_{J^c})<(x'_J,x_{J^c})$ for some $x_J\in X_{J^c}$
$\Rightarrow$ $(x_J,x_{J^c})\lesssim(x'_J,x_{J^c})$ for all $x_J\in X_{J^c}$
であることをいう．

[**命題**3.4] 各属性iは，i^cに弱選好独立である．

選好独立ならば弱選好独立だが，その逆はいえない．
iのi^cに対する選好独立性とファジィ測度の関係について以下のことがいえる．

[**命題**3.5] $\mu(J)<\mu(J\cup\{i\})$ for $J,J\cup\{i\}\in\mathcal{J}$
$\Rightarrow$ iはi^cに選好独立．

[**命題**3.6] 属性iが本質的で，u_iの値域$u_i(X_i)$が実数区間のとき，
iがi^cに選好独立 $\Rightarrow$
$\mu(J)<\mu(J\cup\{i\})$ for $J,J\cup\{i\}\in\mathcal{J}$.

次に，属性の集合$J\subset I$に関する選好独立性を見る．Jが一点集合でないなら，一般にJはJ^cに弱選好独立でない．したがって，選好独立でもない．次のものは弱選好独立性の反例である．

反例. $J=K\cup L$, $K\cap L=\emptyset$, $K\neq\emptyset$, $L\neq\emptyset$, $M\subset J^c$, $M\neq\emptyset$, $H=(J\cup M)^c$ とする．ファジィ測度μは一般に加法性をもたず，単調性だけしかもたないので，$\mu(K)<\mu(L)$, $\mu(K\cup M)>\mu(L\cup M)$ と仮定できる．また，$a<b$なる$a,b\in\boldsymbol{R}$と，$x,y\in X$があって，$u_i(x_i)=a$, $u_i(y_i)=b$ $\forall i\in I$ と仮定する．
このとき，
$$\begin{aligned}u(y_K,x_L,x_M,x_H)&=a\mu(I)+(b-a)\mu(K)\\&<a\mu(I)+(b-a)\mu(L)\\&=u(x_K,y_L,x_M,x_H),\\u(y_K,x_L,y_M,x_H)&=a\mu(I)+(b-a)\mu(K\cup M)\\&>a\mu(I)+(b-a)\mu(L\cup M)\\&=u(x_K,y_L,y_M,x_H)\end{aligned}$$
となるので，
$(y_K,x_L,x_M,x_H)<(x_K,y_L,x_M,x_H)$,
$(y_K,x_L,y_M,x_H)>(x_K,y_L,y_M,x_H)$.
したがって，JはJ^cに弱選好独立でない．□

[**定義**3.7] $(\Theta,\mathcal{J})$上のファジィ測度μが**相互作用をもたない**とは，Θの部分集合からなるBoole代数で$\mathcal{J}$を含

むものの$\mathcal{T}$と，$\mathcal{T}$上の有限加法的集合関数でμの拡張になっているものνが存在すること，すなわち，
$\exists\mathcal{T}(\subset 2^{\Theta})$:Boole代数，$\exists\nu:\mathcal{T}\to\boldsymbol{R}$ s.t.
$A,B\in\mathcal{T}, A\cap B=\emptyset \Rightarrow \nu(A\cup B)=\nu(A)+\nu(B)$,
$\mathcal{A}\subset\mathcal{T}$, $\nu(A)=\mu(A)\ \forall A\in\mathcal{A}$
となることをいう．（2^{Θ}はΘのべき集合）

通常の測度は，それ自体Boole代数上の有限加法的集合関数なので，相互作用をもたない．また，μが相互作用をもたなければ，加法的である：

$$A,B,A\cup B\in\mathcal{A},A\cap B=\emptyset \Rightarrow \mu(A\cup B)=\mu(A)+\mu(B). \quad (18)$$

我々がいま対象にしている$(I,\mathcal{A},\mu)$の場合，Iは有限集合なので，μが相互作用をもたないならば，μは2^I上の測度に拡張でき，したがってuは加法形となる．加法形は相互選好独立なので[3]，次の命題が成立する．

[**命題3.9**] μが相互作用をもたなければ，Iは相互選好独立である．

上の反例と命題からわかるように，一般にIが相互選好独立でないのはファジィ測度の非加法性のためである．言い換えると，ファジィ測度の非加法性によって選好に関する属性間の相互作用が表現されるのである．

なお，各属性iはi^cに弱選好独立なので（命題3.4），一般に相互選好独立でないというChoquet積分型の特徴は$|I|\geqq 3$（$n\geqq 3$）のときに現れる．

4. Choquet積分型効用関数の特徴化

一般のChoquet積分型効用関数を選好の質的構造によって特徴づけることは困難なので，本論文では$I=\{1,2,3\}$の場合について，以下で定義する正規Choquet積分型効用関数の特徴化を行う．なお，本節の結果は$I=\{1,2\}$の場合にも成立する．以下，次の仮定をおく：

・$X=X_1\times X_2\times X_3$, $X_i(\subset\boldsymbol{R})$：実数区間 $\forall i\in I$,
・$\exists\mathbb{0}=(\mathbb{0}_1,\mathbb{0}_2,\mathbb{0}_3)$, $\exists\mathbb{1}=(\mathbb{1}_1,\mathbb{1}_2,\mathbb{1}_3)\in X$,
$\forall x\in X\quad \mathbb{0}\leqslant x\leqslant\mathbb{1}$,
・どの属性iも本質的である．

[**定義4.1**] (17)式で表されるX上のChoquet積分型効用関数uは，μが狭義単調増加，すなわち

$$J\subsetneq K \Rightarrow \mu(J)<\mu(K) \quad (19)$$

なる正規ファジィ測度で，

$$u_i(\mathbb{0}_i)=0,\ u_i(\mathbb{1}_i)=1 \quad \forall i\in I \quad (20)$$

のとき，**正規**であるという．

[**定義4.2**] 置換$\pi:I\to I$に対して，
$\langle(x_{\pi(1)},x_{\pi(2)},x_{\pi(3)}),(\mathbb{0}_{\pi(1)},\mathbb{1}_{\pi(2)},\mathbb{1}_{\pi(3)})\rangle$
$\sim\langle(x_{\pi(1)},\mathbb{1}_{\pi(2)},\mathbb{1}_{\pi(3)}),(\mathbb{0}_{\pi(1)},x_{\pi(2)},x_{\pi(3)})\rangle$,
$\langle(\mathbb{0}_{\pi(1)},x_{\pi(2)},x_{\pi(3)}),(\mathbb{0}_{\pi(1)},\mathbb{0}_{\pi(2)},\mathbb{1}_{\pi(3)})\rangle$
$\sim\langle(\mathbb{0}_{\pi(1)},x_{\pi(2)},\mathbb{1}_{\pi(3)}),(\mathbb{0}_{\pi(1)},\mathbb{0}_{\pi(2)},x_{\pi(3)})\rangle$
が成り立つとき，$x\leftarrow\pi$と書く．任意の$x\in X$に対してある置換πが存在して$x\leftarrow\pi$となるとき，Iは**順列的加法独立**であるという．

[**定義4.3**] 属性iがi^cに**端点効用独立**であるとは，
$x_j=\mathbb{0}_j$ or $\mathbb{1}_j$, $y_j=\mathbb{0}_j$ or $\mathbb{1}_j$ for $j\neq i$ のとき，
$(p_i,x_{ic})\lesssim(q_i,x_{ic}) \Leftrightarrow (p_i,y_{ic})\lesssim(q_i,y_{ic})$
$\forall p_i,q_i\in X_i$ (21)
となることをいう．

[**定理4.4**] X上に連続な効用関数uが存在し，$u(\mathbb{0})=0$, $u(\mathbb{1})=1$ であるとする．uが正規Choquet積分型であるための必要十分条件は，すべての属性iがi^cに選好独立かつ端点効用独立であり，属性の集合Iが順列的加法独立であることである．

5. おわりに

本論文では，ファジィ測度・Choquet積分モデルを効用関数と見なし，選好の質的構造との関係を調べた．

Choquet積分型効用関数の場合，属性間に選好に関する相互作用があり，一般に相互選好独立性をもたない．これはファジィ測度の非加法性のためである．

また，2属性，3属性の場合について，Choquet積分型効用関数の選好関係による特徴化を試みた．

今後の課題としては，特徴化定理のn属性の場合への拡張，効用関数同定の実用的な対話式アルゴリズムを開発するための特徴化条件の簡素化などがあげられよう．

引用文献

[1] 田中，菅野，カラー印刷画像の主観評価について，*第4回ファジィシステムシンポジウム講演論文集* (1988) 229-234.

[2] 森，室伏，ファジィ測度・Choquet積分を用いた評価モデルの解析，*第5回ファジィシステムシンポジウム講演論文集* (1989) 207-212.

[3] 市川編，*多目的決定の理論と方法*，計測自動制御学会，1980.

[4] T. Murofushi and M. Sugeno, An interpretation of fuzzy measures and the Choquet integral as an integral with respect to a fuzzy measure, *Fuzzy Sets and Systems* 29 (1989) 201-227.

[5] T. Murofushi and M. Sugeno, A theory of fuzzy measures — representations, the Choquet integral, and null sets, *J. Math. Anal. Appl.*, to appear.

付録

〈**第3節の命題の証明**〉 証明で次の演算を用いる：

$$x_i\vee y_i \triangleq \begin{cases} x_i & \text{if } u_i(x_i)\geqq u_i(y_i),\\ y_i & \text{if } u_i(y_i)>u_i(x_i).\end{cases}$$

$$x_i\wedge y_i \triangleq \begin{cases} y_i & \text{if } u_i(x_i)\geqq u_i(y_i),\\ x_i & \text{if } u_i(y_i)>u_i(x_i).\end{cases}$$

命題3.2. ($\Leftarrow$)：u_iが定数関数のときは明らか．$\{i\}$が零集合のときは，定理2.1.7の証明[5]が適用できる．
($\Rightarrow$)：$u_i(x_i)=$const. $\forall x_i\in X_i$ ではないとする．任意に$J\subset I-\{i\}$をとり，$J,J\cup\{i\}\in\mathcal{A}$とするとき，$\mu(J\cup\{i\})=\mu(J)$ を示す．$x,y\in X$と$\alpha,\beta\in\boldsymbol{R}$が存在して，$J=\{j\,|\,u_j(x_j)\geqq\alpha\}$, $J\cup\{i\}=\{j\,|\,u_j(x_j)\geqq\beta\}$ となる．そこで，

$$z_j\triangleq x_j\vee y_j \quad \text{for } j\in J$$
$$z_j\triangleq x_j\wedge y_j \quad \text{for } j\notin J\cup\{i\}$$

とする．$u_i(x_i)\neq u_i(y_i)$のときは，

$$z'_i\triangleq x_i\vee y_i,\quad z_i\triangleq x_i\wedge y_i$$

とおき，$u_i(x_i)=u_i(y_i)$のときは，仮定より$u_i(x_i)\neq u_i(w_i)$ なる$w_i\in X_i$が存在するので，

$$z'_i\triangleq x_i\vee w_i,\quad z_i\triangleq x_i\wedge w_i$$

とおく．簡単のため，$u_j\triangleq u_j(z_j)$ for $j\neq i$, $u'_i\triangleq u_i(z'_i)$, $u_i\triangleq u_i(z_i)$ と書く．さらに，$M\triangleq\{j\,|\,u_i<u_j<u'_i\}$, $m\triangleq|M|$とおき，$M=\{j_1,\cdots,j_m\}$, $u_{j_1}\leqq\cdots\leqq u_{j_m}$とし，$M_{j_{m+1}}\triangleq\{j\,|\,u'_i\leqq u_j\}$, $M_k\triangleq\{j_k,\cdots,j_m\}\cup M_{j_{m+1}}$, $k=1,\cdots,m$ とおく．また，$u_{j_0}\triangleq u_i$, $u_{j_{m+1}}\triangleq u'_i$ としておく．

X_iが非本質的であることより $(z'_i,z_{ic})\sim(z_i,z_{ic})$ なので，$u(z'_i,z_{ic})-u(z_i,z_{ic})=0$. uがChoquet積分型であることと(7)式より，

$$\sum_{k=1}^{m+1}(u_{j_k}-u_{j_{(k-1)}})[\mu(M_k\cup\{i\})-\mu(M_k)]=0.$$

あるkに対して$u_{j_k}>u_{j_{(k-1)}}$, $M_k=J$となるので，上式より$\mu(J\cup\{i\})=\mu(J)$. □

命題3.4. Choquet積分の単調性より明らか．□

命題3.5. $(x_i,x_{ic})\lesssim(x'_i,x_{ic})$ for some $x_{ic}\in X_{ic}$と仮定すると，$u(x_i,x_{ic})\leqq u(x'_i x_{ic},)$. Choquet積分の単調性と$\{i\}$が零集合でないことより，$u_i(x_i)\leqq u_i(x'_i)$. もし $u_i(x_i)=u_i(x'_i)$ なら，明らかに $(x_i,x_{ic})\sim(x'_i,x_{ic})\quad\forall x_{ic}\in X_{ic}$ で

ある．そこで，$u_i(x_i)<u_i(x'_i)$ とする．
$x_{ic}\in X_{ic}$ を任意に固定する．簡単のため $u_j\cong u_j(x_j)\ \forall j$，$u'_i\cong u_i(x'_i)$ とし，M，m，M_kなどを命題3.2の証明と同じように定めると，

$$u(x'_i,x_{ic})-u(x_i,x_{ic})=\sum_{k=1}^{m+1}(u_{j_k}-u_{j_{(k-1)}})[\mu(M_k\cup\{i\})-\mu(M_k)]>0.$$

よって，$(x_i,x_{ic})<(x'_i,x_{ic})$．□

命題3.6の証明の前に，より一般的な次の命題を示す．

[**命題**A.3.1] iを本質的な属性，$i\notin J$，J，$J\cup\{i\}\in\mathcal{J}$とする．$i\notin L$，L，$L\cup\{i\}\in\mathcal{J}$ なる任意のLについて，条件

(*) $u_k(x_k)\leqq u_i(x_i)<u_i(x'_i)\leqq u_j(x_j)\quad\forall j\in J,\ \forall k\notin J\cup\{i\}$,

and $u_k(x'_k)\leqq u_i(x_i)<u_i(x'_i)\leqq u_j(x'_j)\quad\forall j\in L,\ \forall k\notin L\cup\{i\}$,

を満たす$x_i,x'_i\in X_i$，$x_{ic},x'_{ic}\in X_{ic}$ が在るとき，
iがi^cに選好独立 $\Rightarrow$ $\mu(J)<\mu(J\cup\{i\})$．

証明．背理法による．$\mu(J)=\mu(J\cup\{i\})$と仮定して，iが非本質的であることを導く．
$\mu(J)=\mu(J\cup\{i\})$，L，$L\cup\{i\}\in\mathcal{J}$，iがi^cに選好独立とする．仮定より(*)を満たすx_i,x'_i,x_{ic}，x'_{ic} が在る．$\mu(J)=\mu(J\cup\{i\})$より，$u(x'_i,x_{ic})-u(x_i,x_{ic})=[u_i(x'_i)-u_i(x_i)]\cdot[\mu(J\cup\{i\})-\mu(J)]=0$ゆえ，$(x'_i,x_{ic})\sim(x_i,x_{ic})$．
iはi^cに選好独立ゆえ，$(x'_i,x'_{ic})\sim(x_i,x'_{ic})$．
よって，$0=u(x'_i,x'_{ic})-u(x_i,x'_{ic})=[u_i(x'_i)-u_i(x_i)]\cdot[\mu(L\cup\{i\})-\mu(L)]$．
$u_i(x_i)<u_i(x'_i)$ より，$\mu(L\cup\{i\})=\mu(L)$．□

命題3.6．$i\notin J$，$i\notin L$，J，$J\cup\{i\}$，L，$L\cup\{i\}\in\mathcal{J}$なる任意の$J,L\subset I$について(*)が満たされることをいえばよい．J，$J\cup\{i\}$，L，$L\cup\{i\}\in\mathcal{J}$ より，$J=\{j\mid u_j(x^1{}_j)\geqq\alpha^1\}$，$J\cup\{i\}=\{j\mid u_j(x^2{}_j)\geqq\alpha^2\}$，$L=\{j\mid u_j(x^3{}_j)\geqq\alpha^3\}$，$L\cup\{i\}=\{j\mid u_j(x^4{}_j)\geqq\alpha^4\}$となる$x^1,x^2,x^3,x^4\in X$，$\alpha^1,\alpha^2,\alpha^3,\alpha^4\in\boldsymbol{R}$がある．そこで，命題3.2の証明と同様に$x_j$を
$x_j\cong(((x^1{}_j\vee x^2{}_j)\vee x^3{}_j)\vee x^4{}_j)$ for $j\in J$,
$x_j\cong(((x^1{}_j\wedge x^2{}_j)\wedge x^3{}_j)\wedge x^4{}_j)$ for $j\notin J\cup\{i\}$
とし，JをLにかえて同様にx'_jを定める．また，y'_i，y_iも上と同じく，命題3.2のz'_i，z_iと同様に定める．閉区間$[u_i(y_i),u_i(y'_i)]$はu_iの値域に含まれるので，ある$x_i,x'_i\in X_i$があって，条件(*)を満たす．□

命題3.8．明らか．□

〈**定理4.4の証明**〉uが正規Choquet積分型ならば，Iが順列的加法独立であって，すべての属性iがi^cに選好独立かつ端点効用独立であることを示すのは容易である以下，この逆をいくつかの補題を用いて示す．

[**補題**A.4.1] $y_j=\mathbb{0}_j$ or $\mathbb{1}_j$，$z_j=\mathbb{0}_j$ or $\mathbb{1}_j$ for $j\neq i$ のとき，

$$\frac{u(x_i,y_{ic})-u(\mathbb{0}_i,y_{ic})}{u(\mathbb{1}_i,y_{ic})-u(\mathbb{0}_i,y_{ic})}=\frac{u(x_i,z_{ic})-u(\mathbb{0}_i,z_{ic})}{u(\mathbb{1}_i,z_{ic})-u(\mathbb{0}_i,z_{ic})}.$$

証明．iがi^cに端点効用独立であることから，
$(p_i,y_{ic})\precsim(q_i,y_{ic})\Leftrightarrow(p_i,z_{ic})\precsim(q_i,z_{ic})\quad\forall p_i,q_i\in X_i$.
したがって，$a>0$，$b\in\boldsymbol{R}$が存在して，
$u(x_i,y_{ic})=a\cdot u(x_i,z_{ic})+b\quad\forall x_i\in X_i$.
この式に $x_i=\mathbb{1}_i$，$x_i=\mathbb{0}_i$ を代入すればよい．□

上の補題に基づき，各$i\in I$に対して

$$u_i(x_i)\cong\frac{u(x_i,y_{ic})-u(\mathbb{0}_i,y_{ic})}{u(\mathbb{1}_i,y_{ic})-u(\mathbb{0}_i,y_{ic})}\quad\forall x_i\in X_i$$

（ただし $y_j=\mathbb{0}_j$ or $\mathbb{1}_j$ for $j\neq i$）と定義する．$u_i(\mathbb{1}_i)=1$，$u_i(\mathbb{0}_i)=0$ である．また，
$\mu(J)\cong u(\mathbb{1}_J,\mathbb{0}_{J^c})\quad\forall J\subset I$
と定める．μは狭義単調増加な正規ファジィ測度である．

[**補題**A.4.2] 任意の$i\in I$，$J\subset I-\{i\}$に対して，
$u(x_i,\mathbb{1}_J,\mathbb{0}_L)=u_i(x_i)[\mu(J\cup\{i\})-\mu(J)]+\mu(J)$.
証明．u_iとμの定義から明らか．□

[**補題**A.4.3] $x\leftarrow\pi$のとき

$$u(x)=u_{\pi(1)}(x_{\pi(1)})[1-\mu(\{\pi(2),\pi(3)\})]+u_{\pi(2)}(x_{\pi(2)})[\mu(\{\pi(2),\pi(3)\})-\mu(\{\pi(3)\})]+u_{\pi(3)}(x_{\pi(3)})\mu(\{\pi(3)\}).\qquad(A1)$$

証明．$x\leftarrow\pi$より，
$u(x_{\pi(1)},x_{\pi(2)},x_{\pi(3)})+u(\mathbb{0}_{\pi(1)},\mathbb{1}_{\pi(2)},\mathbb{1}_{\pi(3)})=u(x_{\pi(1)},\mathbb{1}_{\pi(2)},\mathbb{1}_{\pi(3)})+u(\mathbb{0}_{\pi(1)},x_{\pi(2)},x_{\pi(3)})$,
$u(\mathbb{0}_{\pi(1)},x_{\pi(2)},x_{\pi(3)})+u(\mathbb{0}_{\pi(1)},\mathbb{0}_{\pi(2)},\mathbb{1}_{\pi(3)})=u(\mathbb{0}_{\pi(1)},x_{\pi(2)},\mathbb{1}_{\pi(3)})+u(\mathbb{0}_{\pi(1)},\mathbb{0}_{\pi(2)},x_{\pi(3)})$.
上の2式とμの定義，補題A.4.2より(A1)式が従う．□

[**補題**A.4.4] 任意の$v=(v1,v2,v3)\in[0,1]^3$に対し，$v_i=u_i(x_i)\ \forall i\in I$ なる$x\in X$がある．また，連続関数$\psi:[0,1]^3\rightarrow[0,1]$があって，
$u(x)=\psi(u_1(x_1),u_2(x_2),u_3(x_3))\quad\forall x\in X$
証明．最初の事項は，u_iの連続性とX_iが実数区間であること，及び $u_i(\mathbb{0}_i)=0$，$u_i(\mathbb{1}_i)=1$ から明らか．各属性$i\in I$がi^cに選好独立なことから，上式を満たす狭義単調増加関数ψが存在する[3]．ψの連続性も，uの連続性とX_iが実数区間であることから明らか．□

上補題に基づき，関数ψについてだけ考える．置換$\pi:I\rightarrow I$に対して，ψ_πを，(A1)式の右辺を$\psi_\pi(u_1(x_1),u_2(x_2),u_3(x_3))$ と与える，$[0,1]^3$から$[0,1]$への関数とする．補題A.4.3，A.4.4より，任意の$v\in[0,1]^3$に対し，置換πがあって $\psi(v)=\psi_\pi(v)$ となることに注意されたい．次の補題で証明は完了する．

[**補題**A.4.5] πをIの置換とするとき，
$v_{\pi(1)}\leqq v_{\pi(2)}\leqq v_{\pi(3)}\Rightarrow\psi(v)=\psi_\pi(v)$.
証明．単位立方体$[0,1]^3$の12辺のうち，$(0,0,0)$と$(1,1,1)$を端点としない6辺からなる集合をEとする．
置換πに，Eの6辺のうち，$v_{\pi(1)}<v_{\pi(2)}<v_{\pi(3)}$である内点$(v1,v2,v3)$をもつ辺$e(\pi)$を対応させる．これは一対一対応である．補題A.4.2より，辺$e(\pi)$上では$\psi(v)=\psi_\pi(v)$である．
単位立方体を平面の集合$\{\psi_\pi(v)-\psi_\rho(v)=0\mid\pi,\rho$は$I$の置換$\}$によって細分する．
任意のπについて $\psi_\pi(a,a,a)=a\ \forall a\in[0,1]$なので，平面$\psi_\pi(v)-\psi_\rho(v)=0$は直線$v1=v2=v3$を含む．よって，細分化によって生成された多面体は，少なくともひとつのEの要素（単位立方体の辺）の一部を辺としてもつ．
Pを，細分化によって生成された最小単位の多面体（どの平面$\psi_\pi(v)-\psi_\rho(v)=0$とも交わらないもの）の任意の一つとする．（以下 多面体Sの内部と境界の点からなる集合を同じ記号Sで表す．）ある点$v\in P$がどの平面$\psi_\pi(v)-\psi_\rho(v)=0$上にもなく，かつある置換$\pi$について$\psi(v)=\psi_\pi(v)$ならば，関数$\psi$の連続性より$\psi(v)=\psi_\pi(v)\ \forall v\in P$となる．
以上の議論より，線分$(0,0,0)$-$(1,1,1)$と$e(\pi)$を辺にもつ四面体$T(\pi)$において，
$\psi(v)=\psi_\pi(v)\quad\forall v\in T(\pi)$
となる．そして，明らかに
$T(\pi)=\{(v1,v2,v3)\mid v_{\pi(1)}\leqq v_{\pi(2)}\leqq v_{\pi(3)}\}$．□

問い合わせ先
〒227 横浜市緑区長津田町4259
東京工業大学 システム科学専攻 室伏 俊明
phone 045-922-1111 ext.2645 fax 045-921-1485
email murofusi@sys.titech.ac.jp

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

TC3-2

ファジィ積分を使ったシナリオ評価

Scenario Evaluation Based on Fuzzy Integral for Decision Support System

米田　稔　　深海　悟　　高木友博
Minoru YONEDA　　Satoru FUKAMI　　Tomohiro TAKAGI

国際ファジィ工学研究所

Laboratory for International Fuzzy Enginnering Research

Abstract: Recently DSS(Decision Support System) is required to support both the intellectual evaluations and the understanding of numerical data,because many systems become enormous and have high functions increasingly. However we have't got the theory of the intellectual information processing which resolves the above problems. By building the DSS for foreign exchange transaction, we extract one of the techniques of the intellectual information processing of human and propose the new approach for DSS.

1. はじめに

近年、システムの大規模化、高度化に伴い意思決定支援システムには人間の持つ高度な知的評価や数値情報の意味理解を高度にサポートすることがますます要求されるようになった。しかし、未だそのような知的情報処理に関した理論は確立されていない。そこで、外国為替取引のための意思決定支援システムをを構築する事により、人間の高度な知的情報処理の一端を抽出し、意思決定支援システムの為の新しい手法を提案する。

コンピュータはその黎明期から経営管理への導入が考えられ１９５０年代後半にはMIS(Management Information System: 経営情報システム) が提唱され企業、経営のモデルが検討された。しかし、これらの多くはオペレーションズリサーチモデルのつなぎ合わせでしかなく期待された効果を上げることができなかった。そこで、１９６０年代後半には非構造化問題（経営戦略、判断）における情報量増大や意思疎通に対するトップマネージメントへの支援手段としてＤＳＳ (Decision support system: 意思決定支援システム）が提案された。また近年では、CIM(Computer Integrated Manufacturing)：SIS(Strategic Information System) などのように概念的な計算機機能の枠組みを主に示すだけのシステム化構想が出現しているが、これらもデータベース技術を中心とした意思決定支援システムシステムの一種といって良いかもしれない。しかし、これらは情報の伝達や一括管理の重要性を説くだけで問題解決の方法論としては乏しいと考えられる。

また、数学的な理論背景をもった手法（ゲーム理論、数理計画問題、統計的決定論など）も多いが、数学的モデルによる定式化、定量化が必須であり経済、社会問題のような悪構造問題には無力であった。この原因の多くは現実の意思決定者が行っている処理　- 曖昧で不確実なデータの取扱い、シナリオの生成、専門知識を使った予測、知的評価、事例の活用など悪構造問題に対する必要な機能 - を無視した為と考えられる。そして、現在最も求められているのは知識情報処理に立脚した意思決定支援システムの開発である。そのため、我々は知識ベースを基にした外国為替支援システムから問題点を抽出して研究をおこなった。

2. 為替取引と意思決定支援システム

2.1 為替取引の特徴

まず最初に為替取引について簡単に説明する。為替取引はドルと円、マルクと円のように２国間の通貨の取引である。株式取引と異なりブローカー間で取引されるテレホンマーケットであり、平均株価が上がれば全体資産が増加する株式市場とは異なりゼロサムゲームを構成している。また、為替レートは通貨の需給バランスできまる。そして、そのバランスは物価平価説、国際貸借説、金利平価説などのように比較的長期的に影響するものや、心理的、政治、社会、軍事的要因のように短期的影響するものがある。そこで、我々は専門家にヒヤリングを続ける一方新聞等からディーラーの判断例を調査した。それらをまとめ、為替取引及びディーラーの判断の特徴を以下に示す。

1) 物理システムのような再現性のある唯一の解というものはない。
   - 為替レートは政治的要因やうわさで変化する
2) ディーラーは経済知識や経験(事例)を使って為替レートを予測しリスクとリターンのバランスをとっている。
3) 外界からの入力データはテキストデータ (ニュース) と数値データ (経済指標など) がある。また、ディーラーはそれらのデータを単独では評価せず物価、消

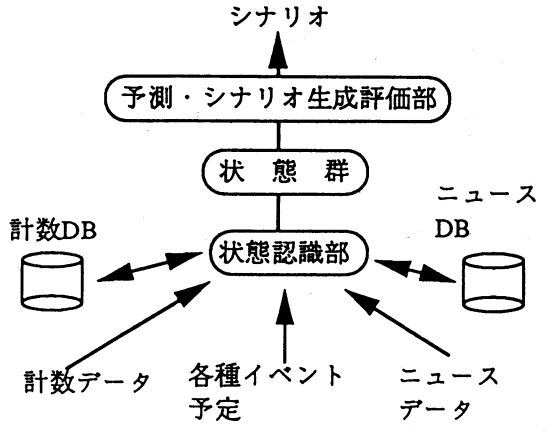


図1　為替取引支援システム構成

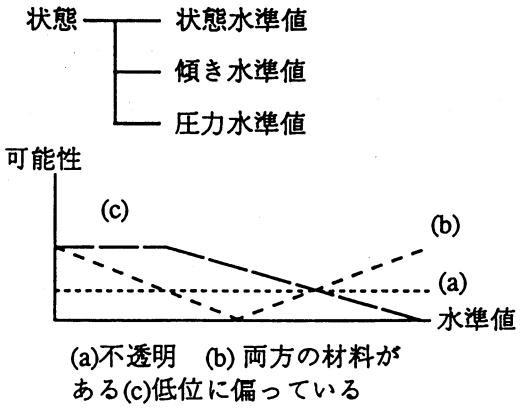


図2　状態の構成要素と表現方式

費などの経済状態で認識している。そして、そこには不確実性 (Uncertianty) が伴なう。

4) 従来の定量化モデル (統計モデルなど) ではステージの違いを表現できないので予測が困難でありあいまいさ (Vagueness) をもった知識ベースによる推論が必要となる。

- ディーラーが違う局面と思うと同じニュースでも判断を違わせる
- 為替レートは利食いがあるので単調に上がったり下がったりしない

2.2　ＤＳＳ構築上の問題点

本節では現在我々が構築しようとしている為替取引支援システムおよびその時に解決しなければならない問題点について述べる。まず、図1に為替取引支援システムの構成を示す。本システムの最大の特徴は経済状態を表現する状態群を持ち予測・シナリオ生成評価部と状態認識部に分けて構成されることである。ここで状態群とは消費、物価、生産、金融市場などの経済状態を表す水準値を持つ変数群のことである。また状態のもつ水準値は状態、傾き、上昇下降圧力に関する水準値からなる (図2)。状態認識部は外界から入手されるニュースデータ (例えば要人の発言など)、数値データ (経済指標など) からメカニズム的に状態水準値を作りだす部分である [6]。水準値のとる値は、あいまいな入力データ、因果関係から作られるため図2のような可能性もったような分布 (不確実性を表す) となる[1]。得られるデータに状態の先行きに対して上昇と下降の材料が含まれると図2(b) のように両サイドに可能性が分かれる場合が生じる。そして、予測・シナリオ生成評価部は各状態の水準値をみてシステムがあらかじめもっているシナリオとの類似度を評価して意思決定者に適切なシナリオを明示してをアドバイスする部分である。この為替取引支援システムを構築するために解決しなければいけない問題はニュースデータの取り扱いや状態認識部での水準値の更新方法などいくつかあるが、本報告では予測・シナリオ生成部におけるシナリオ評価にかぎる。そして、ファジィ積分を用いてシナリオを評価する以下の方法を提案する。

1) 状態群における各状態の水準を取り込む
2) ルール、事例によって状態に適切ないくつかのシナリオを抽出する
3) ファジィ積分を使ってシナリオの評価を行う

上記の手順を実行するためには次の節で示されるファジィ積分モデルを使って定式化をする。

[1]当然、実際はこれらの分布が組み合わさった形になる

3.　ファジィ積分によるシナリオ評価

ファジィ測度は菅野によってルベーグ測度を一般化したものである [5]。その大きなの特徴は非加法性である。すなわち、共通部のない集合どうしの測度の和は集合和の測度と一致しない。この性質の為にファジィ測度は因子 (集合) 間の交互作用を表現でき、人間の感覚を表現するのに有効と考えられる。一般にアンケートなどの解析に用いられる時、ファジィ積分は被積分関数が個別項目の評価値、ファジィ測度は人間の持つ重み付け、積分値は全体評価と解釈されている。

3.1　ファジィ測度を利用する意味

意思決定支援システムにおいてシナリオ評価する目的としては次の2点があげられる。

- 生成されたシナリオを評価することによって意味のある可能性を示せる
- シナリオ評価の過程でシナリオの一部が水準が低いけど、この部分が満たされればシナリオ全体の評価値が非常に高くなりうるケースの場合、それによって意思決定者に喚起をうながすことができる。

表1　状態表現の例(一部)

状態名	参照項目	水準値
米国消費	小売売上高 卸売売上高 住宅着工数 など	(水準)高値 (傾き)横這い (圧力)上昇大
米国物価	原油価格 CRB指数 消費者物価 など	(水準)高値 (傾き)横這い (圧力)上昇大
生産	鉱工業生産	(水準)高値

状態認識部における部分的な知識による積み重ねだけで出てくる結論や推論過程では思わぬ方向に推論が進み誤った結論を出すことがある。人間は全体のストリーとして妥当な物をあらかじめ用意して部分的な推論を制御して明らかに誤った方向に行くことを防いでいる。すなわち、シナリオが持っている全体としてのあいまいさや合理をあらかじめ判断して部分的な推論を調整していると考えられる。そこで、意思決定支援システムにおいても状態認識部がメカニズム的に作り出す状態の水準値を統合して評価して意思決定に反映させることが重要と考えられる。次に、今まで漠然と使用してきたシナリオと言う言葉を我々の為替取引支援システムおける言葉におきなおして定義する。

- 定義　状態群における状態項目名とその状態水準値で表される述語で表現される命題の集合をシナリオと定義する。

例えば、”消費は活発で今後も伸びそう”(消費の状態、圧力水準値がともに高い値をとっている)、”物価は安定状態である”(物価の状態は低位で圧力も中位である)などが命題として考えられそれらの集合がシナリオとなる。シナリオの評価とはこれらの命題の組み合わせが全体としていかに合理的かを評価することである。またファジィ積分は積分される要素間の相乗効果や相殺効果を表現するファジィ測度によって積分を行なうため、総合評価である積分値は人間の与えた主観的な測度によって大きく変化する。すなわち、シナリオ評価をファジィ積分を用いて評価する意義は各命題が個別に成立するより同時に成立した場合シナリオ全体の評価が個別の重み付けの和より大きくしたり小さくしたりすることによって意思決定する人の主観を反映した評価を達成しようとする点にある。

3.2　ファジィ積分によるシナリオ評価

この節では、ファジィ積分を使ったシナリオ評価をを次のように定義する。

- 全体集合: 全体集合 Ω は要素としてシナリオ中の命題を持つ

$$\Omega = (A_{ij} \mid i = 1, n, j = 1, m) \tag{1}$$

ここで、i 状態名及び水準値名 (主部) の違いを表す – 消費状態、物価圧力など　j 状態水準値 (述部) の違いを表現する –　安定、高いなど

- 測度空間: 測度空間 $(\Omega, \mathcal{B}, g)$ を定義する。ここで、$\mathcal{B}$ はボレル集合、Ω は全体集合、g はファジィ測度である
- 被積分関数: 被積分関数 $h_{S_k} : \Omega \rightarrow R[0,1]$
ここで、h は水準値によってさだまる関数で命題と状態のマッチ度示す。S_k はシナリオの違いとシナリオ中の命題の集合を示す
- シナリオ評価 : シナリオ評価は以下のようにファジィ積分で行う

$$Z_{S_k} = \int_{S_k} h_{S_k} dg \tag{2}$$

他のシナリオと比較する時は $g(S_k)$ で割って正規化する。また、事例とニュースの類似度を計算するためにフレーム知識表現に関するシナリオ評価を拡張することもできる [2]。以上の結果から我々はファジィ測度を同定後シナリオを評価できる。

3.3　シナリオ評価の例

ここでは、簡単なシナリオ評価の例を示す。被積分関数 h は実数値関数であるため状態のもつ可能性を表している分布[2]を命題の述部との関係で実数値化する。そこで、まず状態の水準値は次のように与えられるとする。(見方が分かれる)
$\{0.3/0.0, 0.2/0.25, 0.0/0.5, 0.2/0.75, 0.3/1.0\}$
また、命題の述部を表現するメンバーシップ関数を次のように定義する。
$\{0.0/0.0, 0.0/0.25, 0.5/0.5, 0.7/0.75, 1.0/1.0\}$
ここで拡張原理を用いて水準値のメンバーシップ関数へのマッチングを行ない次の結果を得る。

$$\{0.3/0.0, 0.0/0.5, 0.2/0.7, 0.3/1.0\} \tag{3}$$

これは、前節で定義した被積分関数が可能性の分布を持った形の表現されたことになっている。次にシナリオの評価を計算する。ここでは、簡単のためシナリオは命題 A_1, A_2 からなり被積分関数とファジィ

[2]可能性を表す方法として Dempster-Shafer 理論 [3] や Possibility 測度 [1] などが考えられるがここでは確率的な与たえ方をする

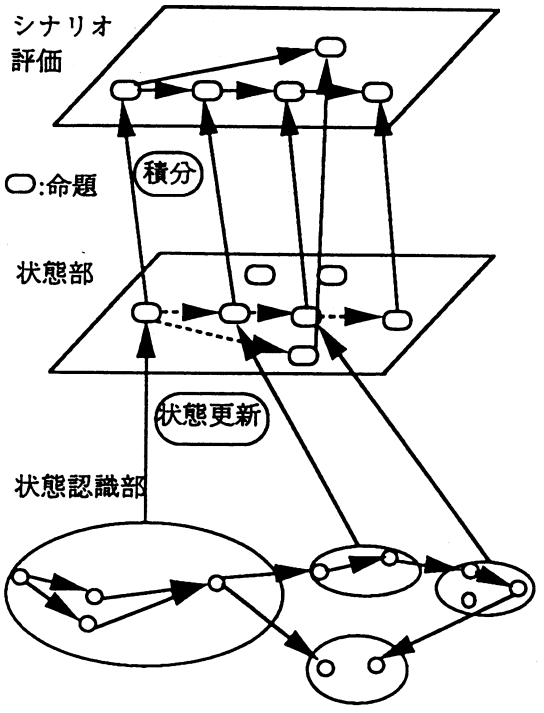


図3　シナリオ評価のイメージ

測度は次のように与えられたとする。これは、例えば物価上昇圧力大 (A_1) なので金利上昇の可能性が大きい (A_2) というシナリオを考えることに相当する。

$h(A_1)$ = (3) 式の分布として与える
$h(A_2) = 0.7$
$g_1(A_1) = 0.7$, $g_1(A_2) = 0.5$
$g_2(A_1) = 0.5$, $g_2(A_2) = 0.9$

ここで、測度の添字は意思決定者のちがいを表す。ただし、空集合と全体集合をつぎのように与える。

$$g(\phi) = 0.0 \ , \ g(A_1, A_2) = 1.0$$

シナリオ評価をするためにファジィ積分を計算する。そこで、*Choquet* 積分 [4] と拡張原理を使う、計算は容易であるが注意する点は各命題の被積分関数の組合せごとで、$h(A_1)$ と $h(A_2)$ の大きい方から計算しなければいけないことである。その結果積分値 z がつぎのような分布を持った値をとる。

$$z_1 = \{0.3/0.35, 0.2/0.7, 0.3/0.91\} \qquad (4)$$

また、意思決定者 2 のファジィ測度を用いると

$$z_2 = \{0.3/0.63, 0.2/0.7, 0.3/0.85\} \qquad (5)$$

となり意思決定者の重みの違いが評価値の分布にも影響を与える事がわかる。

4.　結論

意思決定支援システムにおいてシナリオ評価にファジィ積分を利用するアプローチ法を提案した。また、拡張原理を利用することにより状態のもつ可能性に関する情報を消すことをなく、シナリオ評価が可能なことを示した。しかし、実際のシステムに活用するには次のような検討項目がある。

1) 実コンピュータシステム上におけるニュースデータベースの構築
2) ファジィ測度の設定、同定法の検討
3) 注目点抽出時における顕在化方法の検討 (ファジィ積分のような平均化手法以外の方法の併用)
4) シナリオ評価部における事例の活用方法の検討
5) 機関投資家、政府など市場参加者の行動ルールを利用したシナリオ生成の検討

我々はこのような手法が知的なプロセス診断及び制御にも活用されることを期待している。

5.　謝辞

本研究に関して、常に討議に加わっていただいたＬＩＦＥ第二研究室の諸氏と金子文司氏 (山一証券) 及び、研究の節目に有益な助言をいただいた寺野所長、椹木哲夫博士（京都大学）、室伏俊明博士（東京工業大学）に感謝する。

参考文献

[1] D.Dubois, H.Prade. *Possibility Theory*. PLENUM PRESS, 1988.

[2] M.Yoneda, S.Fukami, T.Takagi. Scenario evaluation based on fuzzy integral for decision support system. *Proceedings of NAFIPS '90*, pages 402–405, 1990.

[3] Glenn Shafer. *a mathematical theory of evidence*. Princeton Univercity Press, 1975.

[4] 室伏俊明, 菅野道夫. Fuzzy t-conorm 積分 - Fuzzy 積分と Choquet 積分の一般化. 第四回ファジィシステムシンポジウム論文集, pages 345–350, 1988.

[5] 菅野道夫. ファジィ測度とファジィ積分. 計測自動制御学会論文集, pages 218–226, 8 1972.

[6] 柳生辰夫, 深海悟, 高木友博. 為替ディーリングサポートシステムにおけるファジィ経済モデル. 第６回ファジィシステムシンポジウム論文集, 1990.

問い合わせ先: 〒 231 横浜市中区山下町 89-1
シーベルヘグナービル 3F
国際ファジィ工学研究所　米田 稔
TEL 045-212-8238,FAX 045-212-8255

TC3-3

相似線形構造の表現としてのＣｈｏｑｕｅｔ積分に関する一考察

A Study on Choquet's Integral as a Representation of Conformable Linearity

町田　元也・
Motoya MACHIDA

室伏　俊明・・
Toshiaki MUROFUSHI

・日立製作所
Hitachi,Ltd

・・東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

Choquet's integral is interesting especially from a mathematical point of view, because Choquet's integral is definable for all fuzzy measures and coincides with Lebesgue's integral in the special case where measures are σ-additive. But applying Choquet's integral to practical problems, we need to study more effective structure which characterizes this integral.

In this paper, we show that conformable linearity is an essential property of this integral and fuzzy measures correspond to conformable linear functionals through this integral.

1．はじめに

ファジィ測度に関する積分形については，そのクラスに応じて様々な積分形が提案されている．その中でも，Choquet積分はファジィ測度全体のクラスに関する積分として，また，ファジィ測度がσ－加法性を持つときルベーグ積分に一致する積分形として興味深い．しかしながら，このChoquet積分の構造，性質を解析する場合，ファジィ測度が加法性を持たないために，その構造の特徴付けが非常に困難であるのと同様に，その積分形がルベーグ積分の拡張と言うのみでルベーグ積分の性質のほとんどについては保障されていない．

中でも積分の線形性の欠如は，ファジィ測度の非加法性と一対をなすものといえる．一方，ルベーグ積分論では，線形性がその積分形と本質的な関係を持っている．すなわち，任意の空間Ｘの上に測度（$\mathcal{F}$，μ）が与えられているとき，

$$L(f)=\int_X f(x)\,d\mu(x)$$

と定義すると，これによって$\mathcal{F}$－可測関数族上の非負値加法的汎関数が得られる．逆に，ある初等的条件を満たす関数族で定義された連続，非負値，加法的汎関数Ｌは，Ｘ上のある測度（$\mathcal{F}$，μ）によるルベーグ積分によって表現される（伊東［２］）．

さて，Choquet積分においては，この線形性は放棄されているが，ある種の線形性の条件が示されている（室伏［１］）．Choquet積分の応用を考える際，この線形性の条件について何らかの解釈を与えることは非常に重要であろう．また，逆にこの線形性の条件に何らかの解釈が与えられたとして，その対象にChoquet積分を用いるのは妥当であろうか？　以下，この妥当性に関するいくつかの考察を示す．

2．　ファジィ測度とＣｈｏｑｕｅｔ積分

定義１（fuzzy measurable space，ＦＭ－空間）
Ｘを集合，$\mathcal{F}$をＸの部分集合のつくる集合族とする．このとき，この集合族$\mathcal{F}$が条件

$X\in\mathcal{F}$　かつ　$\varnothing\in\mathcal{F}$

を満たすとき，Ｘと$\mathcal{F}$の対（Ｘ，$\mathcal{F}$）を fuzzy measurable space，または以降簡単にＦＭ－空間と呼ぶことにする．

定義２（ファジィ測度，ファジィ測度空間）
ＦＭ－空間（Ｘ，$\mathcal{F}$）の$\mathcal{F}$を定義域とする集合関数

$\mu:\mathcal{F}\rightarrow[0,\infty]$

が条件

（Ⅰ）　$\mu(\varnothing)=0$

（Ⅱ）　Ａ，Ｂ$\in\mathcal{F}$，Ａ$\subset$Ｂ　ならば　$\mu(A)\leqq\mu(B)$

を満たすとき，μをファジィ測度と呼ぶ．また，ＦＭ－空間（Ｘ，$\mathcal{F}$）とファジィ測度μの対（Ｘ，$\mathcal{F}$，μ）をファジィ測度空間と呼ぶ．

定義３（ｃ－可測，ｏ－可測，$\mathcal{F}$－可測）
（Ｘ，$\mathcal{F}$）をＦＭ－空間とするとき，Ｘで定義された非負値関数

$f:X\rightarrow[0,\infty]$

について，任意のｒ≧０に対して

$\{f\geqq r\}\triangleq\{x\in X;\ f(x)\geqq r\}\in\mathcal{F}$

であるとき，ｆをｃ－可測であるという．また，任意のｒ≧０に対して

$\{f>r\}\triangleq\{x\in X;\ f(x)>r\}\in\mathcal{F}$

であるとき，ｆをｏ－可測であるという．更に，ｆがｃ－可測またはｏ－可測のいずれかであるとき，単に$\mathcal{F}$－可測と呼ぶことにする．

定義４（Ｃｈｏｑｕｅｔ積分，Ｃ－積分）
（Ｘ，$\mathcal{F}$，μ）をファジィ測度空間，ｆをＸで定義された非負値関数とするとき，ｆがｃ－可測ならば，$F(r)=\mu(\{f\geqq r\})$（$r\in[0,\infty)$）が定義でき，［０，∞）上で単調減少関数となることから，［０，∞）上のルベーグ積分

$$\int_0^\infty \mu(\{f\geqq r\})\,dr \qquad \cdots\cdots(1)$$

が定義できる．また，ｆがｏ－可測であるとき，同様に［０，∞）上のルベーグ積分

$$\int_0^\infty \mu(\{f>r\})\,dr \qquad \cdots\cdots(2)$$

が定義できる．更に，ｆがｃ－可測かつｏ－可測である場合，［０，∞）上の関数$F(r)=\mu(\{f\geqq r\})$

とG(r)=μ({f>r})は，高々可算個の点r∈[0，∞)を除いて等しいことから，上の二つの積分（1）と（2）は一致する．以上のようなことから，$\mathcal{S}$－可測関数fのファジィ測度μによる積分を

$$(C)\int f\,d\mu \triangleq \begin{cases}(1)\cdots\cdots f\text{がc－可測}\\(2)\cdots\cdots f\text{がo－可測}\end{cases} \quad\cdots\cdots(3)$$

と定義する．この（3）の積分をChoquet積分といい，以降では簡単にC－積分と書くことにする．

また，このC－積分の基本的な性質を証明抜きであげておく（室伏[1]）．

（I）$f\leqq g$ ならば

$$(C)\int f\,d\mu \leqq (C)\int g\,d\mu$$

（II）任意のa∈[0，∞)に対して

$$(C)\int a\cdot f\,d\mu = a\cdot(C)\int g\,d\mu$$

（III）任意のA∈$\mathcal{S}$に対して，Aの定義関数1_Aを

$$1_A(x)\triangleq\begin{cases}1 & \cdots\cdots\ x\in A\\0 & \cdots\cdots\ x\notin A\end{cases} \quad\cdots\cdots(4)$$

と定義すると，1_Aは$\mathcal{S}$－可測関数（c－可測，かつo－可測）で

$$(C)\int 1_A\,d\mu=\mu(A)$$

C－積分においては，その積分形式がファジィ測度にまで拡張された反面，Riemann積分，Lebesgue積分におけるような線形性を持っていない．この線形性の欠如は，この積分形式の解析を困難なものとしている大きな一因となっている．

この線形性の問題に対して，室伏[1]はある関係を用いた制約条件の中では線形性が成り立つことを示した．ここで，室伏[1]によって得られたこの問題に関するいくつかの結果を明らかにしておく．

定義5（相似性）

集合Xを定義域とする関数f，gが条件

$x_1, x_2\in X$，$f(x_1)<f(x_2)$ ならば $g(x_1)\leqq g(x_2)$

を満たすとき，fとgは相似であるといい，

$f \sim g$

と書くことにする．

定理6（室伏[1]）

（X，$\mathcal{S}$，μ）をファジィ測度空間，f，g，f＋gを$\mathcal{S}$－可測関数とするとき，更にf～gならば

$$(C)\int (f+g)\,d\mu$$

$$=(C)\int f\,d\mu+(C)\int g\,d\mu\cdots\cdots(5)$$

が成り立つ．

ここで扱う$\mathcal{S}$－可測関数のクラスは，有界な$\mathcal{S}$－可測関数に限られる．よって，この有界な$\mathcal{S}$－可測関数のなす距離空間を定義し，その距離空間としての性質を明らかにしておく．

定義7（有界$\mathcal{S}$－可測空間）

（X，$\mathcal{S}$）をFM－空間とするとき，有界な$\mathcal{S}$－可測関数全体をM(X，$\mathcal{S}$)と書き，これを有界$\mathcal{S}$－可測関数空間と呼ぶことにする．更に，有界$\mathcal{S}$－可測関数空間M(X，$\mathcal{S}$)は，f，g∈M(X，$\mathcal{S}$)に対して

$$d(f,g)\triangleq \sup_{x\in X}|f(x)-g(x)| \quad\cdots\cdots(6)$$

を距離として距離空間とすることができる．

定義8（多層単関数，多層単関数空間）

（X，$\mathcal{S}$）をFM－空間とするとき，非負値実数$a_i\in[0,\infty)$（i＝1，……，n）と$\mathcal{S}$－可測集合による有限個の単調列

$A_1\subset A_2\subset\cdots\cdots\subset A_n$，$A_i\in\mathcal{S}$ (i=1,……,n)

によって構成される関数

$$h(x)\triangleq\sum_{i=1}^{n} a_i\cdot 1_{A_i}(x)\cdots\cdots(7)$$

を多層単関数と呼ぶ．$\mathcal{S}$－可測関数の定義から，ただちに多層単関数h(x)は$\mathcal{S}$－可測関数（c－可測，かつo－可測）であることがわかる．また，このように定義された多層単関数全体をH(X，$\mathcal{S}$)と書き，これを多層単関数空間と呼ぶことにする．

最後に，距離空間（M(X，$\mathcal{S}$)，d）の性質を証明抜きであげておく（町田[3]）．

定理9

部分距離空間（H(X，$\mathcal{S}$)，d）は，距離空間（M(X，$\mathcal{S}$)，d）の中で dense である．

定理10

（X，$\mathcal{S}$，μ）をファジィ測度空間，$\mu(X)<\infty$とするとき，M(X，$\mathcal{S}$)上のC－積分は，（M(X，$\mathcal{S}$)，d）からRへの一様連続関数となる．

3．ファジィ測度空間の拡張

測度論において，σ－加法的測度から符号付きσ－加法的測度に拡張されたように，ファジィ測度についても拡張が可能であると考えることは自然であろう．ここでは，その意味付けを「C－積分が定義可能である」という観点から構成を試みた．

定義11（有界ファジィ測度空間）

（X，$\mathcal{S}$）をFM－空間とするとき，$\mathcal{S}$を定義域とする有界なファジィ測度全体を

$$Bf(X,\mathcal{S})\triangleq\{\mu:\mathcal{S}\to[0,\infty):\text{ファジィ測度}\}$$

と定義し，有界ファジィ測度空間と呼ぶことにする．

定義12（拡張されたファジィ測度空間の構成）

（X，$\mathcal{S}$）をFM－空間とするとき，$\mathcal{S}$を定義域とする有界な集合関数νに対して

$$V(\nu)\triangleq \sup_{\emptyset=A_0\subset A_1\subset\cdots\subset A_n=X,\ A_i\in\mathcal{S},(i=0,\cdots,n)}\ \sum_{i=1}^{n}|\nu(A_i)-\nu(A_{i-1})|$$

を定義する．このとき，V(ν)をνの全変動と呼ぶことにする．また，全変動が有限な集合関数νを有界変動な集合関数と呼ぶことにする．これにより，

$$Ef(X,\mathcal{S})\triangleq\{\nu:\mathcal{S}\to\mathbf{R}:\text{有界変動な集合関数；}\nu(\emptyset)=0\}$$

を定義し，これを拡張ファジィ測度空間と呼ぶことにする．

この拡張ファジィ測度空間Ef(X，$\mathcal{S}$)の要素νはC－積分が定義可能である．実際，$\mathcal{S}$－可測関数fに対して

$$\begin{cases} G(r)=\nu(\{f>r\}) \cdots\cdots f \text{がo－可測のとき} \\ F(r)=\nu(\{f\geqq r\}) \cdots\cdots f \text{がc－可測のとき} \end{cases}$$

は，共に［0，∞）上の有界変動関数となる．よって，

（1）$(C)\int f\,d\nu \triangleq \int_0^\infty G(r)\,dr$ ……fがo－可測

（2）$(C)\int f\,d\nu \triangleq \int_0^\infty F(r)\,dr$ ……fがc－可測

が定義でき，これを拡張ファジィ測度のC－積分と呼ぶことにする．このように，C－積分が定義可能という観点で，ファジィ測度を含む拡張ができた．

最後に，拡張ファジィ測度空間$Ef(X,\mathcal{F})$がファジィ測度空間$Bf(X,\mathcal{F})$を含む自然な拡張であることを示す．

定理13

$Ef(X,\mathcal{F})=Bf(X,\mathcal{F})-Bf(X,\mathcal{F})$

（証明）

任意の$\nu\in Ef(X,\mathcal{F})$に対して

$$\nu^+(B) \triangleq \sup_{\emptyset=A_0\subset A_1\subset\cdots\subset A_n=B} \sum_{i=1}^{n} (\nu(A_i)-\nu(A_{i-1}))^+$$

$$\nu^-(B) \triangleq \sup_{\emptyset=A_0\subset A_1\subset\cdots\subset A_n=B} \sum_{i=1}^{n} (\nu(A_i)-\nu(A_{i-1}))^-$$

（ただし，$(\alpha)^+ \triangleq (|\alpha|+\alpha)/2$，$(\alpha)^- \triangleq (|\alpha|-\alpha)/2$ ）

が定義でき

$\nu^+,\ \nu^-\in Bf(X,\mathcal{F})$，　$\nu=\nu^+-\nu^-$

とできることから明らか．□

4．　相似線形汎関数の表現

2節で述べた通り，C－積分を特徴付ける性質として相似線形性があることがわかっている．この節では，この相似線形性を含めたC－積分の基本的な性質を掘り起こし，これらの性質を満たす汎関数を定義する．

定義14（相似線形汎関数）

$(X,\mathcal{F})$をFM－空間とするとき，$M(X,\mathcal{F})$上の汎関数

$L: M(X,\mathcal{F})\ni f \rightarrow L(f)\in\mathbf{R}$

が，条件

（I）$a\in[0,\infty)$，$f\in M(X,\mathcal{F})$に対して

$L(a\cdot f)=a\cdot L(f)$

（II）$f,\ g,\ f+g\in M(X,\mathcal{F})$とするとき，

$f\sim g$　ならば

$L(f+g)=L(f)+L(g)$

を満たすとき，この汎関数Lを相似線形汎関数（Conformable Linear Functional）と定義する．

定義15（有界変動汎関数）

$(X,\mathcal{F})$をFM－空間，Lを$M(X,\mathcal{F})$上の汎関数とする．このとき

$$V(L) \triangleq \sup_{0=f_0\leqq f_1\leqq\cdots\leqq f_n=1,\ f_i\in M(X,\mathcal{F})\ (i=1,\cdots,n-1)} \sum_{i=1}^{n} |L(f_i)-L(f_{i-1})|$$

を定義し，$V(L)<\infty$とできるとき，Lを有界変動汎関数と呼ぶことにする．

定義16（有界変動相似線形汎関数空間）

有界変動相似線形汎関数空間を

$Cl(X,\mathcal{F}) \triangleq \{L: M(X,\mathcal{F})\rightarrow\mathbf{R}:$ 有界変動相似線形汎関数$\}$

と定義する．

定理17

$(X,\mathcal{F})$をFM－空間，Lを$M(X,\mathcal{F})$上の有界変動相似線形汎関数とするとき，Lは$(M(X,\mathcal{F}),d)$からRへの連続関数となる．

（証明）

ある$g_0\in M(X,\mathcal{F})$とある$\varepsilon_0>0$に関して，全ての$\delta>0$に対して

$|L(f)-L(g_0)|\geqq\varepsilon_0$

かつ　$d(f,g_0)<\delta$

を満たす$f\in M(X,\mathcal{F})$が存在すると仮定する．仮定から，各$n\in\mathbf{N}$に対して

$|L(f_n)-L(g_0)|\geqq\varepsilon_0$

かつ　$d(f_n,g_0)\leqq 1/2^n$ ……（8）

となる$f_n\in M(X,\mathcal{F})$が存在する．

（8）と距離dの定義により，任意の$N\in\mathbf{N}$について，単調増加関数列

$$\begin{aligned} g_0 &\leqq f_1+1/2\leqq g_0+1\leqq f_2+1+1/2^2 \\ &\leqq g_0+2((1/2)+(1/2^2)) \\ &\leqq\cdots\cdots\leqq f_N+2\Big(\sum_{n=1}^{N-1}1/2^n\Big)+1/2^N \\ &\leqq g_0+2\Big(\sum_{n=1}^{N}1/2^n\Big)\leqq g_0+2 \end{aligned}$$

が構成できる．一方，Lの有界変動の仮定から，ある定数$C>0$が存在して，任意の$N\in\mathbf{N}$について

$$\begin{aligned} &\sum_{n=1}^{N}\Big|L\Big(f_n+2\Big(\sum_{i=1}^{n-1}1/2^i\Big)+1/2^n\Big) \\ &\quad -L\Big(g_0+2\Big(\sum_{i=1}^{n-1}1/2^i\Big)\Big)\Big| \\ &\quad +\sum_{n=1}^{N}\Big|L\Big(g_0+2\Big(\sum_{i=1}^{n}1/2^i\Big)\Big) \\ &\quad -L\Big(f_n+2\Big(\sum_{i=1}^{n-1}1/2^i\Big)+1/2^n\Big)\Big| \\ &\quad +\Big|L(g_0+2)-L\Big(g_0+2\Big(\sum_{i=1}^{N}1/2^i\Big)\Big)\Big| \\ &\quad <C \qquad\qquad \cdots\cdots(9) \end{aligned}$$

とできる．ところが，Lの相似線形性と（8）により

（（9）式の左辺）

$$\begin{aligned} &\geqq 2\cdot\sum_{n=1}^{N}|L(f_n)-L(g_0)|-2|L(1)|\cdot\sum_{i=1}^{N}1/2^i \\ &\geqq 2N\varepsilon_0-2|L(1)| \rightarrow \infty \quad (N\rightarrow\infty) \end{aligned}$$

となり，（9）に反する．よって，示された．□

更に，以下では有界変動相似線形汎関数空間が，単調な相似線形汎関数を導入することにより，定理13で述べた性質と同じ構造を持つことを示す．

定義１８（単調相似線形汎関数空間）
（Ｘ，$\mathcal{F}$）をＦＭ－空間，ＬをＭ（Ｘ，$\mathcal{F}$）上の相似線形汎関数とするとき

$$f \leqq g \Rightarrow L(f) \leqq L(g)$$

を満たすとき，Ｌを単調相似線形汎関数と定義する．明らかに，単調相似線形汎関数は，有界変動相似線形汎関数である．更に，単調相似線形汎関数空間を

$$Clm(X, \mathcal{F}) \triangleq \{L : M(X, \mathcal{F}) \to \mathbf{R} : \text{単調相似線形汎関数}\}$$

と定義する．

定理１９

$$Cl(X, \mathcal{F}) = Clm(X, \mathcal{F}) - Clm(X, \mathcal{F})$$

（証明）
定理１３の証明と同様に，単調汎関数L^+，L^-を

$$L^+(f) \triangleq \sup_{0=f_0 \leqq f_1 \leqq \cdots \leqq f_n = f} \sum_{i=1}^{n} (L(f_i) - L(f_{i-1}))^+$$

$$L^-(f) \triangleq \sup_{0=f_0 \leqq f_1 \leqq \cdots \leqq f_n = f} \sum_{i=1}^{n} (L(f_i) - L(f_{i-1}))^-$$

と構成すると，L^+，L^-が共に相似線形性を持ち

$$L = L^+ - L^-$$

とできることが示される．□
以上の内容から，拡張ファジィ測度空間の構造と有界変動相似線形汎関数空間の構造が非常に近いことがわかった．更に，拡張ファジィ測度空間はＣ－積分形式を介して，有界変動相似線形汎関数空間に含まれている．
最後に，１節で問題提起した有界変動相似線形汎関数空間が，拡張ファジィ測度空間に対応していることを示す．

補題２０

Ｌを単調相似線形汎関数，$h(x) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot 1_{A_i}(x)$

を多層単関数とするとき

$$L\left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot 1_{A_i}\right) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot L(1_{A_i})$$

（証明）

$$\sum_{i=1}^{k} \alpha_i \cdot 1_{A_i} \sim \sum_{i=k+1}^{n} \alpha_i \cdot 1_{A_i}$$ により明らか．□

定理２１
（Ｘ，$\mathcal{F}$）をＦＭ－空間とするとき，任意の$L \in Cl(X, \mathcal{F})$に対して

$$L(f) = (C)\int f \, d\nu \quad (\forall f \in M(X, \mathcal{F})) \cdots\cdots (10)$$

をみたす$\nu \in Ef(X, \mathcal{F})$が一意的に存在する．
（証明）
一意性については明らか．よって，定理１３，１９により，$L \in Clm(X, \mathcal{F})$に対し（10）を満たす$\nu \in Bf(X, \mathcal{F})$が存在することを示せばよい．実際，

$$\nu(A) \triangleq L(1_A)$$

とおけば，補題２０により

$$L(h) = (C)\int h \, d\nu \quad (\forall h \in H(X, \mathcal{F})) \cdots\cdots (11)$$

とできる．これにより，denseな部分集合で定義された一様連続実関数の一意拡張に関する定理と定理９，１０から，（11）の拡張された連続実関数は一意でなければならないから，更に，定理１７により

$$L(f) = (C)\int f \, d\nu \quad (\forall f \in M(X, \mathcal{F}))$$

が示された．□

5．　結び

定理２１によって，Choquet積分と相似線形性との関係を明らかにすることができた．このことは，Choquet積分に関する一つの構造的な保証が与えられたという意味で意義があると思われる．また，ここで述べたChoquet積分に関する構造的な視点からの考察は，実問題でのChoquet積分の有効性を検証する際，ファジィ測度の一積分形式という観点に加えて，更にもう一つのアプローチ方法を示していると思われる．

謝辞

本研究全般にわたり御指導いただきました東京工業大学　菅野道夫教授に深謝いたします。

参考文献

[１] T.Murofushi : Fuzzy measures and Choquet's integral. Proc.9th Symposium on Applied Functional Analysis, Science Univ. of Tokyo,58-69,1986.
[２] 伊藤　清：「確率論」，岩波書店.
[３] 町田元也：非加法的集合関数の理論とその応用に関する一考察，東京工業大学システム科学専攻修士論文(1990)

問い合わせ先：川崎市麻生区王禅寺１０９９番地
日立製作所システム開発研究所
町田　元也

TC4-1

数値データの言語モデリング

Linguistic Modeling of Numerical Data

小沢　順*　　菅野　道夫**
Jun OZAWA　　Michio SUGENO

*松下電器産業株式会社　　**東京工業大学
Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.　　Tokyo Institute of Technology

This paper proposes two kinds of rule-based models. One is the fuzzy number model and the other is the linguistic model. The fuzzy number model is a rule-based model represented by fuzzy numbers, and it aims at precision. The linguistic model is a rule-based model in natural language, and it aims at easiness of understanding the system's features. Each model consists of position rules and velocity rules. Also this paper proposes a multi-dimensional exponential membership function instead of the usual membership function for numerical rule-based models.
This paper presents two applications of the rule-based model. The rule-based model suggested in here is more precise than usual fuzzy models.

1．はじめに

システムを解析するためにシステムの入出力データからモデリングを行なう研究は古くから行なわれてきた[1]。従来までのモデリングは、システムに線形性を仮定し、線形式によるモデリングが主なものであった。

それらの方法でモデリングされた線形式を人間がみた場合、そのシステムの特徴をとらえることは困難である。そこで本研究ではシステムの入出力データからそのシステムを人間にとって理解し易いルールベースによるモデリングを行なう。現在、システムをルールベースで表現するモデルとしてファジィモデルがある。従来からあるファジィモデルの同定方法は、モデルの推論精度を良くするためにルールのメンバーシップ関数のパラメータを調整し、調整されたメンバーシップ関数に言語をあてはめている。そのためファジィモデルのことを言語モデルと呼ぶことがある。しかし、本来メンバーシップ関数は人間の感覚に合うように設定されるべきものであり、推論精度を良くするために設定されるべきものではない。そこで本研究では、推論精度を目的とするルールベースモデルとしてファジィナンバーモデルを提案し、そのファジィナンバーモデルを人間が理解することを目的とするモデルとして言語モデルを提案する。

ファジィナンバーモデルには位置型ファジィナンバーモデルと速度型ファジィナンバーモデルがある。位置型ファジィナンバーモデルは従来までのファジィモデルと同じような形のモデルである。また速度型ファジィナンバーモデルは従来までのファジィモデルとは異なり、後件部が従来までの線形モデルの微係数となっている。よって速度型ファジィナンバーモデルのみでは出力の値そのものは推論できない。そこで位置型ファジィナンバーモデルと速度型ファジィナンバーモデルとを併用してシステムの出力の値を推論する。

ファジィナンバーモデルはルールベースでシステムを表現しているため、人間にとって線形式などで記述されたモデルより理解しやすいモデルであるといえる。しかし人間の知識レベルである言語によりモデルを表現すれば、さらに人間に理解しやすいモデルとなる。そこで言語モデルを本研究では提案する。

また本研究で提案するモデルの２つの適用例を示す。

2．ファジィナンバーモデルとその推論方法

2．1　多次元指数型メンバーシップ関数

従来までのファジィモデルにおいては、メンバーシップ関数により前件部空間を分割するのが一般的であった。その結果、前件部空間は、格子状に分割されていた。しかし、本研究では前件部空間の分割に、より自由度をもたせるために多次元指数型メンバーシップ関数を提案する。

多次元指数型メンバーシップ関数を設定するためには、初めに前件部空間に距離を定義しなければならない。そこで例えば、前件部変数が２変数（$x1$, $x2$）であるようなシステムに関して

$$\mathbf{x} = (x1, x2) \tag{1}$$

とし、２点

$$\mathbf{x}^i = (x1^i, x2^i) \tag{2}$$

$$\mathbf{x}^j = (x1^j, x2^j) \tag{3}$$

の距離

$$d(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j) = |x1^i - x1^j|^2 + |x2^i - x2^j|^2 \tag{4}$$

を定義する。

そこで本研究で提案する（X1, X2, R）により定義される多次元指数型メンバーシップ関数を

$$\mu_{(\mathbf{X}, R)}(\mathbf{x}) = 10^{-d(\mathbf{X}, \mathbf{x})/R} \tag{5}$$

$$\mathbf{X} = (X1, X2) \tag{6}$$

とする。

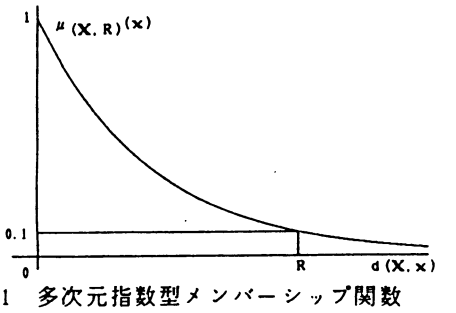


図1　多次元指数型メンバーシップ関数

この多次元指数型メンバーシップ関数は、図1に示すようにd(𝕏, 𝐱)の関数である。つまり、多次元指数型メンバーシップ関数は、d(𝕏, 𝐱)が大きいほどグレードが小さくなるメンバーシップ関数である。

2．2　位置型ファジィナンバーモデル

位置型ファジィナンバーモデルのルールの形は、前節で述べた多次元指数型メンバーシップ関数を用いて、

$$L^i \quad (X1^i,\ X2^i,\ R^i) \quad \rightarrow \quad y = Y^i \qquad (7)$$

となる。このルールは、

「もしx1が$X1^i$でx2が$X2^i$であれば

R^iの範囲でyはY^iである。」

と解釈することができる。ただし、R^iは式(5)の多次元指数型メンバーシッップ 関数の変数であるRに相当するものである。よって$(X1^i,\ X2^i,\ R^i)$により、L^iのルールの前件部空間が決まる。

次に、位置型ファジィナンバーモデルの同定アルゴリズムを述べる。ただし、ここでは説明を容易にするため、2入力1出力のシステムに関して述べる。

（1）データを正規化する

データが「近い」という感覚があうようにそれぞれの軸（x1軸、x2軸）に関してデータの尺縮を変える。

（2）データをベクトル表現する

（1）によって作成されたデータを次のものとする。

	x1	x2	y
1	$x1^1$	$x2^1$	y^1
⋮	⋮	⋮	⋮
i	$x1^i$	$x2^i$	y^i
⋮	⋮	⋮	⋮
n	$x1^n$	$x2^n$	y^n

（n：データ数）

ここで

$$\mathbf{x}^i = (x1^i,\ x2^i) \qquad (8)$$

とし、$\mathbf{x}^i$の全体集合Uとして

$$U = \{\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2, \cdots, \mathbf{x}^n\} \qquad (9)$$

を定義する。ただしデータ間の距離$d(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j)$は、式(4)で定義されるものとする。

（3）出力yの値を分割する

$$a_0 < a_1 < \cdots < a_p \qquad (10)$$

ただし $a_0 \leq \min_i y^i,\ \max_i y^i < a_p \qquad (11)$

を満たすように $a_0, a_1, \cdots, a_p$ を定める。また

$$A_k = \{\mathbf{x}^i \in U \mid a_{k-1} \leq y^i < a_k\} \qquad (k = 1, 2, \cdots, p) \qquad (12)$$

とする。

（4）重心を求める関数を定義する。

$G \subset U$

とし、$|G|$を集合Gの要素の個数とする。

集合Gの要素x1に関する重心を求める関数として

$$E_{x1}(G) = \frac{1}{|G|} \sum_{\mathbf{x}^i \in G} x1^i \qquad (13)$$

を定義する。また要素x2に関する重心を$E_{x2}(G)$とし、また集合Gに対応する出力yの重心を$E_y(G)$とし、それぞれ同様に定義する。

（5）ルールを作成する

（3）によって分割された各空間A_kについて

$(k=1, 2, \cdots, p)$

$$X1_k = E_{x1}(A_k) \qquad (14)$$

$$X2_k = E_{x2}(A_k) \qquad (15)$$

$$Y_k = E_y(A_k) \qquad (16)$$

を求める。そして

$$\mathbb{X}_k = (X1_k,\ X2_k) \qquad (17)$$

とし

$$R_k = \max_{\mathbf{x}^i \in A_k} d(\mathbb{X}_k, \mathbf{x}^i) \qquad (18)$$

とする。また

$$S_{R_k}(\mathbb{X}_k) = \{\mathbf{x}^i \in U \mid d(\mathbb{X}_k, \mathbf{x}^i) \leq R_k\} \qquad (19)$$

とする。

（6）評価関数を設定しルールを評価する

ルールが適切なものであるかを評価するための評価関数Errorを設定する。例えばErrorとして

$$\mathrm{Error}(\mathbb{X}_k, R_k, Y_k, A_k) = \sum_{\mathbf{x}^i \in S_{R_k}(\mathbb{X}_k)} \{|y^i - Y_k| \times \mu_{(\mathbb{X}_k,\ R_k)}(\mathbf{x}^i)\} \qquad (20)$$

を設定する。そして評価関数Errorが評価値Crより小さい場合

$$(X1_k,\ X2_k,\ R_k) \quad \rightarrow \quad y = Y_k \qquad (21)$$

というルールができる。

もし評価関数が評価値Crより大きい場合には

$$\max_{A_k} x1 = \max_{\mathbf{x}^i \in A_k} x1^i \qquad (22)$$

$$\min_{A_k} x1 = \min_{\mathbf{x}^i \in A_k} x1^i \qquad (23)$$

とし $\max_{A_k} x2$, $\min_{A_k} x2$ に関しても同様に定義する。また

$$dx1(A_k) = \max_{A_k} x1 - \min_{A_k} x1 \qquad (24)$$

$$dx2(A_k) = \max_{A_k} x2 - \min_{A_k} x2 \qquad (25)$$

とする。そしてもし

(i) $dx1(A_k) \geq dx2(A_k)$ のとき

$$A_{k+} = \{\mathbf{x}^i \in A_k \mid x1 \leq \min_{A_k} x1 + \frac{dx1(A_k)}{2}\} \qquad (26)$$

$$A_{k-} = \{\mathbf{x}^i \in A_k \mid x1 > \min_{A_k} x1 + \frac{dx1(A_k)}{2}\} \qquad (27)$$

でもし

(ii) $dx1(A_k) < dx2(A_k)$ のとき

$$A_{k+} = \{\mathbf{x}^i \in A_k \mid x1 \leq \min_{A_k} x2 + \frac{dx2(A_k)}{2}\} \qquad (28)$$

$$A_{k-} = \{x^i \in A_k \mid x1 > \min_{A_k} x2 + \frac{dx2(A_k)}{2}\} \quad (29)$$

としA_{k+}とA_{k-}を定義する。

そしてA_{k+}とA_{k-}を新たにそれぞれをA_kとみなし（5）へもどり評価関数が評価値Crより小さくなるまで実行する。

2．3　速度型ファジィナンバーモデル

速度型ファジィナンバーモデルのルールの形は、多次元指数型メンバーシップ関数を用いて、

$$VL1^i \ (X1^i, X2^i, R^i) \rightarrow \frac{\partial y}{\partial x1} = \frac{\partial y^i}{\partial x1} \quad (30)$$

と表現できる。このルールは、

$VL1^i$「もしx1が$X1^i$でx2が$X2^i$であれば

R^iの範囲でx1が増加すればyは大きく増加する」

などと解釈することができる。

次に、速度型ファジィナンバーモデルの同定アルゴリズムについて述べる。はじめに前件部空間内に充分な数のサンプル点をとる。そして、そのサンプル点における微係数を重み付き最小2乗法などによって求める[2]。その後は位置型ファジィナンバーモデルと同様の方法でルールを作成する。

速度型ファジィナンバーモデルの特徴として

（1）速度型ファジィナンバーモデルのルールだけでは、出力値yを推論することはできない。

（2）データの傾向をつかむためには、位置型ファジィナンバーモデルよりすぐれている。

などがある。

2．4　推論方法

ここでは、位置型ファジィナンバーモデルのみで推論する方法と、位置型ファジィナンバーモデルと速度型ファジィナンバーモデルの両方を使って推論する方法の2通りの推論方法を提案する。

<u>◦位置型ファジィナンバーモデルのみでの推論方法</u>

$$\boldsymbol{x} = (x1, x2) \quad (31)$$

上式で定義された入力$\boldsymbol{x}$に対する推論値を$\hat{y}$とすると

$$\hat{y} = \Sigma_1 (wi \times Y^i) / \Sigma_1 wi \quad (32)$$

$$wi = \mu_{(X, R)}(\boldsymbol{x}) \quad (33)$$

となる。

<u>◦位置型ファジィナンバーモデルと速度型ファジィナンバーモデルとを併用した場合の推論方法</u>

式(31)で定義された入力に対してその推論値を$\hat{y}$とする。そして、その入力に対する位置型ファジィナンバーモデルのそれぞれのルールでのグレードの最大値をMatchingとすると

$$\text{Matching} = \max_i \ wi \quad (0 < \text{Matching} \leq 1) \quad (34)$$

となる。ただしwiは、式(33)で定義されたものである。そして、Matchingの値がある値（M）以上ならば位置型ファジィナンバーモデルのみで推論を行ない、Matchingの値がMより小さい場合には、位置型ファジィナンバーモデルのみでは、$\hat{y}$を推論するのが困難であると判断する。そこで、次のようなアルゴリズムで推論する。位置型ファジィナンバーモデルで入力$\boldsymbol{x}$に対し式(34)の最大グレードを与えたルールをL^kとする。以下ここでは、説明を簡単にするために

$$X1^k < x1, \ X2^k < x2 \quad (35)$$

とする。ただし、式(35)を満たさない場合も同様に推論することができる。次に

区間（$X1^k$, x1）をm個に分割し、その分割点を

$x1,0 (= X1^k)$, $x1,1$, $x1,2$, ・・・

・・・, $x1,m (= x1)$

$(x1,0 < x1,1 < \cdots < x1,m)$

とする。また、同様にして

区間（$X2^k$, x2）をn個に分割し、その分割点を

$x2,0 (= X2^k)$, $x2,1$, $x2,2$, ・・・

・・・, $x2,n (= x2)$

$(x2,0 < x2,1 < \cdots < x2,n)$

とする。ここでは、説明を簡単にするためn＝m＝2の場合（図2）について述べる。

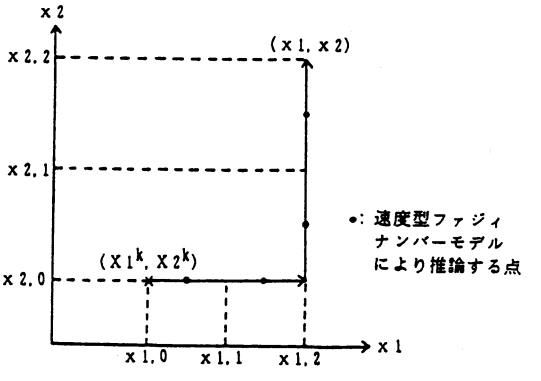


図2　速度型ファジィナンバーモデルを用いた推論方法

入力（x1, x2）での出力yの推論値$\hat{y}$は

$$\hat{y} = Y^k + (\frac{\partial \hat{y}}{\partial x1})_1 \times dx1_1 + (\frac{\partial \hat{y}}{\partial x1})_2 \times dx1_2 + (\frac{\partial \hat{y}}{\partial x2})_1 \times dx2_1 + (\frac{\partial \hat{y}}{\partial x2})_2 \times dx2_2 \quad (36)$$

ただし

$$dxi_j = xi,j - xi,(j-1) \quad (i=1,2) \ (j=1,2) \quad (37)$$

$(\frac{\partial \hat{y}}{\partial x1})_i$は$(\frac{x1,i + x1,(i-1)}{2}, X2^k)$での$(\frac{\partial y}{\partial x1})$の推論値　(i=1,2)

$(\frac{\partial \hat{y}}{\partial x2})_i$は$(x1, \frac{x2,i + x2,(i-1)}{2})$での$(\frac{\partial y}{\partial x2})$の推論値　(i=1,2)

となる。ただしn，mの値を大きくとればとるほど推論値は正確になると予想される。

2．5　従来までのファジィモデルとの比較

従来までのファジィモデルは、大きく分けて2つのものが存在する。1つは、後件部がファジィ集合で表現されたファジィモデルである。しかし、最近は計算が簡単である簡略化ファジィ推論を用いることにより、前件部のみファジィ集合で、後件部は実数値である場合が多い。また、もう1つのファジィモデルは、後件部が線形式のものである。一般に後件部線形式のファジィモデルの方が後件部が実数値であるファジィモデルよりも記述能力が高いと言われている[3]。しかし、この後件部線形式のファジィモデルは1つの位置型ファジィナンバーモデルと2つの速度型ファジィナンバーモデルで記述する事が可能である。従って本研究で提案するファジィナンバーモデルは、従来までのファジィモデルよりも記述能力が高いといえる。

次に従来までのファジィモデルの同定法と、位置型ファジィナンバーモデルの同定法の違いについて述べる。ファジィモデルの同定法について多く研究がなされているが、その多くは次に示すようなアルゴリズムである。

（1）前件部空間を前件部変数のラベルにあうように、または前件部変数のデータをクラスタリングすることにより、前件部空間を適当に分割する。

（2）それぞれの前件部空間に対し後件部の値を調整することにより同定を行なう。

本研究で提案するファジィナンバーモデルの同定法は、従来までの同定法とは異なり大まかに述べると次のようなアルゴリズムである。

（1）後件部の値を適当に分割する。

（2）後件部の値にあうような、前件部空間をメンバーシップ関数により分割する。

従来までの同定法とは、逆の方法である。

3．言語モデル

位置型ファジィナンバーモデルを言語化するアルゴリズムについて述べる。速度型ファジィナンバーモデルも同様の方法で行なうことが可能である。

（1）メンバーシップ関数で言語を表現する。

システムへの入力（x1，x2）、システムの出力yについて言語ラベルを設定し、そのメンバーシップ関数を定義する。入力x1，x2，出力yの言語ラベルをそれぞれ

$$\mathcal{X}1_1,\ \mathcal{X}1_2,\ \cdots,\ \mathcal{X}1_K$$

$$\mathcal{X}2_1,\ \mathcal{X}2_2,\ \cdots,\ \mathcal{X}2_L$$

$$\mathcal{Y}_1,\ \mathcal{Y}_2,\ \cdots,\ \mathcal{Y}_M$$

とし、そのメンバーシップ関数をそれぞれ定義する。

（2）ファジィナンバーモデルの数値を言語ラベルのベクトルで表現する。

ファジィナンバーモデルのi番目のルールが式(7)で表現されているとき、次のベクトルにルールを変換する。

$$p^i_{x1}=[\mu_{\mathcal{X}1_1}(X1^i),\ \mu_{\mathcal{X}1_2}(X1^i),\ \cdots,\ \mu_{\mathcal{X}1_K}(X1^i)] \tag{38}$$

$$p^i_{x2}=[\mu_{\mathcal{X}2_1}(X2^i),\ \mu_{\mathcal{X}2_2}(X2^i),\ \cdots,\ \mu_{\mathcal{X}2_L}(X2^i)] \tag{39}$$

$$p^i_{y}=[\mu_{\mathcal{Y}_1}(Y^i),\ \mu_{\mathcal{Y}_2}(Y^i),\ \cdots,\ \mu_{\mathcal{Y}_M}(Y^i)] \tag{40}$$

（3）数値に言語ラベルを対応づける。

もっとも大きいグレードを持つ言語ラベルをその数値$X1^i$，$X2^i$，Y^iに対応する言語ラベルとする。つまりi番目のルールにおける$X1^i$，$X2^i$，Y^iのラベルをそれぞれ$\mathcal{X}1^i$，$\mathcal{X}2^i$，y^iとする。

よってi番目のルールの言語ルールは

L^i：「x1が$\mathcal{X}1^i$でx2が$\mathcal{X}2^i$のときyは$\mathcal{Y}^i$である」

となる。

（4）ルールの縮約

（1）－（3）までのアルゴリズムで作成された言語モデルは、ファジィナンバーモデルの数値に言語ラベルを付けただけなので、ファジィナンバーモデルのルールの数と（3）でできた言語モデルのルールの数は同じである。よって同じ言語ルールが存在したり、矛盾するルールが存在したりする。そこで、その対策として次のような方法を提案する。

（4．a）同じ言語ルールがあった場合

同じ言語ルールは1つのルールとみなす。

（4．b）矛盾するルールがあった場合

本節で述べる矛盾するルールとは、入力変数の言語ラベルが同じで出力変数の言語ラベルが異なっている言語ルールのことをいう。

矛盾する言語ルールの入力変数x1，x2の言語ラベルをそれぞれ$\mathcal{X}1^c$，$\mathcal{X}2^c$とする。

$\mathcal{X}1^c$メンバーシップ関数を図3で示すように

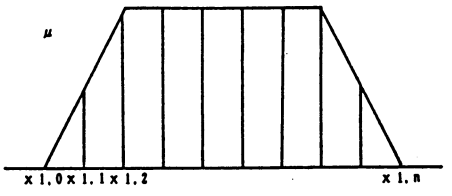


図3　メンバーシップ関数の分割

n個に分割する。同様に$\mathcal{X}2^c$のメンバーシップ関数もm個に分割する。そしてx1が$\mathcal{X}1^c$、x2が$\mathcal{X}2^c$であるときの出力の言語ラベルを決定するために、

$$p_y=\sum_i\sum_j\sum_k(\mu_{(\mathbb{X}^k,R^k)}(x1,i,x2,j)\times\mu_{\mathcal{X}1^c}(x1,i)\times\mu_{\mathcal{X}2^c}(x2,j)\times p^k_y) \tag{41}$$

を求める。そして

$$p_y=[\,p_1^{\mathcal{Y}_1},\ p_2^{\mathcal{Y}_2},\ \cdots\cdots,\ p_M^{\mathcal{Y}_M}\,] \tag{42}$$

とする。そこでp_yの要素の中での最大値をPmaxとしその最大値を与える言語ラベルを入力が$\mathcal{X}1^c$，$\mathcal{X}2^c$である空間の出力の言語ラベル$\mathcal{Y}^c$とする。そして

$$P'max=Pmax/\left(\sum_{i=1}^{M}p_i\right) \tag{43}$$

とし、P'maxの値によって修飾語をつける。例えば

0.8 ≦ P'max < 1.0

：．．．である。（断言する）

0.6 ≦ P'max < 0.8
: ．．．である場合が多い。
0.4 ≦ P'max < 0.6
:．．．である場合が多いが他の場合もある。
P'max < 0.4
:よくわからない。
などとする。例えばP'max＝０．７のとき
「ｘ1が$\mathcal{X}1^C$でｘ2が$\mathcal{X}2^C$のとき
ｙは$\mathcal{Y}^C$である場合が多い」
となる。
（４．ｂ）のアルゴリズムをすべての矛盾する言語ルールのある前件部空間について行なう。

４．適用例

４．１　ガス燃焼炉モデル[4]

ガス燃焼炉モデルは、ファジィモデリングの研究において同定の適用例として多く用いられている[5][6][7]。よって、従来までのファジィモデルと比較するために、本研究における同定方法で同じデータ(296個)を使って実際に同定をおこなった。
同定された位置型ファジィナンバーモデルの前件部空間を図4に示す。

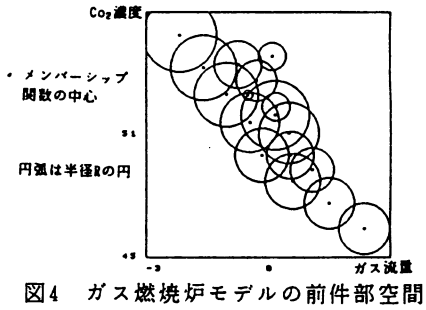


図4　ガス燃焼炉モデルの前件部空間

しかし速度型ファジィナンバーモデルには、不必要なルールが多く含まれる場合がある。これは入力データが偏っているために起きるものである。よって人間の常識をもとにして不必要なルールや後件部の値が妥当でないルールを省いたもので同定した。
次にファジィナンバーモデルと他のファジィモデルとの精度の比較を行なう。評価関数として次式を用いて評価する。

$$J = \frac{1}{n} \Sigma \left(y(t) - \hat{y}(t) \right)^2 \qquad (44)$$

$\hat{y}(t)$：推論値　$y(t)$：実際の出力値　n：データ数

その結果表1のようになった。

表1　他のファジィモデルとの比較

	J	ルール数
Tong's model	0.469	19
Pedrycz's model	0.320	81
Xu's model	0.328	25
位置型モデル	0.198	17
位置型モデル + (M=0.5) 速度型モデル	0.178	17 + 4

４．２　コンピュータゲームのモデリング

本節では、図5に示すようなゲームをする被験者の動作のモデリングを行なった。このようなゲームを選んだ理由として、作成されたルールと被験者の意見とがあっているかどうかを、直感的に評価しやすいためなどがある。被験者への入力情報としてボールの初期位置ｘとボールの初期角度の正接であるtanθの２入力と仮定した。そして出力としてボールが被験者に見えない部分から出て、見えた瞬間のラケットの位置とした。

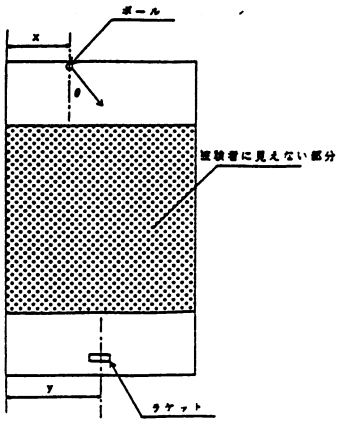


図5　ゲームの概略図

任意の入力に対する被験者の出力を測定し、それらのデータから位置型ファジィナンバーモデルを同定した。また、２種類の速度型ファジィナンバーモデルも同様に同定した。そして位置型ファジィナンバーモデルを図6に示すメンバーシップ関数で定義された言語モデルへ変換すると表2のような位置型言語モデルになる。同様に２種類の速度型ファジィナンバーモデルの１つを、図7に示すメンバーシップ関数で定義された言語モデルに変換すると表3のような速度型言語モデルとなる。

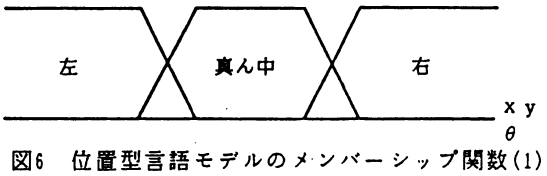


図6　位置型言語モデルのメンバーシップ関数(1)

表2　ゲームの位置型言語モデル(1)

1. ボールが左から左方向へ落ちてきたときラケットは真ん中でまっている。
2. ボールが真ん中から左方向へ落ちてきたときラケットは左でまっている。
3. ボールが右から左方向へ落ちてきたときラケットは左でまっている。
4. ボールが左からまっすぐ落ちてきたときラケットは左でまっている場合が多い。
5. ボールが左から右方向へ落ちてきたときラケットは右でまっている場合が多い。
6. ボールが真ん中からまっすぐ落ちてきたときラケットの位置はよくわからない。
7. ボールが真ん中から右方向へ落ちてきたときラケットは右でまっている場合が多いが他の場合もある。
8. ボールが右からまっすぐ落ちてきたときラケットは右でまっている場合が多いが他の場合もある。
9. ボールが右から右方向へ落ちてきたときラケットは右でまっている場合が多いが他の場合もある。

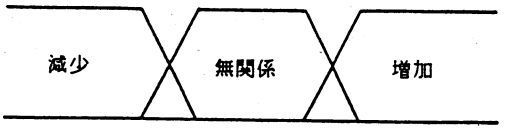


図7　速度型言語モデルのメンバーシップ関数

表3　ゲームの速度型言語モデル

1. ボールが左から左方向へ落ちてくるときはボールの落ちてくる方向の傾きが緩やかになればなるほどラケットのまっている位置は左の方へ移動していく。
2. ボールが右から右方向へ落ちてくるときはボールの落ちてくる方向の傾きが緩やかになればなるほどラケットのまっている位置は右の方へ移動していく。
3. ボールが左からまっすぐ落ちてくるときはボールの落ちてくる方向の傾きが右へ向けばむくほどラケットのまっている位置は右の方へ移動していく場合が多い。
4. ボールが真ん中から左へ落ちてくるときはよくわからない。
5. ボールが真ん中から右方向へ落ちてくるときはボールの落ちてくる方向の傾きが緩やかになればなるほどラケットのまっている位置は右の方へ移動していく場合が多いが他の場合もある。
6. ボールが右からまっすぐ落ちてくるときはボールの落ちてくる方向の傾きが右へ向けばむくほどラケットのまっている位置は左の方へ移動していく場合が多いが他の場合もある。

表2で位置型言語モデルへ変換したが、ルールの数が多すぎて、人間にとって理解しにくい場合がある。その際は、図8のメンバーシップ関数によって定義された言語ラベルを使うことにより、より少ないルールでモデルを位置型言語モデルにより表現することができる。その結果を表4に示す。

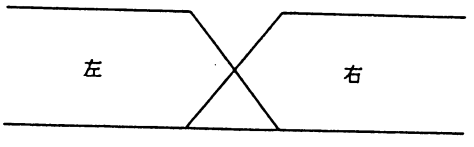


図8　位置型言語モデルのメンバーシップ関数(2)

表4　ゲームの位置型言語モデル(2)

1. ボールが左から左方向へ落ちてきたときラケットは左でまっている。
2. ボールが左から右方向へ落ちてきたときラケットは右でまっている場合が多いが他の場合もある。
3. ボールが右から左方向へ落ちてきたときラケットは左でまっている場合が多いが他の場合もある。
4. ボールが右から右方向へ落ちてきたときラケットは右でまっている。

当然、下手な被験者からえられたデータをモデリングすれば下手な被験者のルールができるし、逆に上手な被験者からえられたデータをモデリングすれば、上手な被験者のルールができる。また上手な被験者になればなるほどルールが左右対称なルールとなり前件部空間の分割も対称となることがわかっている。

4．3　考察

ファジィナンバーモデルは、表1に示すように従来までのファジィモデルとほぼ同じルール数によって良い精度で同定できた。これは従来までのメンバーシップ関数に代わって、前件部空間を表現することにおいて自由度が大きい多次元指数型メンバーシップ関数でモデルを表現したことによると思われる。

またゲームのモデリングにおいては、本研究で提案したアルゴリズムを用いることにより、人間によって主観的に決定されたメンバーシップ関数に基づき、数値データを言語モデルに変換することができた。また、この言語モデルは被験者の感覚にあったモデルであった。

5．結論

本研究において、多次元指数型メンバーシップ関数によるファジィナンバーモデルと、そのファジィナンバーモデルを人間が理解するための言語モデルを提案し、その同定方法について述べた。またその適用例についても示すことにより、従来までのファジィモデルとの比較を行なった。

以上より、次のような結果を得た。

1．多次元指数型メンバーシップ関数は従来までのメンバーシップ関数より前件部空間を表現するのに優れていることがわかった。

2．本論文で提案するファジィナンバーモデルは、従来までのファジィモデルよりシステムの記述能力が高い。そのため従来までのファジィモデルより精度良くモデリングする事が可能である。

3．人間が主観的なメンバーシップ関数で定義した言語ラベルによってシステムを表現することができた。

4．ファジィナンバーモデル及び言語モデルの適用例においてこれらの同定法の有効性を示した。つまりファジィナンバーモデルにおいては、他のファジィモデルより精度の良いルールが同定された。また言語モデルにおいては、従来までのファジィモデルよりも、人間にとって理解しやすいモデルが作成された。

参考文献

(1)相良ら:「システム同定」計測自動制御学会(1981)
(2)奥野ら:「多変量解析法」日科技連(1971)
(3)菅野:「ファジィ制御」日刊工業新聞社(1988)
(4) G.E.P. Box and Jenkins : "Time Series Analysis, forcasting and Control"
(Holden Day, San Francisco, 1970)
(5)R.M.Tong: The evaluation of fuzzy models derived from experimental data,
Fuzzy Sets and Systems 4 (1978) 1-12
(6)W.Pedrycz: An identification algorithm in fuzzy relation systems,
Fuzzy Sets and Systems 13 (1984) 153-167
(7)Chen-Wei Xu et al: Fuzzy Model Identification and Self-Learning for Dynamic Systems,
IEEE S.M.C. 17 No.4 (1987) 683-689
(8)小沢:ファジィ理論を用いた数値情報の言語モデリング，東京工業大学修士論文(1990)

問い合わせ先：〒227　横浜市緑区長津田町4259
東京工業大学　システム科学専攻　菅野研究室
小沢　順　Tel　045-922-1111　EXT.2645

TC4-2

最適モデルを用いたファジィデータベース検索のための自然言語インタフェース

Natural Language Interface by Optimization Model for Fuzzy Data Base Retrieval

前田 博
Hiroshi MAEDA

石飛 康浩
Yasuhiro ISHITOBI

九州工業大学工学部
Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

富士ゼロックス（株）
FUJI XEROX Corp.

Abstract: This paper copes with database retrieval by natural language query with fuzzy expressions. The autors propose some simple methods to extract informations for detabase retrieval from the natural language (Japanese language) query. Those are mainly composed of Hirakana-retrieval dictionary, fuzzy set expression dictionary, fuzzy modifyer dictionary, and optimization model by 0-1 integer programming.

1. はじめに

あいまいな環境下の多目的意思決定問題に対する規範的意思決定手法として、筆者らはファジィ理論に基づいたファジィ意思決定手法[1) 2)]を提案した。その後、この手法を核とした対話型ファジィ意思決定支援システム（ＦＤＳＳ）[3)]の開発を進めてきた。ＦＤＳＳでは、予備知識を持たない一般ユーザーにとって好ましく、将来的なマンマシンインタフェースの研究という意味からも、自然言語対話方式を取り入れようとしている。今回、データベース検索機能を加え、代替案の絞り込みや、代替案評価時における参照データの検索を可能にした。そのために、ＦＤＳＳは、ファジィ意思決定手法、データベース検索、自然言語処理、マンマシンインタフェースの主要素から構成されることになり、本論文は、データベース検索、自然言語処理に係わる自然言語問い合わせによるデータベースのファジィ検索について述べたものである。

これを実現するためには、３種類のあいまいさを処理する必要がある。第一は、「給料の良い会社」と言った検索条件のあいまいさ、第二、第三は、自然言語処理に関するあいまいさであり、前者は問い合わせ文の解釈に関するあいまいさ、後者は、例えば給料、賃金、給与、と言った同一検索項目に対する表現の多様性に依存するあいまいさである。第一についてはファジィ集合理論を適用する。第二については、問い合わせ文中の平仮名のみを検索する平仮名検索辞書と０－１計画法という最適モデルを組み合わせた自然言語問い合わせ文解析手法を提案する。これは、平仮名検索から問い合わせ文の意味解釈を幾通りか推定し、最適モデルによって一つを確定するという方式である。これによって、膨大な自立語辞書を持つ必要がなく、自然言語処理の負荷が小さくなり、ＦＤＳＳ全体の操作性や応答性に寄与している。第三については、シソーラス、語の部分マッチング、ファジィ推論を総合した未登録語の推定手法[3)]をすでに提案した。

第２章では、自然言語問い合わせ文の範囲、制約を明かにする。そして、データベース検索に適した形式言語を定義し、自然言語問い合わせ文と対応づける。第３章では、問い合わせ文からデータベース検索に必要な情報を抽出するための自然言語処理について述べる。第４章では、データベースとその検索処理について述べ、第５章が結論となる。

2. 自然言語問い合わせ文と形式言語

2.1 自然言語問い合わせ文

まず、問い合わせ文中に含まれる様々な検索情報を次のように定義する。

１）検索対象(E):検索要求によって特徴ずけられ、最終的に出力される対象。
２）検索属性(T):検索対象を特徴ずける種々の属性。
３）比較演算子(R):検索対象間の関係。
４）比較の対象(O):比較演算子における比較の対象。
５）ファジィ集合(F):検索属性上で使われるあいまいな語。
６）ファジィ修飾詞(M):比較演算子、ファジィ集合を修飾するあいまいな語。
７）否定(N):否定を表す語。
８）並列語(LW):検索属性、比較の対象を複数接続させる語。

このような検索情報を問い合わせ文から抽出するための自然言語処理は、システム全体の操作性や応答性を考慮して、以下の制約と指針の基に設計されている。

１）辞書をできる限り小さくするために、平仮名のみを検索する平仮名検索辞書を開発し、一部を除いては自立語辞書を持たない。未知語の出現に対しては、安易にユーザーに再入力を促すのではなく、できる限りシステムがその意味を推定する[3)]。
２）問い合わせ文は、漢字仮名混じりで書かれた平易な（倒置法など用いない）文であり、以下の制約のみ課す。一つの問い合わせ文は句点「。」で終了を表す。重文による複合問い合わせ文は、接続語の前に必ず読点「、」を置く。従って、単文中では読点を接続語として使わない。
３）検索属性は、その文字列の中に少なくとも一つの非平仮名文字を含んでいる。すなわち、検索属性が平仮名列のみの語であれば、検索できない。
４）事例として、企業の就職情報を扱う。データベースの対象分野が変われば、それに依存する部分のみを交換するだけで対応可能とする。すなわち、モジュール化設計とする。
５）一般に、任意の検索属性は検索対象となり得る。しかし、本論文では検索対象が一つ（企業名）に限定されている場合を述べる。これは、データベース機能が代替案（就職先すなわち企業名）の絞り込みを主目的にしているためであるが、後述するように検索対象は容易に任意の検索属性に拡張することができる。

2.2 形式言語

形式言語とは、自然言語問い合わせ文からデータベース検索に必要な情報だけを抽出し、それらを形式化した中間表現である。これは、上記の８個の検索情報のうち、特定された検索対象(E)を除く７項目の組Q(T,R,O,M,F,N,LW)で定義される。問い合わせ文中に、該当する情報が存在すればその記号を、存在しなければ記号φを代入するとすれば、形式言語と自然言語問い合わせ文は例えば、以下のように対応する。

(1)検索属性のみ存在する。
Q(T,φ,φ,φ,F,φ,φ):「採用校が指定されている。」
(2)検索属性とファジィ集合が存在する。

Q(T,φ,φ,φ,F,φ,φ):「給料が良い。」
(3)検索属性、ファジィ修飾詞、ファジィ集合が存在する。
Q(T,φ,φ,M,F,φ,φ):「給料が極めて高い。」
(4)検索属性、比較演算子、比較の対象が存在する。
Q(T,R,O,φ,φ,φ,φ):「給料がA社より高い。」
(5)検索属性、比較演算子、比較の対象、ファジィ修飾詞が存在する。
Q(T,R,O,M,φ,φ,φ):「給料がA社よりかなり高い。」
更に否定N、並列語LWが各々に存在できる。(1)では、「いる」が存在、を表すファジィ集合の特別な場合として扱われる。

3. 問い合わせ文の解析

3.1 辞書

自然言語処理では、自立語辞書の変わりに、中心となる平仮名検索辞書、ファジィ集合辞書、ファジィ修飾詞辞書、接続語辞書、不要語辞書の5種類の辞書を用いている。

（1）平仮名検索辞書

問い合わせ文を、非平仮名と平仮名の字種の変わり目で字種切りすると、非平仮名列と平仮名列が交互に現れる。形式言語中の各項目が問い合わせ文中に存在する時に、全ての平仮名と各項目との関係を記述し、現在検索している平仮名、あるいは平仮名列の処理方法と、それが付随する、あるいは、それを一部に含む文字列の意味を記述したものが平仮名検索辞書である。

平仮名検索辞書は五十音とその濁音および破裂音の全てについて記述されており、その内容について、問い合わせ文中によく出てくる「が」をFig.1に示しながら説明する。辞書では、平仮名の文法的な役割やそれに応じた文字列の処理などが以下の記号を用いて記述されている。

X:非平仮名列、x:非平仮名1文字、Y:平仮名列、y:平仮名1文字、Z:文字列、z:1文字、AND:連言語、OR:選言語、D:不要語、NO:格助詞「の」による連体修飾語、U:未知語、B:”検索中の語の直前”を意味する。b:”検索中の語の前”を意味する。A:”検索中の語の直後”を意味する。a:”検索中の語の後”を意味する。*:文字を結合する、:属する、|:OR結合、&:AND結合、!:存在しない、←:右を左に代入する、=:右と左が一致する、-:左から右を削除する、( ): 条件文、{ }:形式言語の項目の代入、[ ]:次の処理平仮 名列の探索、<> :繰り返し処理、 HIRADIC: 平仮名検索 辞書、 DIC2:ファジィ集合（比較演算 子）辞 書、DIC3:フ ァジィ修飾詞辞書、ANDDIC:連言接続 語辞 書、ORDIC:選言 接続語辞書。

「が」
①(Bz=x)&(BZ=NO){T←NO*BX}<(bX=LW){T←LW}>[Y←Y-y]
②(Bz=x){T←BX}<(bX=LW){T←LW}>[Y←Y-y]
③(BZ=U)&(BZ=!Y)&(bZ=NO){T←NO*BZ}<(bX=LW){T←LW}>[Y←Y-y]
④(BZ=U)&(BZ=!Y){T←BZ}<(bX=LW){T←LW}>[Y←Y-y]
⑤(Ay="な"|Ay="ず"){N←y*Ay}[Y←Y-y*Ay]
⑥(Y DIC3){M←J}[Y←Y-J]
⑦(Bz=y){U←y}[Y←Y-y]

Fig.1 Example of Hirakana-dictionary, 「が」.

辞書内容には、以下のことが記述されている。
① 「が」の直前の1文字が非平仮名でかつ直前の文字列に連体修飾語があれば、連体修飾語を結合した直前の非平仮名列を検索属性とおけ。前の非平仮名列が接続語で結合されていれば、それも検索属性とし、この処理を全ての接続語について繰り返す。そして、検索中の平仮名列から「が」を除き、平仮名列を更新せよ。
② ①の内容から連体修飾語に関する条件を除いた。
③ 「が」の直前の文字列が未知語でかつ直前の文字列が平仮名列でなく、前に連体修飾語があれば、連体修飾語を結合した直前の文字列を検索属性とおけ。前の非平仮名列が接続語で結合されていれば、それも検索属性とし、この処理を全ての接続語について繰り返す。そして、検索中の平仮名列から「が」を除き、平仮名列を更新せよ。
④ ③の内容から連体修飾語に関する条件を除いた。
⑤ 「が」の直後の1文字が「な」あるいは「ず」であれば、「が」と直後の平仮名1文字を結合して否定と置き、それを検索中の平仮名文字列から除き、平仮名列を更新せよ。
⑥ 「が」を先頭にした検索対象平仮名列の全部あるいは一部がファジィ修飾詞辞書にあれば、その文字列をファジィ修飾詞とし、平仮名列を更新せよ。
⑦ 「が」の直前の1文字が平仮名で、以上の条件が満たされなければ「が」の意味は未知とし、平仮名列を更新せよ。

①から⑤は、主格を表す格助詞「が」が問い合わせ文中で用いられる全ての場合を、記述している。⑥では、「が」から始まる平仮名のファジィ修飾詞が辞書にあるかどうかを調べている。⑦は、いずれの条件も満たさなければ未知語として扱われることを示している。

（2）ファジィ集合（比較演算子）辞書

問い合わせ文中に現れ、検索情報となり得るあいまいな語を集めた辞書である。主に形容詞が多く、活用語尾の五十音順にその語幹と共に登録されている。これらの語は、比較の対象を伴うか、伴わないかによって、問い合わせ文中の役割が異なる。前者は、「給料がA社より良い。」のように、比較演算子となり、後者は、「給料が良い。」のように、ファジィ集合となる。ファジィ集合を表す語は、台集合の3分割パターン（例えば、大きい、普通の、小さい）に分類しており、各パターンを表す記号、">"、"≒"、"<"、も付されている。また、パターン、"≒"、では、クリスプなシングルトンも特別な場合として含み、それに対応する表現には、記号、"="、を付している。これらの記号は、語が比較演算子として用いられた場合の演算内容も、同時に表している。

（3）ファジィ修飾詞辞書

ファジィ集合を表す語を修飾する語を集めた辞書で、主に副詞で構成されている。修飾する度合いで3レベルに分類され、度合いの小さい順に、1、2、3の数字が付されている。

（4）接続語辞書

接続語として用いられる表現を集めた辞書で、連言表現と選言表現に分けている。接続助詞、「と」、「や」などは、1文字であるので、平仮名検索辞書に直接記述されている。

（5）不要語辞書

データベースの対象としている分野に依存して問い合わせ文中に現れる語、及び人称代名詞などの一般語で、検索属性に成り得ない語を集めた辞書である。ここでは、検索対象が企業名であるので、「企業」、「会社」、「職員」、「社員」、「私」、「自分」、「俺」、「僕」、などが登録されている。データベースの対象分野や検索対象が変わることに対しては、この辞書を変更することで対応できる。

3.2 自然言語処理

一般的な自然言語処理は、形態素解析、構文解析、意味解析から構成される。本論文においても、変形されてはいるがこの処理過程を踏んでいる。形態素解析は、入力文が漢字仮名混じり文を前提としているため、字種の変わり目での切断という簡便な方法を用いている。構文解析は、新たに開発した平仮名検索辞書を参照し、問い合わせ文を可能な全ての形式言語候補に変換する処理に対応する。最後に、意味解析は、複数の形式言語候補から最適な一つの形式言語を確定する処理に対応している。本論文における自然言語処理は、以上の内容と前処理を含

めた以下の５ステップから成る。
Step 1)字種切り。入力文を字種の変わり目（非平仮名から平仮名、平仮名から非平仮名）で切断し、字種切りを行う。
Step 2)複合文の単文分解。複合問い合わせ文は、単一問い合わせ文間の接続関係（連言、選言、含意）を調べ、複数の単一問い合わせ文に分解する。
Step 3)不要語除去。各単文について、不要語を検索し、記号Ｄに置き換える。
Step 4)平仮名検索。平仮名文字列の先頭の文字から終端まで順に、平仮名検索辞書を参照し、辞書に記述された処理を行う。この時、各平仮名文字に対して、可能な場合の全てについて処理がなされる。辞書内のどの条件にも適合しない場合は、未知語Ｕとして扱われる。
Step 5)形式言語の確定。複数の形式言語候補に対して、最適モデルを適用して一つの形式言語を確定する。

3.3 最適モデル

前向き探索のみを行う平仮名検索は、問い合わせ文に対して、複数の形式言語候補を生じさせる。この中から、最も合理的な形式言語を一意に決定するための０－１計画法を用いた最適モデルを提案する。最適モデルは、問い合わせ文の平易性を前提とし、形式言語の各項目の存在条件や、項目間の位置関係（語順）を制約条件として、問い合わせ文の持つ情報を最大にすると言う基準で定式化されている。

問い合わせ文から、n個の文字列が検索情報として切り出されたとし、i番目の文字列をSiとする。形式言語の７項目から接続語情報を除く（接続された語の一つの役割が分かれば十分である）６項目、及び新たに未知項目Uを加えた７項目、T、R、O、M、F、N、U、の順にj=1～7とする。文字列Siが、形式言語のj番目の項目に当てはまる時の0-1変数Xij(i=1～n, j=1～7)を導入する。すなわち、

$$Xij=1,\ (Siがj番目の項目に当てはまる場合) \qquad (1)$$
$$0,\ (それ以外の場合)$$

となり、これらについて以下の制約条件が考えられる。

１）各文字列Si(i=1～n)には必ず一つの項目が当てはまる。

$$\sum_{j=1}^{7} Xij=1,\ (i=1～n) \qquad (2)$$

２）未知項目U以外は高々一つの文字列しか当てはまらない。

$$\sum_{i=1}^{n} Xij \leqq 1,\ (j=1～6) \qquad (3)$$

３）検索項目Tは必ず一つ存在する。

$$\sum_{i=1}^{n} Xi1=1 \qquad (4)$$

４）比較演算子Rと比較の対象Oは必ず同時に存在し、OがRより前に存在する。

$$\sum_{i=1}^{k} Xi3 - \sum_{i=k+1}^{n} Xi2 =0,\ Xk3=1 \qquad (5)$$

５）比較演算子Rとファジィ集合Fは同時に存在しない。

$$\sum_{i=1}^{n} Xi2 + \sum_{i=1}^{n} Xi5 \leqq 1 \qquad (6)$$

６）ファジィ修飾詞Mは、Ｒあるいは Ｆの前に存在する。

$$\sum_{i=1}^{k} Xi4 - (\sum_{i=k+1}^{n} Xi2 + \sum_{i=k+1}^{n} Xi5) \leqq 0,\ Xk4=1 \qquad (7)$$

ここで、１）～３）は形式言語の各項目の存在に関する制約であり、４）～６）は平易な文における項目間の順序に関する制約である。 これらの制約の下で、問い合わせ文から最大の情報を引き出すという基準を導入する。これに、未知項目の個数を最小にすると言う最適基準が対応し、目的関数Ｚの最適問題、

$$Minimize\ \ (Z=\sum_{i=1}^{n} Xi7\ ) \qquad (8)$$

なる形式言語を選択することになる。

3.4 解析事例

問い合わせ文の解析事例として、「勤務地が東京や大阪にわりと近い会社。」を考えてみよう。
Step 1)字種切り：勤務地／が／東京／や／大阪／にわりと／近／い／会社
Step 3)不要語除去：勤務地／が／東京／や／大阪／にわりと／近／い／Ｄ
Step 4)平仮名検索：四つの平仮名文字列、「が」、「や」、「にわりと」、「い」、が検索される。

◇１回目の検索
検索文字列：「が」、検索平仮名：「が」、
適合辞書内容：(Bz=x){T←BX}<(bX=LW){T←LW}>[Y←Y-y]
直前の１文字が非平仮名文字なら直前の非平仮名文字列をＴと置け。

処理：

Si	T	R	O	M	F	N	LW	U
勤務地	1	0	0	0	0	0	0	0

◇２回目の検索
検索文字列：「や」、検索平仮名：「や」、
適合辞書内容：(Az=x)&(Bz=x){OR←BX}[Y←Y-y]
「や」の直前直後の一文字が共に非平仮名ならば、直前の非平仮名列を選言結合とし、平仮名列を更新せよ。

処理：

Si	T	R	O	M	F	N	LW	U
勤務地	1	0	0	0	0	0	0	0
東京	0	0	0	0	0	0	1	0

◇３回目の検索
検索文字列：「にわりと」、平仮名：「に」、
適合辞書内容：(Bz=x){O←BX}<(bX=LW){O←LW}>[Y←Y-y]
「に」の直前の一文字が非平仮名ならば、直前の非平仮名列を比較の対象と置け。更に、前に接続語があれば、それも比較の対象とし、平仮名列を更新せよ。

処理：

Si	T	R	O	M	F	N	LW	U
勤務地	1	0	0	0	0	0	0	0
東京	0	0	0	0	0	0	1	0
大阪	0	0	1	0	0	0	0	0

◇４回目の検索
検索文字列：「わりと」、検索平仮名：「わ」、
適合辞書内容：(Y　DIC3){M←J}[Y←Y-J]
検索平仮名列がファジィ修飾詞辞書にあれば、その文字列をファジィ修飾詞と置き、平仮名列を更新せよ。

処理：

Si	T	R	O	M	F	N	LW	U
勤務地	1	0	0	0	0	0	0	0
東京	0	0	0	0	0	0	1	0
大阪	0	0	1	0	0	0	0	0
わりと	0	0	0	1	0	0	0	0

◇５回目の検索
検索文字列：「い」、検索平仮名：「い」、
適合辞書内容：(BX*y　DIC2)&(O){R←BX}[Y←Y-y]
検索平仮名と直前の非平仮名列を結合した文字列が、ファジィ集合辞書にあり、かつ比較の対象があれば、非平仮名列を比較演算子と置き、平仮名列を更新せよ。

処理：

Si	T	R	O	M	F	N	LW	U
勤務地	1	0	0	0	0	0	0	0
東京	0	0	0	0	0	0	1	0
大阪	0	0	1	0	0	0	0	0
わりと	0	0	0	1	0	0	0	0
近	0	1	0	0	1	0	0	0

最適モデル適用に当たっては、並列語を一方除き、全ての文字列が未知語の可能性があるとして項目Uの列に１をたて、陰的列挙法による最適解を求めると以下のようになる。

形式言語候補　→　最適解　(Z=0)

Si	T	R	O	M	F	N	LW	U
勤務地	1	0	0	0	0	0	0	1

Si	T	R	O	M	F	N	LW	U
勤務地	1	0	0	0	0	0	0	0

東京	0 0 0 0 0 0 1 1	東京	0 0 0 0 0 0 1 0
大阪	0 0 1 0 0 0 0 1	大阪	0 0 1 0 0 0 0 0
わりと	0 0 0 1 0 0 0 1	わりと	0 0 0 1 0 0 0 0
近	0 1 0 0 1 0 0 1	近	0 1 0 0 1 0 0 0

4. データベース検索

4.1 データベース

データベースは企業に関する就職情報を集めたもので、Fig. 2(a)～(d)にそのイメージを示している。(a)は検索属性のリストであり、(b)は検索属性に関するデータで、各企業ごとにファイルとして登録されている。データには、「給料」のような数値データと「特徴」のような文字データとがあり、前者は直接数値が書かれ、後者は文字データを格納しているファイル名が書かれている。(c)は数値データを持つ検索属性のファジィ集合表現に関して、ユーザーが設定しない時、すなわちデフォルト時のメンバーシップ関数情報を与えている。これは、Fig. 3のような三角型のメンバーシップ関数を仮定し、その３頂点の台変数の値ａ、ｂ，ｃ（左から順に台変数の最小値、（最大値＋最小値）／２、台変数の最大値）を記述している。従って、３分割ファジィ集合は、データベースの中だけの相対的な概念を表している。(d)は、文字データを持つ検索属性、例えば「勤務地」、「業種」、「職種」など、のファジィ集合表現に関するデフォルト時の定義を与えている。補助的なものとして、検索属性名や文字データのファジィ集合表現について、同義語や類似語を集めたシソーラスファイル、検索属性間の階層関係を記した階層構造ファイルがある。

4.2 形式言語の処理

１）検索属性（Ｔ）と比較対象（Ｏ）の処理

問い合わせ文から抽出され、検索属性や比較対象として確定した文字列は、データベースの検索属性に置き換えなければならない。これは、切り出された文字列から平仮名を除いた後、文字列と検索属性シソーラスとのマッチングによってなされる。文字列が、シソーラス内の登録語と完全にマッチングすれば、その語が登録されている検索属性名に置き換えられる。そうでなければ、語の部分マッチングとファジィ推論によるアルゴリズム[3]が適用され、検索属性が決定される。

２）ファジィ修飾詞（Ｍ）の処理

ファジィ修飾詞はファジィ集合や比較演算子のメンバーシップ値を操作するヘッジとして用いられ、その修飾の度合いは三つのレベルに分けられる。すなわち、レベル１（概ね）、レベル２（非常に）、レベル３（極めて）などである。

３）ファジィ集合（Ｆ）の処理

問い合わせ文で用いられたファジィ表現について、ユーザーがファジィ集合を定義しない場合は、システムが保持しているデフォルト時のメンバーシップ関数情報が用いられる。メンバーシップ関数μのファジィ集合がファジィ修飾詞によって修飾されると、そのメンバーシップ関数は、各レベルごとに、一般的なヘッジの定義に従って、レベル１：$\mu^{1/2}$、レベル２：μ^{2}、レベル３：μ^{4}と定義される。

４）比較演算子（Ｒ）の処理

問い合わせ文「初任給が１６万円より高い会社。」を考えてみよう。「高い」はファジィ集合表現であるが、比較対象を伴うと比較演算子となる。この場合、比較対象＝「１６万円」、比較演算子＝「高い（＞）」となり、クリスプ集合を表す。比較演算子がファジィ修飾詞によって修飾されると、そのメンバーシップ関数は、レベル３のメンバーシップ関数をｒとする時、レベル１：$r^{1/4}$，レベル２：$r^{1/2}$，レベル３：ｒと定義される。ここで、レベル３のメンバーシップ関数ｒは、比較演算子と同一名のファジィ集合の２分割目の頂点の台変数値、すなわちFig. 3の点ｂを比較対象の台変数値で置き換えて全体を平行移動した時、その３分割目のメンバーシップ関数で定義される。

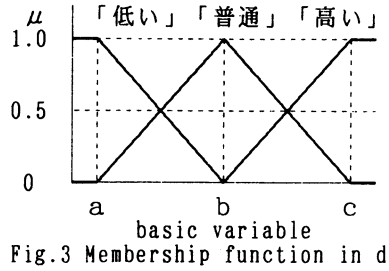


Fig.3 Membership function in default

5. おわりに

本論文では、ファジィ表現を許容した自然言語によるデータベース検索という問題を検討し、平仮名検索のみよって問い合わせ文から必要な検索情報を抽出する方法を提案した。その中心は、平仮名検索辞書の開発と０－１計画法による最適モデルの導入であり、かなりの自然言語問い合わせ文に対して有効である。今後、ファジィ意思決定支援システム全体のインプリメンテイション、ファジィデータベースへの適用などが課題である。

参考文献

1)前田、村上：ファジィ結合演算による選好表現を用いた多目的問題のファジィ意思決定手法、計測自動制御学会論文集、23-5、97/104、(1987)

2)H. Maeda and S. Murakami : A Fuzzy Decision-Making Method and Its Application to a Company Choice Problem, INFORMATION SCIENCES, 45, 331/346(1988)

3)前田、村上：ファジィ理論の対話型ファジィ意思決定支援システムにおける自然言語処理への適用、計測自動制御学会論文集、26-9(1990)（掲載決定）

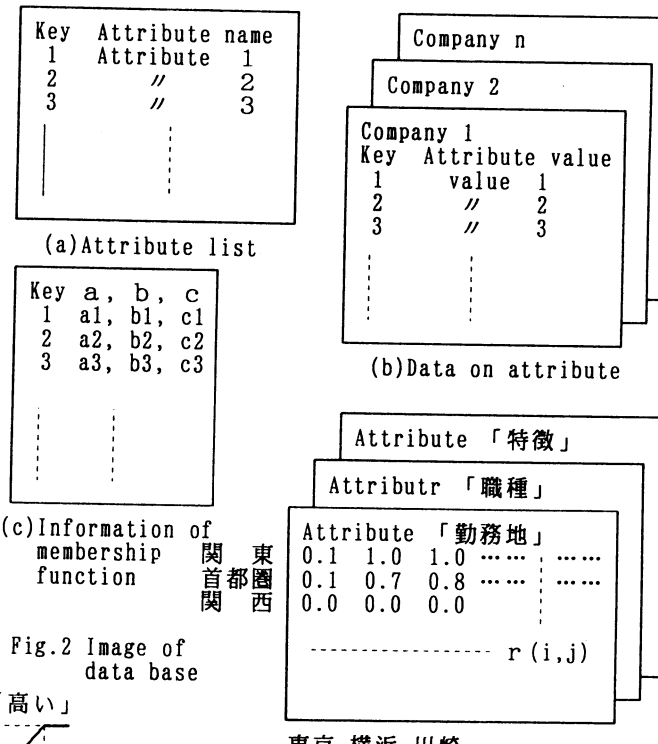


Fig.2 Image of data base

問い合わせ先：〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1
九州工業大学工学部電気工学科
前田 博 TEL 093-871-1931,EXT434
FAX 093-871-5835

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

TC4-3

ファジィ理論を用いた言語モデルのシミュレーションの試み

An Approach to Simulation of Linguistic Models Based on Fuzzy Theory

浅見　真人*　　菅野　道夫**
Masato Asami,　　Michio Sugeno

*(株)日立製作所システム開発研究所,　　**東京工業大学
Systems Development Laboratory Hitachi,Ltd.,　Tokyo Institute of Technology

ABSTRACT:We report on the implementation of the little simulation system of linguistic models, which are qualitative models using natural language and have ambiguities. Our system makes a linguistic model less ambiguous using the backgrand knowledge and the dependence upon the contex and the situation. In the system the knowledge, the situation and the model is expressed in feature structure or constraint. And the system performs the unification of the feature structures and the reasoning of the constraints to understand and simulate the linguistic model. In this papar we restrict linguistic models to qualitative informations about the map of an area.

1．はじめに

言語モデルのシミュレーションシステムを試作した．言語モデルは従来の数学的モデルに較べ，精密ではないが，社会現象や人間の行動などの複雑なシステムをより自然に表現することができる．しかし，自然言語を用いた表現であるため，モデルの意味の解釈などに曖昧性が多く存在し，計算機上のシミュレーションを困難にしている．この曖昧性の問題を解決するために，モデルの背景にある知識や常識，モデルが依存する状況，それぞれの記述の文脈依存を積極的に用い，言語モデルをより曖昧性の少ない－計算機にとって処理し易い－形に変換する方法を試みた．なお試作したシステムは言語モデル一般に対する汎用的なシステムではなく，言語モデルを地図情報に限った実験的なものである．

2．シミュレーションシステムの概要

言語モデルシミュレーションシステムはＭＳ－ＤＯＳ上のＭＳ－Ｃで開発した．システムは図１に示すとおり言語モデル解析部と言語モデル実行部の２つの部分から成る．言語解析部は，

(1) 言語モデルを受け取るインターフェースである字句解析部，
(2) 単語に関する知識（文法的役割，単語の背景にある常識，単語のクラス，単語の意味としてのファジィ集合など）の集まりである辞書部，
(3) ＬＦＧ，格文法のアイディアに基づいてプログラミングされた構文・意味解析部，

から成り立っている．それぞれのデータは属性構造によって表現され，ユニフィケーションによって言語モデルの意味表現（各文の属性構造）を構築する．言語モデル実行部では，

(4) まず各文の属性構造から各オブジェクトを中心とした構造を生成する．
(5) さらに一般的な地図情報のもつ様々の制約から関係ネットワークを生成する．
(6)この関係ネットワークを用いて言語モデルのシミュレーションが実行される．

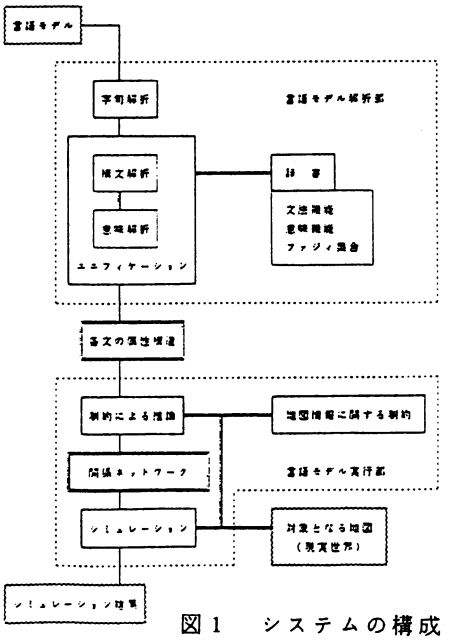


図１　システムの構成

シミュレーションの結果は，与えられた言語モデルのそれぞれのオブジェクトに対し，実際の地図上での位置（のファジィ集合）である．

現在，システムが対象とする言語モデルは地図上のオブジェクトの特徴や位置関係を表現した次のような文の集合である　（入力は分かち書きによる）．

①距離に関する記述：
例）新宿野村ビルは新宿駅から近いところにある．
②位置関係に関する記述：
例）安田火災海上ビルは新宿野村ビルの東にある．
③距離，位置関係に関する記述：
例）新宿センタービルは新宿駅から西に約５００メートル進んだところの右手にある．
④オブジェクトの特徴に関する記述：
例）新宿野村ビルは非常に高いビルである．

3．地図情報の言語モデルの内部表現

ファジィ集合論，状況意味論，ユニフィケーション文法のアイディアの下に地図情報の言語モデルを解析する具体的な手法を述べる．これはシミュレーション・システムの言語解析部にあたる．

3.1 属性構造による知識表現

このシステムの特徴の１つは言語モデルの意味を属性構造で表現するということである．属性構造は属性と値の対を要素とする集合であり，［属性　値］で表現される．

[1] ファジィ集合と属性構造

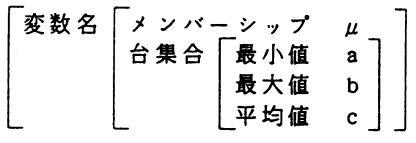
地図情報の言語モデルのなかには“近い”，“右”などファジィ集合で表現すべきことばが含まれる．したがって，ファジィ集合を属性構造によって表現しなければならない．台集合の文脈，状況依存の仕方によって次の３つの表現を得る．

1. 台集合が文脈や状況に依存しない場合

［変数名　A］

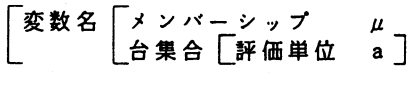
Aはファジィ集合であり，このとき台集合はメンバーシップ関数の定義とともに辞書によって管理されている．

2. 台集合が対象物に依存する場合



μは台集合がパラメタ，最小値，最大値，平均値によって定められたメンバーシップ関数である．またa，b，cは対象物の属性構造とユニフィケーションされることによって決定される．

3. 台集合が評価基準に依存する場合

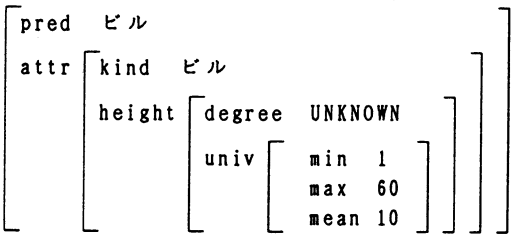


μは台集合がパラメタ，評価単位によって定められたメンバーシップ関　数である．またaは評価基準を定める属性構造とユニフィケーションされることによって定まる．

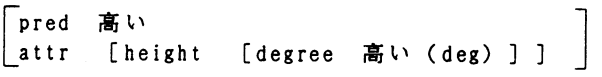
ここで“新宿野村ビルは非常に高いビルである．”という例について考えてみる．

辞書には次のような属性構造が与えられているとする．なお統語的知識については省略する．

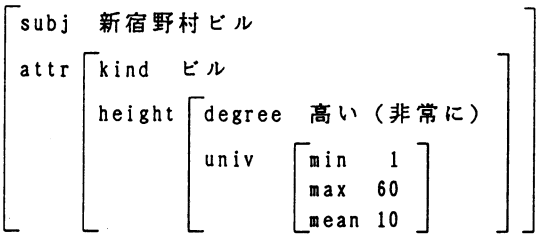
＜名詞＞　→　ビル　CLASS　建築物



＜形容詞＞　→　高い



“高い（deg）”は台集合が未定のファジィ集合である．ユニフィケーションによって得られる例文の属性構造は，次のとおり．



上の例でもわかるようにあらかじめ値を与えておくことによって，常識的な知識を補うことができる．これは人工知能分野のデフォルト推論に相当する．

[2]ファジィ集合をもつ属性構造のユニフィケーション

属性値としてファジィ集合をもつことによってユニフィケーションが記号レベルでは行えなくなった．属性値“高い”と属性値“高い（非常に）”包含関係があるためにユニフィケーションすべきものである．
そこで次のようにユニフィケーションを拡張する．

> 属性構造Ｆ1の要素＜ｆ1，Ａ＞，Ｆ2の要素＜ｆ2，　Ｂ＞が与えられ，Ｆ1とＦ2のユニフィケーションが行なわれるとき，ｆ1＝ｆ2　かつ max(Ａ∩Ｂ)≧α　(0＜α≦1)であれば，
> ユニフィケーションによって要素＜ｆ1，Ａ∩Ｂ＞を得る．（Ａ，Ｂはファジィ集合）

これはよりきびしい制約条件を選んでいくという基本的な立場に立っている．

. [3]状況に依存することばの処理

“右”ということばは，そのことばを発した人間の視点によって方向が定まる．したがって“右”ということばは状況が決まらなければ処理することができない．位置（loc）を表わす属性として，対象物を見る視点の位置(at)，移動の前の視点の位置（from），視点の位置からの距離（dist），視点からの方向（dirc）を用いる．

これによって“右”を図２のように確定することができる．これは状況意味論のアイディアを用いたものである．

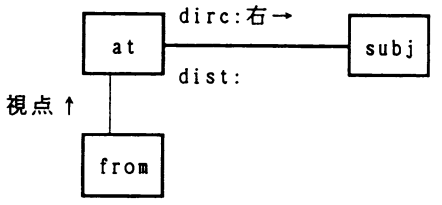


図２　“右”の表現

3.2 制約と推論

属性構造の集まりで表現された言語モデルに対し，対象世界の知識（常識）を与えることによって，より具体的な意味を抽出する．これは言語モデルの生成されたときに用いられた情報をできるだけ復活させようという試みである．知識は制約によって表現され，推論をおこなう．（システムでは，推論の見通しをよくするために属性構造に対して視点によるソートなど前処理を行なう．）

地図情報の主な制約を列記する．

隣に関する制約：$\sigma 1 \Rightarrow \sigma 2$
$\sigma 1$= at p1:next_to,p2;yes
$\sigma 2$= at p2:next_to,p1;yes

距離に関する制約：$\sigma 1 \Rightarrow \sigma 2$
$\sigma 1$= at p1:distance,a,p2;yes
$\sigma 2$= at p2:distance,a,p1;yes

絶対的方向に関する制約：$\sigma 1 \Rightarrow \sigma 2$
$\sigma 1$= at p1:west_of,p2;yes
$\sigma 2$= at p2:east_of,p1;yes

相対的方向に関する制約：$\sigma 1 \Rightarrow \sigma 2$
$\sigma 1$= at p1:left_hand,p2,p0;yes
$\sigma 2$= at p2:right_hand,p1,p0;yes

3.3 言語モデルのシミュレーション

言語モデルのシミュレーションとは“言語モデルを与えられた人間が，その言語モデルに基づいて行なう思考または行動を計算機上で実行したもの”である．

不確定項を何にするかによって様々なシミュレーションを定義することができるが，言語モデルは地図情報に関するものなので，シミュレーションは，与えられた地図に対して言語モデルの各オブジェクトの位置を割り当てることとした．

[1]シミュレーションの方針

シミュレーションを実行する際の重要な点は，いかに効率よく探索するかということである．特に，曖昧な概念が含まれているのでうかつな探索は組合せ的な爆発を引き起こす．そこで，本研究では情報に曖昧性のレベルをつけ，より曖昧でない情報から探索を開始して，曖昧な情報の適用範囲を狭めるという戦略をとった．これは人間が答えのはっきりしているところから問題の解決を進め，解決した問題を解決していない問題へ情報として与え，さらに問題解決を進めるという思考方法に基づいている．
（上記の方針ためには，情報に曖昧性によって順序をつけなければならない．曖昧性の尺度については様々な研究がなされているが，直感に基づいてあらかじめ順序をつけることにする．）

[2]シミュレーションの方法

図３のような節について考える．

いま，ｉｎｉの条件により，節ｐのファジィ集合が変化したとする．節ｐはこの変化を他の節に伝えるためにｏｕｔの条件の中から最も非曖昧性の指標ｉ大きいｏｕｔｊを選び，条件を伝搬し，次の節に進む．もし伝搬した成果が得られなければ，すなわち伝搬した先の節のファジィ集合を変化させることができなかたのならば，つぎに指標ｉが大きいｏｕｔを選ぶ．

すべてのｏｕｔについて伝搬を行なったのならば，ｉｎｉを逆にたどり，ひとつ前の節に戻る．システム全体はたった一個の要素からなる節から開始される．要素が確定していない節にはunknownが与えられているとする．システム全体の終了は開始節のすべてのｏｕｔが条件を伝搬したときである．　なお，与えられた地図は離散的な点の集まりであり，各点には，その点の物理的位置や特徴などが属性構造によって与えられている．条件を満たすかどうかは，その属性構造と条件のマッチングで評価される．したがってマッチングの適合度が存在し，条件を満たす点集合はファジィ集合となる．

なお，ファジィ集合Ａ，Ｂのマッチングの適合度ｍは，

$$m = \max_{x \in X} (\min (\mu A(x), \mu B(x)))$$

で与えられる．

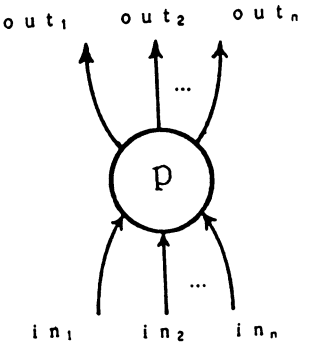


図３　関係ネットワークの節

5．シミュレーションの実行例

新宿高層ビル街の言語モデルを図４の地図上でシミュレーションを行った．

言語モデル：新宿高層ビル街（１）

１．　新宿野村ビルは非常に高いビルである．
２．　新宿野村ビルは新宿駅の西側にある．
３．　新宿野村ビルは新宿駅から近いところにある．
４．　新宿野村ビルは新宿センタービルの隣にある．
５．　新宿野村ビルは新宿センタービルの北にある．

６．　安田火災海上ビルは新宿野村ビルの隣にある．
７．　安田火災海上ビルは新宿野村ビルの東にある．
８．　安田火災海上ビルは非常に高いビルである．

９．　新宿センタービルは新宿駅から西に約５００メートル進んだところの右手にある．
１０．新宿センタービルは非常に高いビルである．
１１．新宿駅は［B00］にある．

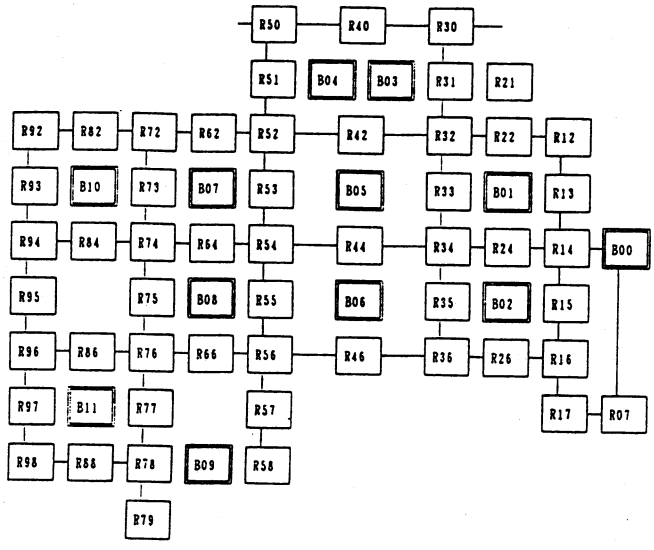


図４　新宿高層ビル街地図

この言語モデルの関係ネットワークは図％であり，シミュレーションの結果は次のとおりである．

Conclusion:p1={0.8/B04};新宿野村ビル
　　p2={0.8/B03};安田火災海上ビル
　　p3={0.8/B05};新宿センタービル
　　p4={0.8/R44};Ｒ１

さらに，新宿高層ビル街（１）の９．の文を

９．　新宿センタービルは新宿駅から西に約５００メートル進んだところにある．

としてシミュレーションを行うと次のような結果を得る．

Conclusion:p1={0.8/B04,0.8/B07};新宿野村ビル
　　p2={0.8/B03,0.8/B05};安田火災海上ビル
　　p3={0.8/B05,0.8/B08};新宿センタービル
　　p4={0.8/R44,0.8/R64};Ｒ１

曖昧なモデルからは曖昧な結果が導かれた．これは人間の感覚により近いものではないだろうか．

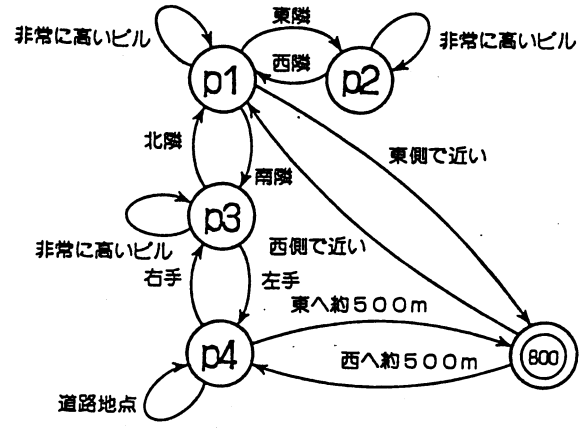


図５　関係ネットワーク

6．おわりに

今回のシステムは，言語モデルを地図情報に制限したためにモデルに依存した部分がかなりある．しかし，言語モデルを属性構造で表現すること，ユニフィケーションや制約を用いて知識や状況，文脈などで言語モデルの曖昧性を補間することは，他の静的な言語モデルに適用することができよう．今後は言葉のファジィ集合表現の体系的な整理，今回の手法の汎用化，時間の概念を含む言語モデルのシミュレーションなどを行いたい．

[参考文献]

[1]菅野道夫：ファジィ理論の展開，サイエンス社，1989
[2]三矢，田中：Ｃ言語による実用ファジィブック，ラッセル社，1989
[3]水本雅晴：ファジィ理論とその応用，サイエンス社，1988
[4]L.A.Zadeh:The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning-I,II,III,Information Science 8,pp.199-249,pp.301-357,9,pp.43-80,1975
[5]中川，佐藤：状況理論による時空間の記述，コンピュータソフトウェア vol.6 No.4，pp.327-333,1989
[6]古川，溝口：自然言語の基礎理論，共立出版,1986
[7]P.Sells（郡司，田窪，石川訳）：現代の文法理論，産業図書,1988

第２日

９月７日（金）

ｾｯｼｮﾝ ＦＡ１	〔ファジィ同定〕	司会　田中 英夫 （大阪府立大学 工学部）
ｾｯｼｮﾝ ＦＡ２	〔チューニング〕	司会　前田 幹夫 （九州工業大学 工学部）
ｾｯｼｮﾝ ＦＡ３	〔画像検索・認識・理解１〕	司会　椎塚 久雄 （工学院大学）
ｾｯｼｮﾝ ＦＡ４	〔ファジィ制御２〕	司会　五百旗頭 正 （（株） 明電舎）
ｾｯｼｮﾝ ＦＢ１	〔ファジィ推論２〕	司会　江澤 義典 （関西大学 工学部）
ｾｯｼｮﾝ ＦＢ２	〔ファジィプロダクションシステム１〕	司会　片井 修 （京都大学 工学部）
ｾｯｼｮﾝ ＦＢ３	〔ファジィプロダクションシステム２〕	司会　塚本 弥八郎（名城大学）
ｾｯｼｮﾝ ＦＢ４	〔ハードウェア１〕	司会　戸貝 正喜 （Togai InfraLogic, Inc.）
ｾｯｼｮﾝ ＦＣ１	〔評価・判別〕	司会　上野 文男 （熊本大学 工学部）
ｾｯｼｮﾝ ＦＣ２	〔ファジィグラフ〕	司会　宮本 定明 （筑波大学 電子・情報工学系）
ｾｯｼｮﾝ ＦＣ３	〔意志決定〕	司会　椹木 哲夫 （京都大学 工学部）
ｾｯｼｮﾝ ＦＣ４	〔言語〕	司会　中西 祥八郎 （東海大学 工学部）

FA1-1

可能性分布の同定手法によるファジィ IF－Then ルールの構成

Construction of Fuzzy If-Then Rules Based on the Identification Method of Possibility Distribution

田中英夫 Hideo Tanaka　石渕久生 Hisao Ishibuchi　林 勲 Isao Hayashi

大阪府立大学工学部 University of Osaka prefecture

松下電器産業㈱中央研究所 Matsushita Electric Industrial Co.,Ltd.

ABSTRACT : This paper proposes an identification method of possibility distribution based on the data given by experts and leads to a possibility discriminant rule from the viewpoint of possibility distributions. Since the proposed method resorts to linear programming, possibility distributions defined as quadratic functions can be easily obtained. This method is used to construct if-then rules. The possibility discriminant rule corresponds to Bayes discriminant rule based on probability distributions.

1．はじめに

ファジィ集合が L.A.Zadeh によって提案されて以来，ファジィ集合のメンバシップ関数をいかに決めるかについて種々議論されてきた[1]．たとえば，計量心理の技法によってメンバシップ関数を決める方法[2,3]，統計的データのヒストグラムから可能性分布を決定する方法[4]などがある．また最近，ニューラルネットを用いてメンバシップ関数を決定する方法[5,6]が提案されている．論文[5]においては，ファジィ推論の前件部のファジィ集合のメンバシップ関数を同定するという観点から研究がなされている．以上の研究において，多くの場合はメンバシップ関数の同定という用語が用いられているが，メンバシップ関数は可能性分布と解釈できるので，メンバシップ関数の同定と可能性分布の同定とは同じことである．また判別分析に関してはファジィ測度を用いた研究[7]がある．

本研究においては，確率の概念と対応させるために可能性分布という用語を用いることにする．いまファジィ概念を A とし，A の可能性分布を $\mu_A(\mathbf{x})$ と表す．ただし，$\mathbf{x}$ はn次元空間のある要素とする．このとき，エキスパートから次のようなデータが得られるとする．すなわち，ある $\mathbf{x}_i$ が A に少なくとも度合 h_i 以上で属しているというデータがあるとする．このとき，ここでの問題はこのデータから二次形式の可能性分布を求めることである．これらの方法は if-then ルールの前件部を同定するのに用いられている．すなわち可能性分布が得られるので，これによる可能性判別関数を求め，これによるファジィ if-then ルールを構成している．

2．可能性分布の同定

ファジィ集合のメンバシップ関数を可能性分布と考えることは L.A.Zadeh[7]によってはじめられ，文献[1]に詳しく述べられている．最近，エキスパートの知識，たとえば”だいたい10ぐらい”という情報は，可能性分布と見なされている．このように，エキスパートによるファジィ推論規則を構成するために可能性分布を同定することが重要な問題になりつつある．

ここでは，多次元空間の可能性分布を次の二次形式と仮定する．すなわち，

$$\mu_A(\mathbf{x})=\max\{1-(\mathbf{x}-\boldsymbol{\alpha})^t\mathbf{D}(\mathbf{x}-\boldsymbol{\alpha}),0\} \tag{2.1}$$

ただし，A はファジィ概念を表し，$\boldsymbol{\alpha}$ は中心ベクトルであり，また D は対称な半正定値行列とする．いま，ファジィ概念 A が与えられ，ある $\mathbf{x}_i$ が A に少なくとも度合 h_i($h_i<1$) 以上で属しているというデータが与えられるとする．すなわち，データを

$$(\mathbf{x}_i,h_i),\ i=1,\ldots,N \tag{2.2}$$

と表示し，$\mathbf{x}_i=(x_{i1},\ldots,x_{in})^t$ であり，N はデータ数である．また，N は次元 n より十分大きく，したがって $\{\mathbf{x}_1,\ldots,\mathbf{x}_N\}$ から n個の独立なベクトルが存在すると仮定する．この独立なベクトルの集合を $\{\mathbf{x}_1,\ldots,\mathbf{x}_n\}$ とし，n個の独立なベクトルの添字の集合を

$$I=\{1,\ldots,n\} \tag{2.3}$$

と表す．

ここでの問題は(2.2)式のデータが与えられて，(2.1)式の可能性分布を求めることである．すなわち中心 $\boldsymbol{\alpha}$ と行列 D とを求めることである．

中心 $\boldsymbol{\alpha}$ は h_i の重み付平均

$$\boldsymbol{\alpha}=\sum_{i=1}^{N}(h_i\mathbf{x}_i/\sum_{i=1}^{N}h_i) \tag{2.4}$$

として求める．したがって残された問題は半正定値行列 D をいかに求めるかである．そこで，

$$\mathbf{y}_i=\mathbf{x}_i-\boldsymbol{\alpha} \tag{2.5}$$

として，(2.1)式を

$$\mu_A(\mathbf{y})=\max\{1-\mathbf{y}^t\mathbf{D}\mathbf{y},0\} \tag{2.6}$$

と変換して，D を求める最適化問題を考える．この最適化問題は次のように定式化できる．

$$\begin{aligned}&\underset{\mathbf{D}}{\text{Max}}\ J(\mathbf{D})=\sum_{i=1}^{N}\mathbf{y}_i^t\mathbf{D}\mathbf{y}_i\\&\text{subject to}\\&1-\mathbf{y}_i^t\mathbf{D}\mathbf{y}_i\geq h_i\ ;\ i=1,\ldots,N\\&\mathbf{y}_i^t\mathbf{D}\mathbf{y}_i\geq 0\ ;\ i=1,\ldots,N\\&\mathbf{y}_i^t\mathbf{D}\mathbf{y}_j=0\ ;\ i\neq j,\ i,j\in I\end{aligned} \tag{2.7}$$

(2.7)式の最初の拘束条件はデータ $\mathbf{y}_i$ が A に h_i 以上で属することを保証し，2，3番目の拘束条件は行列 D が半正定値行列に限定するためのものである．またこの問題は(2.6)式の値をできるだけ小さくすることを表している．(2.7)式の最適解を $\mathbf{D}^*$ と

表す.

［定理２．１］最適化問題(2.7)式の解 D^* は半正定値行列である.

（証明）(2.7)式の２番目の拘束条件からデータ点 y_i では $y_i{}^tDy_i \geq 0$ が保証されている. n次元の任意なベクトル z は独立なベクトル$\{y_1,..,y_n\}$から

$$z=\lambda_1 y_1+\cdots+\lambda_n y_n \tag{2.8}$$

と表すことができる. ただし λ_i は実数である. (2.7)式の３番目の拘束条件から

$$z^tDz=(\lambda_1 y_1+\cdots+\lambda_n y_n)^tD(\lambda_1 y_1+\cdots+\lambda_n y_n)=\Sigma\lambda_i{}^2 y_i{}^tDy_i \geq 0 \tag{2.9}$$

となり D が半正定値行列であることが示された. ■

［定理２．２］最適化問題(2.7)式には常に最適解が存在する.

（証明）線形独立なベクトル$\{y_1,..,y_n\}$ を正規直交ベクトル$\{z_1,..,z_n\}$に変換する n×n 行列 K を考える. ただし, $z_i=(0,..,0,1,0,..,0)^t$ である. すなわち I を単位行列とすると

$$K[y_1,..,y_n]=I \tag{2.10}$$

である. したがって線形変換行列は

$$K=[y_1,...,y_n]^{-1} \tag{2.11}$$

となる. ここで, 次の正定値行列

$$C=qK^tK \tag{2.12}$$

を考え, q を十分小さな正数とすると, C は(2.7)式の拘束条件を満足する. ゆえに許容集合が存在し, 解が保証される. ■

(2.7)式の最適化問題は線形計画問題であるので容易に解が得られる. また(2.7)式の３番目の拘束条件にどのデータ y_i を用いるかが問題である. すなわちデータ数 N から独立なベクトル y_i を n個選ぶ方法は種々ある. したがって, ３番目の拘束条件を取り除いた(2.7)式の問題をとき, 解が半正定値行列であればそれを解とする方法が考えられる. このことの妥当性は次の問題から得られる.

いま(2.6)式において D° という可能性分布があり, この可能性分布のもとにデータ(y_i,h_i) が与えられたとする. このとき(2.7)式の問題において, ２番目と３番目の拘束条件を取り除いた最適化問題を考える. このとき次の定理が得られる.

［定理２．３］$1-y_i{}^tDy_i \leq h_i$, i=1,...,N, の拘束条件だけを考えた最適化問題(2.7)式の解はD°となる.

（証明）データ(y_i,h_i)は D° という可能性分布からのものであるので,

$$h_i=1-y_i{}^tDy_i \tag{2.13}$$

である. したがって D° は(2.7)式の許容集合に入っている. いま, $J(D^\circ)$ よりも大きな $J(D')$となる D' が存在したとする. すなわち

$$\Sigma y_i{}^tD'y_i{}^t > \Sigma y_i{}^tD^\circ y_i \tag{2.14}$$

と仮定する. すると, ある j 番目では

$$y_j{}^tD'y_j{}^t > y_j{}^tD^\circ y_j \tag{2.15}$$

でなければならない. １番目の拘束条件から

$$y_j{}^tD'y_j{}^t \leq y_j{}^tD^\circ y_j \tag{2.16}$$

となり矛盾する. したがってD°が最大解である. ■

データにつけられる度合 h_i を増加させると, J(D) の値が小さくなり, 可能性分布はより広がったものになる. もし, 各データに度合 h_i をつけることが困難なときは, 与えられたデータはすべて同じ可能性があると考えて, h_i をすべて h として解くことが考えられる. このとき, ファジィ概念 A を説明するためのデータ数が十分あれば, h=0 とすることが考えられる[8]. この場合データから考えられる可能性だけを考慮することになる.

以上, 中心が０ベクトルである可能性分布を同定した. すなわち, 次の可能性分布が得られる.

$$\mu_A(y)=\mathrm{Max}\{1-y^tDy,0\} \tag{2.17}$$

次の変換

$$x=Fy+\alpha \tag{2.18}$$

を考えると,

$$\mu_A(x)=\mathrm{Max}\{1-(x-\alpha)^t(F^{-1})^tDF^{-1}(x-\alpha),0\} \tag{2.19}$$

となる. ただし, F は正則な行列である. これは確率分布の場合と同様に, 中心が０ベクトルの可能性分布 $\mu_A(y)$から X 上の可能性分布 $\mu_A(x)$ が導出できることを示している. F を単位行列にとると(2.18)式は(2.5)式になる.

３．可能性判別規則

パターンクラス c_i, i=1,..,m があり, 各クラスの可能性を $\Pi(c_i)$で, パターン x を n個の属性によって $x=(x_1,..,x_n)^t$ で表す. またパターンクラス c_i が与えられたとき, x の条件付可能性分布を $\Pi(x \mid c_i)$とする. このとき, x と c_i との同時可能性分布を $\Pi(x,c_i)$とすると, 可能性理論から

$$\Pi(x,c_i)=\Pi(x \mid c_i)\wedge\Pi(c_i) \tag{3.1}$$

となり, x の周辺可能性分布は

$$\Pi(x)=\max_i \Pi(x,c_i) \tag{3.2}$$

となる.

可能性判別分析の問題は, パターン x が与えられたとき, x を $c_1,..,c_m$ のいずれかのパターンクラスからのものであると判別することである. この判別規則を $\delta(x)=(\delta_1(x),\cdots\delta_m(x))^t$ で表し, これを可能性判別関数という. ただし,

$$\bigvee_{i=1}^{m}\delta_i(x)=1 \tag{3.3}$$

であり, $\delta_i(x)\in[0,1]$ は x がパターンクラス c_i である可能性を表している.

ある判別規則δのもとでパターンクラス c_i に帰属するパターン x がクラス c_j に帰属すると判別される可能性を$\Pi(i\to j:\delta)$と表し, これを

$$\Pi(i\to j:\delta)=\sup_x[\delta_j(x)\wedge\Pi(x \mid c_i)],\quad i=1,..,m \tag{3.4}$$

と定義する. (3.4)式で, i=j ならば, c_i のパターン x が正しく判別される可能性を表し, $i\neq j$ならば, c_i のパターン x が誤って c_j に判別される可能性を表している.

判別規則δのもとで, クラス c_i に帰属するパターン x が c_i 以外のクラスに帰属すると誤って判別される条件付可能性$\Pi e(i;\delta)$ を, (3.4)式から

$$\Pi e(i;\delta)=\max_{i\neq j}\Pi(i\to j;\delta),\quad i,j=1,...,m \tag{3.5}$$

と定義する.

いま与えられた判別規則δのもとで, δによる誤判別の可能性を$\Pi e(\delta)$とすると, これは

$$\Pi e(\delta)=\max_i\{\Pi e(i;\delta)\wedge\Pi(c_i)\}=\max_i\max_{i\neq j}\sup_x[\delta_j(x)\wedge\Pi(x \mid c_i)\wedge\Pi(c_i)] \tag{3.6}$$

と定義できる. 誤判別の可能性である$\Pi e(\delta)$を最小にするδ^*を最適な可能性判別関数という. すなわち, δ^*は次のように定義される.

$$\Pi e(\delta^*)=\min_{\delta}\Pi e(\delta) \tag{3.7}$$

ここでの問題は(3.7)式となるδ^*を求めることである. 問題を簡単にするためにパターンクラスを

c_1, c_2 の二つであると仮定する．

［定理３．１］次の可能性判別関数 $\delta^*(x)$ は最適な可能性判別関数である．

$$\delta_1^*(x)=\begin{cases}1 ; \Pi(c_1)\wedge\Pi(x\mid c_1) \\ \quad \geq \Pi(c_2)\wedge\Pi(x\mid c_2) \\ 0 ; \text{その他}\end{cases} \quad (3.8)$$

$$\delta_2^*(x)=\begin{cases}1 ; \Pi(c_1)\wedge\Pi(x\mid c_1) \\ \quad < \Pi(c_2)\wedge\Pi(x\mid c_2) \\ 0 ; \text{その他}\end{cases}$$

（証明）任意の可能性判別関数を δ とすると，誤りの可能性 $\Pi e(\delta)$ は

$$\begin{aligned}&\Pi e(\delta)\\ &=\{\sup_x[\delta_2(x)\wedge\Pi(x\mid c_1)\wedge\Pi(c_1)]\}\\ &\quad\vee\{\sup_x[\delta_1(x)\wedge\Pi(x\mid c_2)\wedge\Pi(c_2)]\}\\ &=\sup_x\{[\delta_2(x)\wedge\Pi(x\mid c_1)\wedge\Pi(c_1)]\\ &\quad\vee[\delta_1(x)\wedge\Pi(x\mid c_2)\wedge\Pi(c_2)]\}\\ &\geq\sup_x\{[\delta_2(x)\vee(\delta_1(x)\wedge\Pi(x\mid c_2)\\ &\quad\wedge\Pi(c_2))]\wedge[\Pi(x\mid c_1)\wedge\Pi(c_1)]\}\\ &=\sup_x\{[\delta_1(x)\vee\delta_2(x)]\wedge[(\delta_2(x)\\ &\quad\wedge\Pi(x\mid c_1)\wedge\Pi(c_1))\vee(\Pi(x\mid c_1)\\ &\quad\wedge\Pi(c_1)\wedge\Pi(x\mid c_2)\wedge\Pi(c_2)]\}\\ &\geq\sup_x\{[\delta_1(x)\vee\delta_2(x)]\wedge\Pi(x\mid c_1)\\ &\quad\wedge\Pi(c_1)\wedge\Pi(x\mid c_2)\wedge\Pi(c_2)\}\\ &=\sup_x\{\Pi(x\mid c_1)\wedge\Pi(c_1)\wedge\Pi(x\mid c_2)\\ &\quad\wedge\Pi(c_2)\}\\ &=\sup_x\{[\delta_2^*(x)\wedge\Pi(x\mid c_1)\wedge\Pi(c_1)]\\ &\quad\vee[\delta_1^*(x)\wedge\Pi(x\mid c_2)\wedge\Pi(c_2)]\}\\ &=\Pi e(\delta^*)\end{aligned}$$ ■

さらにパターンクラスが m 個あるときは (3.8) 式は次のように書ける．

$$\delta_k^*(x)=\begin{cases}1 ; \max_i \Pi(x\mid c_i)\wedge\Pi(c_i)] \\ \qquad = \Pi(x\mid c_k)\wedge\Pi(c_k) \\ 0 ; \text{その他}\end{cases} \quad (3.9)$$

最適な可能性判別関数 δ^* は確率によるベイズ識別規則に対応している．

さて，可能性判別関数 $\delta_i(x)$ について，(3.3) 式の代わりに

$$\Sigma \underline{\delta}_i(x)=1 \quad (3.10)$$

を考える．この判別関数 $\underline{\delta}_i(x)$ は，ある x が与えられたとき，各クラス i に属する度合の合計が 1 になるように分配している．パターンクラスが c_1, c_2 の二つの場合には次の定理が導ける．いま，可能性判別関数を (3.8) 式と同様に

$$\underline{\delta}_1^*(x)=\begin{cases}1; \Pi(c_1)\wedge\Pi(x\mid c_1)\geq\Pi(c_2)\wedge\Pi(x\mid c_2) \\ 0; \text{その他}\end{cases} \quad (3.11)$$

$$\underline{\delta}_2^*(x)=\begin{cases}1; \Pi(c_1)\wedge\Pi(x\mid c_1)<\Pi(c_2)\wedge\Pi(x\mid c_2) \\ 0; \text{その他}\end{cases}$$

とする．

［定理３．２］(3.10) 式のもとで (3.11) 式の可能性判別関数 $\underline{\delta}_i(x)$ が最適可能性判別関数であるための必要十分条件は次式が成り立つことである．

$$\sup_x\{\Pi(x\mid c_1)\wedge\Pi(c_1)\wedge\Pi(x\mid c_2)\wedge\Pi(c_2)]\leq 0.5 \quad (3.12)$$

［証明］

<<十分条件>> 任意の可能性判別関数を $\underline{\delta}_j(x)$ とすると，定理3.1の証明から

$$\Pi_e(\underline{\delta})\geq\sup_x[(\underline{\delta}_1(x)\vee\underline{\delta}_2(x)]\wedge\Pi(x\mid c_1)\wedge\Pi(c_1)\wedge\Pi(x\mid c_2)\wedge\Pi(c_2)]$$

となる．ここで，(3.10) 式と (3.12) 式とから

$$\Pi(c_1)\wedge\Pi(x\mid c_1)\wedge\Pi(c_2)\wedge\Pi(x\mid c_2)\leq\underline{\delta}_1(x)\vee\underline{\delta}_2(x)$$

となる．したがって定理3.1の証明と同様に

$$\begin{aligned}\Pi_e(\underline{\delta})&\geq\sup_x\{\Pi(x\mid c_1)\wedge\Pi(c_1)\\ &\quad\wedge\Pi(x\mid c_2)\wedge\Pi(c_2)\}\\ &=\sup_x\{[\underline{\delta}^*_2(x)\wedge\Pi(x\mid c_1)\wedge\Pi(c_1)]\\ &\quad\vee[\underline{\delta}_1^*(x)\wedge\Pi(x\mid c_2)\wedge\Pi(c_2)]\}\\ &=\Pi_e(\underline{\delta}^*)\end{aligned}$$

<<必要条件>> 背理法で証明する．まず

$$\sup_x[\Pi(x\mid c_1)\wedge\Pi(c_1)\wedge\Pi(x\mid c_2)\wedge\Pi(c_2)]>0.5$$

と仮定する．任意の判別関数を $\underline{\delta}$ とすると

$$\Pi_e(\underline{\delta})=\sup_x\{[\underline{\delta}_2(x)\wedge\Pi(x\mid c_1)\wedge\Pi(c_1)]\vee\sup_x[\underline{\delta}_1(x)\wedge\Pi(x\mid c_2)\wedge\Pi(c_2)]$$

となり，上式の sup が x^* で達成されているとすると，$\underline{\delta}_1(x)+\underline{\delta}_2(x)=1$ および背理法の仮定から

$$\underline{\delta}_2(x^*)\wedge\Pi(x^*\mid c_1)\wedge\Pi(c_1)>0.5$$

かまたは

$$\underline{\delta}_1(x^*)\wedge\Pi(x^*\mid c_2)\wedge\Pi(c_2)>0.5$$

となる．また $\underline{\delta}_1'(x)=0.5, \underline{\delta}_2'(x)=0.5$ という判別関数を考えると $\Pi e(\underline{\delta}')=0.5$ となるので，一般に

$$\min_{\underline{\delta}}\Pi e(\underline{\delta})\leq 0.5$$

である．一方 (3.11) 式の $\underline{\delta}^*$ を用いると

$$\Pi e(\underline{\delta}^*)>0.5$$

となるので $\underline{\delta}^*$ は最適でない． ■

以上の結果から，二つの可能性分布が度合0.5以下のかさなりであれば，最適判別関数はクリスプになる．また二つの可能性分布の交わり度合が0.5以上になると，上述の必要条件の証明から最適判別関数はクリスプでなくなり度合付の判別になることがわかる．

4．if-thenルールの構成

エキスパートの知識から次のデータが与えられたとする．

$$\begin{aligned}&\text{if } v_1=x_{11} \text{ and } \cdots \text{ and } v_n=x_{1n}, \text{ then } c_j \quad (1\text{番目})\\ &\qquad\vdots \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\vdots \qquad (4.1)\\ &\text{if } v_1=x_{N1} \text{ and } \cdots \text{ and } v_n=x_{Nn}, \text{ then } c_k \quad (N\text{番目})\end{aligned}$$

ただし，$v_1, \ldots, v_n$ は属性を，x_{ij} は i 番目の j 属性の値を，また $c_j, j=1, \ldots, m$ はエキスパートの判断を示す．このとき，ある c_j と判断された前件部のデータを用いて，2．の可能性分布の同定の手法によって前件部の可能性分布 $\Pi(x\mid c_j)$ を求める．2．で述べた手法を用いるので，$\Pi(x\mid c_j)$ は二次形式のメンバシップ関数になる．

(4.1) 式のような N 個のルールから上述の方法によって m 個のルールに縮約できる．すなわち

$$\begin{aligned}&\text{if } x \text{ is } \Pi(x\mid c_1) \text{ then } c_1\\ &\qquad\vdots \qquad\qquad\vdots \\ &\text{if } x \text{ is } \Pi(x\mid c_m) \text{ then } c_m\end{aligned} \quad (4.2)$$

ただし，$N>>m$ としている．

3．で述べたように，(3.3) 式と (3.10) 式の条件の

異なりに対して2つの判別関数が定義できる．いま簡単のために，$i=1,2$ とし $\Pi(c_i)=1$ とする．また $\Pi(\mathbf{x}\mid c_j)$ は，(2.1)式による二次形式のメンバシップ関数とする．

［1］(3.3)式の条件のとき

定理3.1から，$\Pi(\mathbf{x}\mid c_i)\geq 0, i=1,2$ に対して次の判別関数が得られる．

$$\begin{aligned}(\mathrm{i})\ \mathbf{x}\in K_1=\{\mathbf{x}\mid &(\mathbf{x}-\boldsymbol{\alpha}_2)^t D_2(\mathbf{x}-\boldsymbol{\alpha}_2)\\ &-(\mathbf{x}-\boldsymbol{\alpha}_1)^t D_1(\mathbf{x}-\boldsymbol{\alpha}_1)\geq 0\}\\ &\delta_1^*(\mathbf{x})=1,\ \delta_2^*(\mathbf{x})=0\\ (\mathrm{ii})\ \mathbf{x}\in K_2=\{\mathbf{x}\mid &(\mathbf{x}-\boldsymbol{\alpha}_2)^t D_2(\mathbf{x}-\boldsymbol{\alpha}_2)\\ &-(\mathbf{x}-\boldsymbol{\alpha}_1)^t D_1(\mathbf{x}-\boldsymbol{\alpha}_1)<0\}\\ &\delta_1^*(\mathbf{x})=0,\ \delta_2^*(\mathbf{x})=1\end{aligned} \qquad (4.3)$$

ただし，$\{\mathbf{x}\mid \Pi(\mathbf{x}\mid c_i)=0,\ i=1,2\}$ の領域の $\mathbf{x}$ については，その判別を保留する．

［2］(3.10)式の条件のとき

$\Pi(\mathbf{x}\mid c_i)$ の交わりが 0.5 以下のときは定理3.2から最適な判別関数は(4.3)式になる．交わりが 0.5 以上のときは，if-then ルールでよく用いられている次の補間方式とする．すなわち

$$\delta_i(\mathbf{x})=\frac{\Pi(\mathbf{x}\mid c_i)}{\sum_j \Pi(\mathbf{x}\mid c_j)} \qquad (4.4)$$

ただし，$\{\mathbf{x}\mid \Pi(\mathbf{x}\mid c_i)=0,\ i=1,2\}$ の領域の $\mathbf{x}$ については，その判別を保留する．

ファジィ制御において用いられる if-then ルールの前件部のファジィ集合は前件部空間のファジィ分割であり，ファジィ集合の交わりはある程度以上あることが望ましいといわれている[8]．したがって2．で述べた同定方法におけるレベル h を大きくすることによって $\Pi(\mathbf{x}\mid c_1)$ と $\Pi(\mathbf{x}\mid c_2)$ との交わりを 0.5 以上になるように同定し，(4.4)式の判別方式によってファジィ推論することになる．これはファジィ制御でよく用いられている補間によるファジィ推論[9]である．このとき，(4.4)式のルールは後件部が実数値で与えられる if-then ルールに対応している[10]．

5．応用例

ガスセンサ反応パターンの判別問題[11]に本手法を適応する．ただし，c_1 は芳香族，c_2 はアルコールであり，各々のデータは Fig.1 に示されている．c_1, c_2 に対する可能性分布は h=0.8 として次のように得られた．

$$c_1:\ \boldsymbol{\alpha}_1=\begin{pmatrix}0.1155, & 0.088\end{pmatrix}$$
$$D_1=\begin{bmatrix}53.466 & -5.967\\ -5.967 & 1352.319\end{bmatrix}$$
$$c_2:\ \boldsymbol{\alpha}_2=\begin{pmatrix}0.1427, & 0.047\end{pmatrix}$$
$$D_2=\begin{bmatrix}436.847 & 46.906\\ 46.706 & 483.266\end{bmatrix}$$

(4.3)式による判別規則によるある結果を Fig.2 で示す．

参考文献

[1]D.Dubois and H.Prade : Possibility Theory, Plenum Press, 19-25, 1988.

[2]A.M.Norwich and I.B.Turksen : The fundamental measurement of fuzziness, in Fuzzy Sets and Possibility Theory : Recent Developments (R.R.Yager ed.), Pergamon, New York, 49-60, 1982.

[3]H.J.Zimmermann and P.Zysono : Decisions and evaluations by hierarchical aggregation of information, Int. J. of Fuzzy Sets and Systems, 10, 3, 243-260, 1983.

[4]D.Dubois and H.Prade : Unfair coins and necessity measures : Towards a possibilistic interpretation of histograms, Int. J. of Fuzzy Sets and Systems, 10, 1, 15-20, 1983.

[5]林，野村，若見：ニューラルネット駆動型ファジィ推論による倒立振子の学習制御，第5回ファジィシステムシンポジウム，183-188，1989.

[6]田村，藤岡，石渕，田中：ニューラルネットを用いた区間値メンバシップ関数の同定，第3回シグナル・システム・コントロール・シンポジウム，97-100，1990.

[7]M.A.Vila and M.Delgado : Problems of classification in a fuzzy environment, Fuzzy Sets and Systems, 9, 3, 229-239, 1983.

[8]水本：ファジィ制御に対する改善法，第3回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，97-100，1990.

[9]L.A.Zadeh : The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems, Fuzzy Sets and Systems, 11,199-227, 1983.

[10]菅野：ファジィ制御，日刊工業新聞社，1988.

[11]石渕，田中，福岡：ファジィデータの判別とガスセンサシステムへの応用，日本ファジィ学会誌,1, 1, 117-131, 1989.

問い合わせ先：〒591堺市百舌鳥梅町4-804
大阪府立大学工学部経営工学科
田中　英夫
TEL.0722-52-1161, EXT.2376
FAX.0722-59-3340

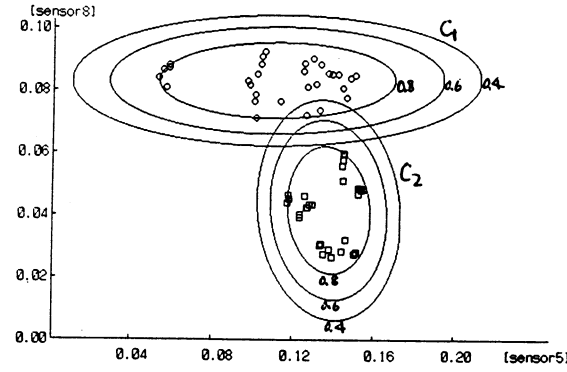


Fig.1　芳香族とアルコールとの可能性分布
（○：芳香族，□：アルコール）

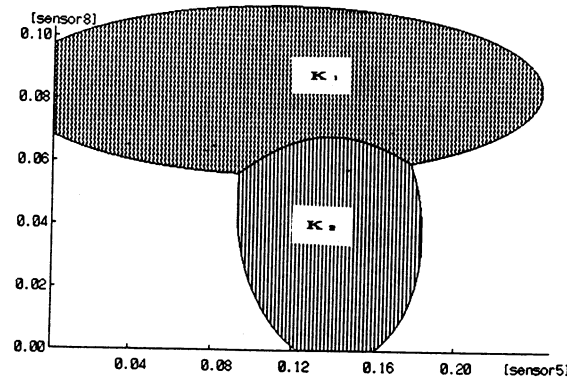


Fig.2　ファジィ推論による判別領域
（K_1：芳香族，K_2：アルコール，余白：保留）

FA1-2

多変数ファジィ同定器

Multi-variable Fuzzy Identifier

河村　廣　　谷　明勲
Hiroshi KAWAMURA,　Akinori TANI
神戸大学　工学部
Faculty of Engineering,　Kobe University

Abstract:In this paper, a multi-varuable fuzzy identifier is proposed. When input values or fuzzy sets are put into the identifier provided with finite initial data of inputs and outputs, an output fuzzy set is obtained as if it were a function. This identifier is similar to a neural network such as the perceptron. However, converging opereations are not needed, and the combination of input and output variables is easily changeable in this system, which will be very useful for optimum structural design in structural engineering.

1．序

工学特に構造工学の分野では、構造システムの不確かさよりも入力(荷重，外力)のあいまい性と出力（応答，損傷）の評価の主観性の方が遙かに大きい。　更に、構造システムの同定を行う場合、基礎となる入出力データの値は正確であるが、離散性，有限性，片寄り等の質的不十分さがネックとなる。　このような背景から、ファジィ集合[(1)]を少し発展させた条件付ファジィ集合[(2)]の構造工学への応用性[(3)]に筆者らは着目している。

条件付ファジィ集合の設定方法は、そのあいまいさの生じる原因により種々考えられるが、本報では、多変数からなるある関数又はシステムを対象とし、そのあいまいさが、入出力データの離散的かつ有限個のセット数による場合について考える。　この場合は、関数に条件付ファジィ集合を与えることは、とりも直さず、その関数をファジィ的に同定することになる。
このような機能を有するものをここでは一応多変数ファジィ同定器と称することとする。　そのシステムを図示すればFig.1のようになる。未知の関数を$y=f(x_1, x_2, \cdots)$とするとき、定数の$a_{10}, a_{20}, \cdots$の入力又はファジィ集合の$A_{10}, A_{20}, \cdots$の入力が与えられると、

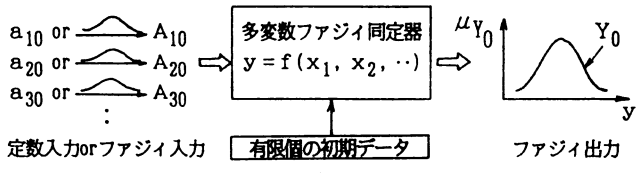


Fig.1 多変数ファジィ同定器の機能

ファジィ集合Y を出力することを目的とするものである。　本器は、Zadeh[(4)]によって指摘されているファジィ理論の有力な基本概念，内挿推論に基づくものであるが、初期データについては従来の工学的応用性に配慮し、非ファジィ的に与えるという単純化を図っている。

2．理論

2－1　前提及び仮定

関数，変数，及びデータの構造をFig.2 のように定義する。

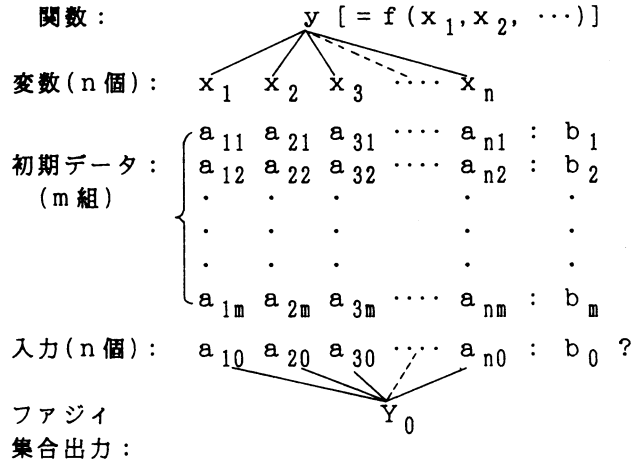


Fig.2　関数，変数，データ構造

未知の関数ｆ(・)はｎ個の変数からなり、ｍ組の初期データが既に与えられている場合、ｎ個の定数入力に対して出力b_0はどのように与えられるかという問題設定を行う。　本システムでは、ファジィ集合入力に対してはMax－Min演算を併用すればよいことになる。

内挿（外挿も含めて）は、線形補間によるものとする。　従って、関数が線形で、かつ、m=n+1 の場合は出力は正解値となるが、一般的には関数は非線形であることから推定値とは誤差を生じ、又、m<n+1 の場合はデータ不足，m>n+1 の場合は採用初期データの選択法により推定値に不確かさが侵入する。本報では、これらのあいまい性を山形帰属度関数の設定やその集合演算により処理し、ファジィ集合Y_0 として求める。

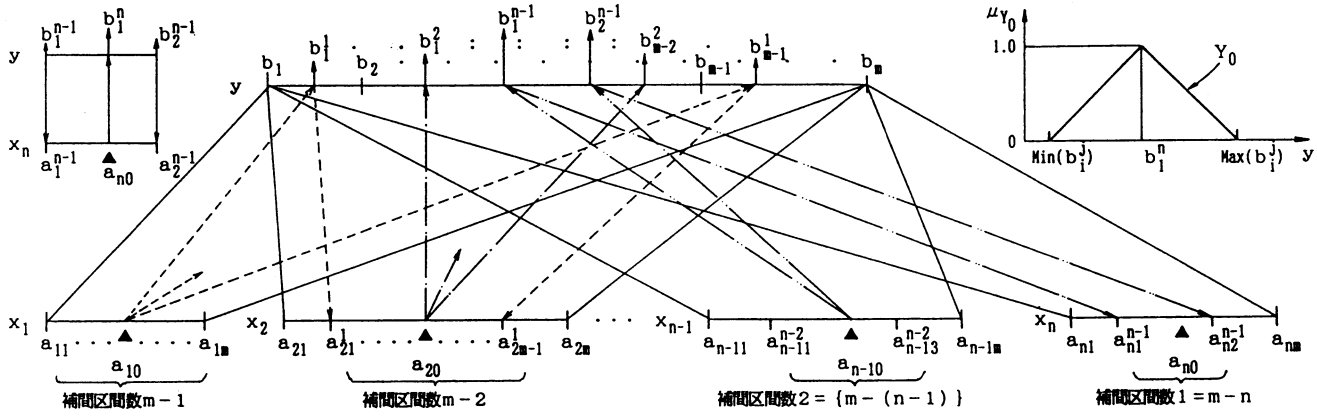


Fig.3 逐次補間法（m＝n＋1の場合）

2－2　m＝n＋1の場合

m=n+1 は、もっとも問題の少ない場合で、逐次補間法と一括補間法の２通りの線形補間が考えられる。前者はm<n+1，後者はm>n+1の場合に有効な手法となる。

（A）逐次補間法

Fig.3 に示されるような一種の図式解法のようなものである。　手順を以下に示す。

(1) 変数x_1～x_n及び出力yの初期データa_{11}～a_{1m}，～a_{n1}～a_{nm}，b_1～b_mを大小の順に並べ、各データセット毎の対応関係を示すネットワークを作成する。

(2) x_1の入力a_{10}について、x_1のm-1個の区間全てに関し、それを補間区間とするy 及びx_2～x_n上の線形補間値b_1^1～b_{m-1}^1，a_{21}^1～a_{2m-1}^1，‥‥を求め、大小順に並べ、各値毎の対応関係を示すネットワークを作成する。

(3) x_2の入力a_{20}について、x_2のm-2個の区間全てに関し、それを補間区間とするy 及びx_3～x_n上の線形補間値b_1^2～b_{m-2}^2，‥‥ を求め、大小順に並べ、各値毎の対応関係を示すネットワークを作成する。

(4) 以下同様の手順を繰り返す。

(5) x_{n-1}の入力a_{n-10}について、x_{n-1} の２個の区間全てに関し、それを補間区間とするy 及びx_n上の線形補間値b_1^{n-1}，b_2^{n-1}，a_{n1}^{n-1}，a_{n2}^{n-1}を求め、大小順に並べ、各値毎の対応関係を示すネットワークを作成する。（Fig.3 の左上の図）

(6) x_nの入力a_{n0} について、x_nの１個の区間に関し、それを補間区間とするy 上の線形補間値b_1^nを求める。（Fig.3 の左上の図）

(7) 最終的に、b_1^nの帰属度関数の値を1.0とし、y上の補間区間の両端の値についてこれ迄の手順における最大値と最小値を両端とする山形の帰属度関数を描き、これを推定値b_0のμ_{Y_0}とする。（Fig.3 の右上の図）

但し、上記手順中、補間が外挿になる場合は、Fig.4のように、補間区間の外端を$b_{i+1}^{j'}-b_k^{j+1}=b_{i+1}^j-b_i^j=\Delta y$なる$b_{i+1}^{j'}$に$b_{i+1}^j$を移す。　これは、解の存在の可能性を外挿故に拡大しようとするものである。

（B）一括補間法

関数を式(1) のｎ次元空間中の超平面とすれば、

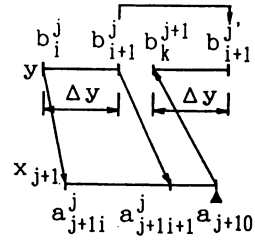


Fig.4 外挿の場合

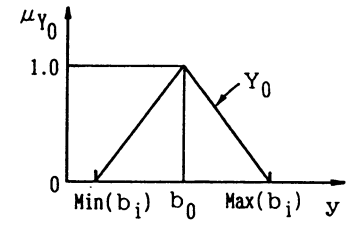


Fig.5 一括補間法によるY_0（m＝n＋1の場合）

$$y=\alpha_1x_1+\alpha_2x_2+\cdots+\alpha_nx_n+\alpha_{n+1} \quad (1)$$

式(2)の連立方程式からα_1～α_{n+1}が求まり（∵m=n+1）

$$\left.\begin{aligned}\alpha_1a_{11}+\alpha_2a_{21}+\cdots+\alpha_na_{n1}+\alpha_{n+1}&=b_1\\ \cdots\quad\cdots\quad\cdots\quad\cdots&\\ \alpha_1a_{1m}+\alpha_2a_{2m}+\cdots+\alpha_na_{nm}+\alpha_{n+1}&=b_m\end{aligned}\right\} \quad (2)$$

最終的にb_0が次式で算出される。

$$b_0=\alpha_1a_{10}+\alpha_2a_{20}+\cdots+\alpha_na_{n0}+\alpha_{n+1} \quad (3)$$

帰属度関数μ_{Y_0}は、Fig.5のようにMin(b_i)，Max(b_i)を両端とする山形で与える。　Fig.3右上図のb_1^nとFig.5のb_0とは一致する。　共に線形補間により唯一的に求まる解だからである。

2－3　m＜n＋1の場合

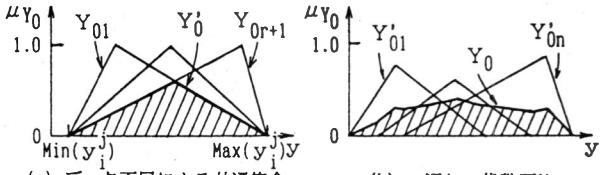
初期データ数が不十分な場合、逐次補間法によるしかないが、その不足数をr (=n+1-m)とすれば、Fig.3のx_nで補間区間数１の場合と同一条件の変数がr+1個生じる。　従って、先ずｒ個のY_{01}，‥‥，Y_{0r+1} の共通集合をY_0'とし、更に、逐次補間をx_1，‥‥，x_nから始めた各場合についてY_{0i}'とするならば、最終的なY_0 はY_{0i}'の代数平均で与えられることとする。（式(4)，(5)，Fig.6 参照）

$$Y_0'=Y_{01}\cap\cdots\cdots\cap Y_{0r+1} \quad (4)$$

$$\mu_{Y_0}=(\mu_{Y_{01}'}+\cdots+\mu_{Y_{0n}'})/n \quad (5)$$

2－4　m＞n＋1の場合

この場合は簡明な一括補間法を用いることとするが、問題は、${}_mC_{n+1}$個ある初期データセットの組み合わせ



(a) データ不足による共通集合　　(b) n通りの代数平均

Fig.6 逐次補間法によるY_0 （m＜n＋1の場合）

からどれを選ぶかということである。 本論では、次の方法を提案する。 先ず、初期データセットをn次元空間中の点D_iとし、入力点からのユークリッド距離$d_i(=\sqrt{(a_{10}-a_{1i})^2+\cdots+(a_{n0}-a_{ni})^2})$の小さい順に$D_1$, D_2, ･･･ と並べ、(1) $D_1 \sim D_{n+1}$, (2) $D_2 \sim D_{n+2}$, (3) $D_1 \sim (D_k$除去$) \sim D_{n+2}$ の３ケースを選出する。 各ケースのY_{0i}はFig.5のように求まり、最終的にはFig.7,

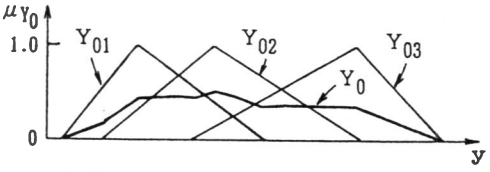


Fig.7 一括補間法によるY_0（m＞n＋1の場合）

式(6)のように代数平均で与えることとする。

$$\mu_{Y_0} = (\mu_{Y_{01}} + \mu_{Y_{02}} + \mu_{Y_{03}}) / 3 \qquad (6)$$

3．応用及び検証

本多変数同定器を既知の関数で比較的簡単な場合に応用(n=3, m=3,4,5)し、その有効性について検討した結果を示す。 既知関数として、$y=x_1 \cdot x_2+x_3$, $y=(x_2-x_3)/x_1$, $y=x_1/x_2+x_3$を用い、Case Studies 1,2,3としてFigs.8,9, Fig.10, Fig.11 に各々示した。 Case Study 2はCase Study 1でyとx_2を入れ換えたものである。 Figs.8,10,11 は、入力a_{10}, a_{20}, a_{30}をパラメトリックに変化させ正確値との差の分布を調べたものである。 Fig.9 は、単一入力の場合について帰属度関数の求め方のプロセスとその結果を示し、正確値と比較するものである。 Tables 8(a)(c)(e),10(a)(c)(e),11(a)(c)(e)は初期データの設定値をTables 8(b)(d)(f),10(b)(d)(f),11(b)(d)(f)は入力のパラメトリックな設定値を示す。 Figs.8(a)(c)(e),10(a)(c)(e), 11(a)(c)(e) は横軸にファジィ同定器より求まった帰属度関数のピークに対応するy_{cal}と、縦軸に既知関数から求めた正解値y_{real}をとって比較したものである。 Figs.8(b)(d)(f),10(b)(d)(f),11(b)(d)(f)は$e=y_{cal}-y_{real}$ を横軸にとり、その相対度数分布を描いたものである。 Fig.9の(a-1)(a-2)(a-3)は、m=3, n=3において、a_{10}, a_{20}, a_{30} から各々出発して逐次線形補間しようとした結果を、(a-4) はそれらの代数平均を示す。Fig.9(b)はm=3, n=4, Fig.9(c)はm=3, n=5の場合で共に一括補間法によるものである。

4．考察及び結

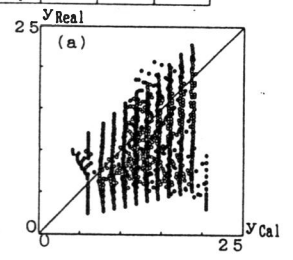
本多変数ファジィ同定器は線形補間を前提としており、非線形性の強い関数ほど誤差が大きくなる。 し

Table 8(a) 初期データ

j	1	2	3
a_{1j}	1	3	4
a_{2j}	2	3	5
a_{3j}	4	2	0.5
b_j	6	11	20.5

Table 8(b) パラメトリック入力

a_{10}	1~4 (0.3ピッチ)
a_{20}	2~5 (0.3ピッチ)
a_{30}	0.5~4 (0.35ピッチ)
合 計	1331点



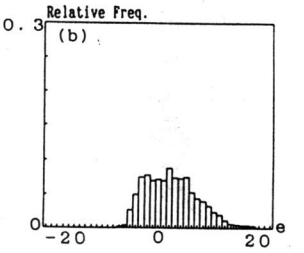
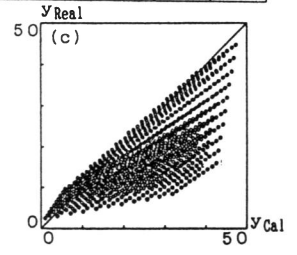


Table 8(c) 初期データ

j	1	2	3	4
a_{1j}	1	3	4	5
a_{2j}	2	3	5	8
a_{3j}	4	2	0.5	8
b_j	6	11	20.5	48

Table 8(d) パラメトリック入力

a_{10}	1~5 (0.4ピッチ)
a_{20}	2~8 (0.6ピッチ)
a_{30}	0.5~8 (0.75ピッチ)
合 計	1331点



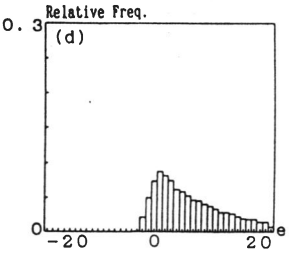
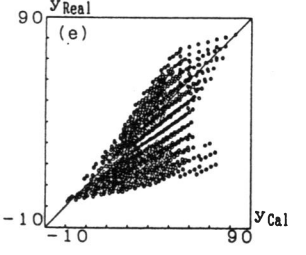


Table 8(e) 初期データ

j	1	2	3	4	5
a_{1j}	1	3	4	5	7
a_{2j}	2	3	5	8	10
a_{3j}	4	2	0.5	8	12
b_j	6	11	20.5	48	82

Table 8(f) パラメトリック入力

a_{10}	1~7 (0.6ピッチ)
a_{20}	2~10 (0.8ピッチ)
a_{30}	0.5~12 (1.15ピッチ)
合 計	1331点



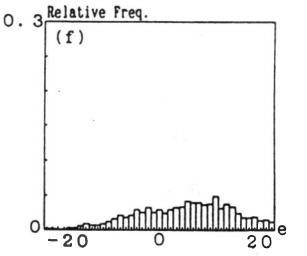


Fig.8 Case Study 1 (ﾊﾟﾗﾒﾄﾘｯｸ入力, $y=x_1*x_2+x_3$)

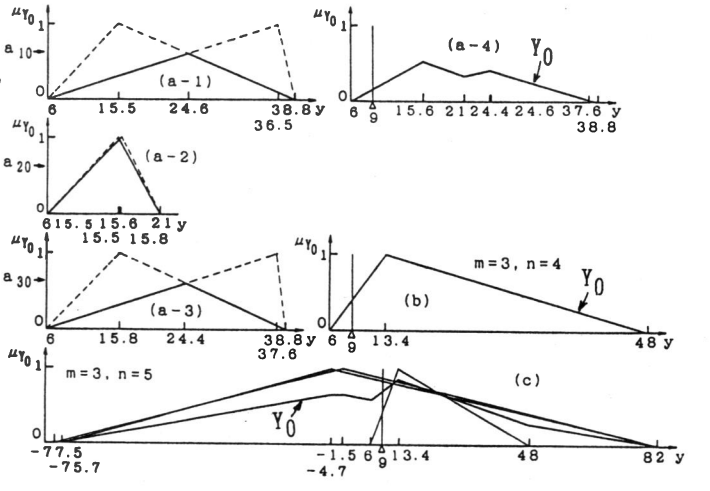


Fig.9 Case Study 1 (単一入力, $y=x_1*x_2+x_3$, $a_{10}=2$, $a_{20}=4$, $a_{30}=1$, $b_0=9$)

Table 10(a) 初期データ

i	1	2	3
a_{1i}	1	3	4
a_{2i}	6	11	20.5
a_{3i}	4	2	0.5
b_i	2	3	5

Table 10(b) パラメトリック入力

a_{10}	1~4 (0.3ピッチ)
a_{20}	6~20.5 (1.45ピッチ)
a_{30}	0.5~4 (0.35ピッチ)
合 計	1331点

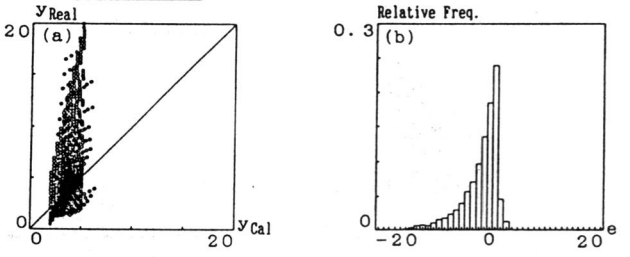


Table 10(c) 初期データ

i	1	2	3	4
a_{1i}	1	3	4	5
a_{2i}	6	11	20.5	48
a_{3i}	4	2	0.5	8
b_i	2	3	5	8

Table 10(d) パラメトリック入力

a_{10}	1~5 (0.4ピッチ)
a_{20}	6~48 (4.2ピッチ)
a_{30}	0.5~8 (0.75ピッチ)
合 計	1331点

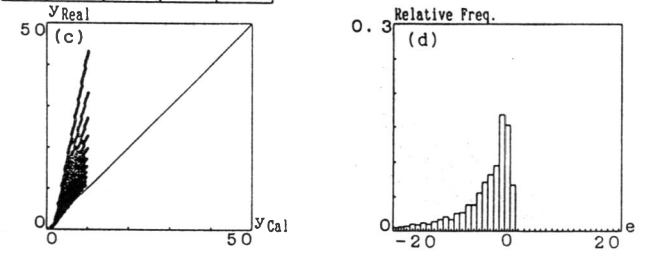


Table 10(e) 初期データ

i	1	2	3	4	5
a_{1i}	1	3	4	5	7
a_{2i}	6	11	20.5	48	82
a_{3i}	4	2	0.5	8	12
b_i	2	3	5	8	10

Table 10(f) パラメトリック入力

a_{10}	1~7 (0.6ピッチ)
a_{20}	6~82 (7.6ピッチ)
a_{30}	0.5~12 (1.15ピッチ)
合 計	1331点

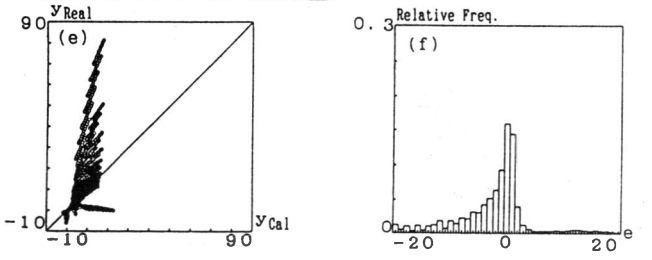


Fig.10 Case Study 2 (ﾊﾟﾗﾒﾄﾘｯｸ入力, $y=(x_2-x_3)/x_1$

Table 11(a) 初期データ

i	1	2	3
a_{1i}	1	3	4
a_{2i}	2	3	5
a_{3i}	4	2	0.5
b_i	4.5	3	1.3

Table 11(b) パラメトリック入力

a_{10}	1~4 (0.3ピッチ)
a_{20}	2~5 (0.3ピッチ)
a_{30}	0.5~4 (0.35ピッチ)
合 計	1331点

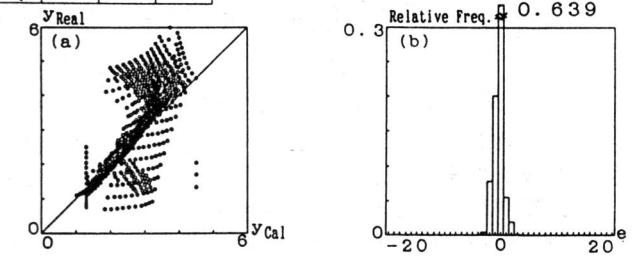


Table 11(c) 初期データ

i	1	2	3	4
a_{1i}	1	3	4	5
a_{2i}	2	3	5	8
a_{3i}	4	2	0.5	8
b_i	4.5	3	1.3	8.625

Table 11(d) パラメトリック入力

a_{10}	1~5 (0.4ピッチ)
a_{20}	2~8 (0.6ピッチ)
a_{30}	0.5~8 (0.75ピッチ)
合 計	1331点

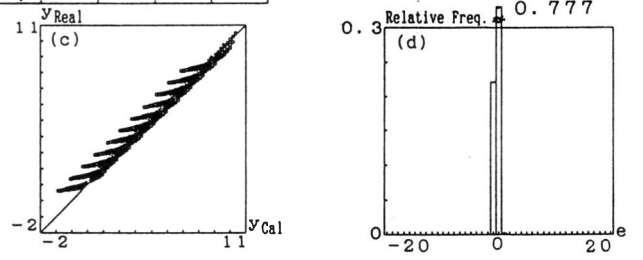


Table 11(e) 初期データ

i	1	2	3	4	5
a_{1i}	1	3	4	5	7
a_{2i}	2	3	5	8	10
a_{3i}	4	2	0.5	8	12
b_i	4.5	3	1.3	8.625	12.7

Table 11(f) パラメトリック入力

a_{10}	1~7 (0.6ピッチ)
a_{20}	2~10 (0.8ピッチ)
a_{30}	0.5~12 (1.15ピッチ)
合 計	1331点

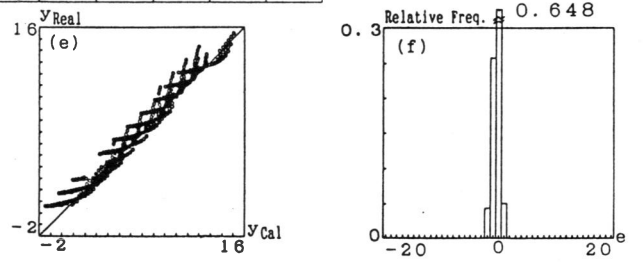


Fig.11 Case Study 3 (ﾊﾟﾗﾒﾄﾘｯｸ入力, $y=x_1/x_2+x_3$)

かし、Figs.8～11に示されるように、概ね良好な近似性を与えており、帰属度関数の分布形を考慮に入れれば、実用性は十分あるものと思われる。 本器は、機能的にはパーセプトロン(5) に端を発するニューラルネットワークと類似しているが、以下のような特色を有する。 (1) 収束計算が不必要である。(2) 出力がファジィ集合で与えられる。(3) 出力の精度（帰属度関数分布）が初期データの与え方の影響をうける。(4) 条件付ファジィ集合発生器とみなすこともできる。(5) ファジィ集合入力に対しても解を出力する。

更に、出力としてy_1のみでなく$y_1, y_2, \cdots$ と複数個

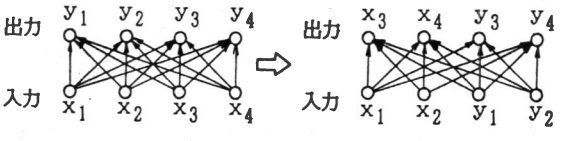


Fig.12 入出力の入れ替え

設定することも可能であり、その際一例としてFig.12に示すように、入出力の因子を任意に入れ換えることも即可能である。 Case Study 1と2 がその最も簡単な例である。 従って構造工学における最適構造計画等において有効な手法となるものと期待される。

文献

(1) Zadeh,L.A.:Fuzzy Sets, Information and Control, 8, 1965, pp.338～353.

(2) Bellman,R.E.,and Zadeh,L.A.:Decision-making in a Fuzzy Environment, Management Science, Vol.17, No.4, Dec. 1970, pp.B-141～164.

(3) 河村廣, Yao,J.T.P.:条件付ファジィ集合に基づくファジィシステムの構造工学への応用に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 36B, 1990年3月, pp.51～56.

(4) Zadeh,L.A.,(片井修, 和多田淳三, 記録編集):ファジィ理論の誕生とその発展－日本への期待－, 日本ファジィ学会誌, Vol. 2, No.2, May 1990, pp.182～195. (1989年11月講演記録)

(5) Rosenblatt,F.:The Perceptron:A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain, Psychological Review, Vol.65, No.6, 1958, pp.386～408.

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FA1-3

ファジィ対応の逆問題の超高速解法

Novel and High-Speed Method for Solving the Inverse Problem of Fuzzy Correspondence

林 陽一　　井村 敦
Yoichi Hayashi and Atsushi Imura
茨城大学工学部情報工学科
Department of Information Science, Ibaraki University

Abstract: The inverse problem of fuzzy correspondence was first formulated by Tsukamoto et al. in 1978. They proposed a method to solve the problem. However, Tsukamoto's method takes tremendous computaion time and requires large memory to solve the large scale inverse problem even in high performance computer environments. Thus, it is difficult to apply their method to real-time expert systems as an inference engine.

First, this paper proposes a novel and very fast method for solving the inverse problem of fuzzy correspondence. Next, the present paper shows that computational complexity of Tsukamoto's method is $O(m^{n+1}n)$. On the other hand, the present method requires $O(mn)$ time. We also prove the validity of the present method. Furthermore, to prove the practicability of the present method, results of numerical experiments are given. The results showed that the proposed method has a about four hundred thousand-fold speed-up on average for solving the inverse problem as compared with the previous method.

1. はじめに

ファジィ対応の逆問題[12]を解くことによる後向き推論は故障診断[1][13][14]，医療診断[3][10][15]等に用いられている．しかし，同問題に対する従来の解法は十分な推論時間を必要とするため，実時間系のエキスパートシステム等の推論エンジンとして従来の解法を用いるのは困難であった．そのため，ファジィ対応の逆問題に対する解法の高速化が必要となってきている．

Willaeysらは，原因数及び症状数が非常に多い場合，ファジィ対応の逆問題に対する従来の解法が多くの計算時間を必要とすることを指摘している．そこでは，原因と症状の因果関係の確からしさと症状の程度が区間値として与えられるファジィ関係式を考え，その逆問題の解の上限値及び下限値を それぞれSanchezのα-合成[9]及びCzogalaらのファジィ関係式の逆問題の解法[2]を独立に用いて計算する方法を提案している[1][14]．しかし，この解法はファジィ対応の逆問題を直接的に解くものではない．また，求められる解の性質及び解法の理論的計算量について十分検討されていない．林らは，原因数をm，症状数をnとするとき，塚本らが提案したファジィ対応の逆問題に対する解法の理論的計算量が$O(m^{n+1}n)$であることを示すと共に，実用的な観点から簡略化されたファジィ対応の逆問題に対して$O(mn)$の高速解法を提案している[4]．

一方，ファジィ逆問題の解法を用いた異常診断[6]，ファジィ逆問題の逐次解法[8]及びニューラルネットワークを用いた近似解法[5]が提案されている．

本研究では，原因数をm，症状数をnとするとき，ファジィ対応の逆問題に対して理論的計算量が$O(mn)$である高速解法を提案する．この高速解法では，従来の解法で得られるファジィ対応の逆問題の解の性質を解析することによって，ファジィ対応の逆問題の解を簡単かつ高速に求めることを可能にしている．

原因数を15，症状数を15とした時の数値実験では，平均して，提案した高速解法が従来の解法の約400000倍（最高約600000倍）の速度で後向きファジィ推論を実行した．

2 ファジィ対応の逆問題とその解法

2．1 ファジィ対応の逆問題

異なる2種類の事象からなる集合を

$$X=\{x_i \mid i=1, \cdots, m\}$$
$$Y=\{y_j \mid j=1, \cdots, n\}$$

とする．

［定義１］ファジィ集合

X，Yを全体集合とするファジィ集合A，Bを次のように書く．

$$A = \sum_{i=1}^{m} a_i / x_i, \quad a_i \in [0, 1]$$

$$B = \sum_{j=1}^{n} b_j / y_j, \quad b_j \in [0, 1]$$

ただし，a_i，b_jはそれぞれx_i，y_jがファジィ集合A，Bに属する度合を表す．

ファジィ集合A，Bは次のようなメンバシップグレードのベクトルで表現すると便利である．

$$\boldsymbol{a} = (a_1, \cdots, a_m)$$
$$\boldsymbol{b} = (b_1, \cdots, b_n)$$

Xを前提条件（例えば，原因の項目）の全体集合，Yを結論側（例えば，症状の項目）の全体空間とすれば前提条件から結論側を導く診断型システムが考えられ，前提条件の各項目x_iと結論側の各項目y_jの間に因果関係が生ずる．

［定義２］ファジィ関係

X×Y上のファジィ集合Cを次のように書く．

$$C = \sum_{i=1, j=1}^{m, n} r_{ij} / (x_i, y_j), \quad r_{ij} \in [0, 1]$$

ただし，r_{ij}は(x_i, y_j)がファジィ集合Cに属する度合を表している．

ファジィ関係は次のようなメンバシップグレードの行列で表現すると便利である．

$$\boldsymbol{R} = \{r_{ij}\}$$

［定義３］ファジィ関係式

AとCの合成がBになるとき次のように書ける．

$$A \circ C = B$$

これはファジィ関係式と呼ばれる次の演算規則に従う．

$$\boldsymbol{a} \circ \boldsymbol{R} = \boldsymbol{b}$$

ただし，$a_i, b_j, r_{ij} \in [0, 1]$，$\circ$はmax-min合成を意味する．

［定義４］ファジィ関係式の逆問題

症状の程度，原因と症状の間の因果関係として，$\boldsymbol{R}$，$\boldsymbol{b}$の各要素が区間[0, 1]の一つの数値として与えられたとき，$\boldsymbol{a} \circ \boldsymbol{R} = \boldsymbol{b}$を満足する全ての$\boldsymbol{a}$を求める．

ところで，ファジィ関係はファジィ集合Aに対してファジィ集合Bで決まる．すなわち，写像

$$\boldsymbol{R} : \tilde{P}(X) \rightarrow \tilde{P}(Y)$$

で表現される．これに対して，ファジィ対応はファジィ集合Aに対してファジィ集合のファジィ集合B[7]で決まる．すなわち，写像

$$\tilde{R} : \tilde{P}(X) \rightarrow \tilde{P}(\tilde{P}(Y))$$

で表現される．ただし，$\tilde{P}(X)$はX上の全てのファジィ集合の族を表す．

原因と症状の間の因果関係として，X×Y上のtype2のファジィ集合[7] Cが与えられたとき，ファジィ対応$\tilde{R}$が一つ決まる[12]．

［定義５］ファジィ対応の逆問題

症状の程度，原因と症状の間の因果関係として，

$\tilde{\boldsymbol{b}} \subset [0, 1]^n$，$\tilde{\boldsymbol{R}} \subset [0, 1]^{m \times n}$が与えられたとき，

ファジィ対応の逆写像$\tilde{R}^{-1}$（$\tilde{\boldsymbol{b}}$）を求める．

ただし，$\tilde{\boldsymbol{b}}$はファジィ集合Bのベクトル表現，$\tilde{R}$はファジィ集合Cの行列表現である．

ファジィ対応の逆問題に対する解法が，塚本らによって提案されている[12]．そこでは，ファジィ対応の逆写像のαカット集合を$\boldsymbol{a} \circ \bar{\boldsymbol{R}} = \bar{\boldsymbol{b}}$の逆問題を解くことによって求めている．

［定義６］ファジィ対応の逆問題の解

$$\bar{\boldsymbol{a}} = \{ \boldsymbol{a} \mid \exists \boldsymbol{R}, \exists \boldsymbol{b} ; \ \boldsymbol{R} \in \bar{\boldsymbol{R}}, \ \boldsymbol{b} \in \bar{\boldsymbol{b}}, \ \boldsymbol{a} \circ \boldsymbol{R} = \boldsymbol{b} \}$$

ここで，$\bar{\boldsymbol{R}} = \{\bar{r}_{ij}\}$及び$\bar{\boldsymbol{b}} = (\bar{b}_1, \cdots, \bar{b}_n)$はそれぞれ$\tilde{R}_\alpha$及び$\tilde{b}_\alpha$（$\tilde{\boldsymbol{R}}$及び$\tilde{\boldsymbol{b}}$のαカット集合）に対応する[0, 1]内の実数の区間の集合を要素とする行列及びベクトルである．また，$\boldsymbol{R} \in \bar{\boldsymbol{R}}$，$\boldsymbol{b} \in \bar{\boldsymbol{b}}$はそれぞれ$\forall j, b_j \in \bar{b}_j$及び$\forall i, \forall j, r_{ij} \in \bar{r}_{ij}$を意味する．

本研究では，塚本らのファジィ対応の逆問題に対する解法の高速化を行った．次章で，高速解法アルゴリズムの詳細について述べる．

２．２　ファジィ対応の逆問題の解法

本節では，ファジィ対応の逆問題に対する解法を簡単に述べる[12]．

ε-合成及び$\tilde{\varepsilon}$-合成は次のように定義される．

二つの区間値集合[a, b]，[c, d]⊂[0, 1]に対して，

$$[a, b] \varepsilon [c, d] = \begin{cases} [c, 1] & , \text{if } [a, b] \cap [c, d] \neq \phi \\ [c, d] & , \text{if } a > d \\ \phi & , \text{if } b < c \end{cases}$$

$$[a, b] \tilde{\varepsilon} [c, d] = \begin{cases} [0, d] & , \text{if } a > d \\ [0, 1] & , \text{otherwise} \end{cases}$$

ただし，ϕは空集合を意味する．

以下に，解法アルゴリズムを示す．

ステップ1

$m \times n$行列$\bar{U} = \{\bar{u}_{ij}\}$，$\bar{V} = \{\bar{v}_{ij}\}$を求める．

ただし，

$$\bar{u}_{ij} = \bar{r}_{ij} \ \varepsilon \ \bar{b}_j$$
$$\bar{v}_{ij} = \bar{r}_{ij} \ \tilde{\varepsilon} \ \bar{b}_j$$

ここで，$\exists j, \forall i, \bar{u}_{ij} = \phi$ならば，"解なし"で終了する．

ステップ2

$m \times n$行列$\bar{W}^k = \{\bar{w}^k_{ij}\}$を求める．ただし，$\bar{W}^k$行列の各要素は各$j$列ごとに次のように与えられる．

$$\bar{w}^k_{ij} = \begin{cases} \bar{u}_{ij} & \text{for } \exists_1 i \in \{i \mid \bar{u}_{ij} \neq \phi\} \\ \bar{v}_{ij} & \text{for other } i\text{'s} \end{cases}$$

ここで，$\exists_1 i$は$\bar{u}_{ij} \neq \phi$を満足するiの中からただひとつだけ取り出すことを意味する．すなわち，この行列はiの取り方によりその組合せの数だけ存在する．kはこのあらゆる組み合わせを順に番号付けしたときのインデッ

クスを表している．

ステップ3

$\bar{a}^k$ を求める．ただし，

$$\bar{a}^k = (\bar{a}^k_1, \bar{a}^k_2, \cdots, \bar{a}^k_m),$$

$$\bar{a}^k_i = \bigcap_{j=1}^{n} \bar{w}^k_{ij}$$

ステップ4

ファジィ対応の逆問題の解 $\bar{a}$ を求める．ただし，

$$\bar{a} = \bigcup_{k \in K} \bar{a}^k ,$$

$$K = \{k \mid \forall i ; \bar{a}^k_i \neq \phi\}$$

ここで，$K=\phi$ ならば，"解なし"で終了する．

3　ファジィ対応の逆問題の高速解法

本章では，ファジィ対応の逆問題に対する高速解法を提案する．ファジィ対応の逆問題の従来の解法は原因数及び症状数が非常に多い場合，膨大な数の $\bar{W}^k$ 行列を作るため，多くの実行時間を必要とした．しかし，提案する解法は $\bar{W}^k$ 行列を作らないため，従来の解法と比較して非常に効率が良い．

以下に，高速解法アルゴリズムを示す．

ステップ1

$m \times n$ 行列 $\bar{U}=\{\bar{u}_{ij}\}$, $\bar{V}=\{\bar{v}_{ij}\}$ を求める．このとき，$\bar{U}$ 行列の各行 i の空集合以外の要素の上限値の最小値を以下のように求める．

$$UMIN_i = \min_j \bar{u}_{ij(u)}$$

ただし，$\bar{u}_{ij(u)}$ は $\bar{u}_{ij}$ の上限値を意味する．

ここで，$\exists j, \forall i, \bar{u}_{ij}=\phi$ ならば，"解なし"で終了する．

ステップ2

$m \times n$ 行列 $C=\{c_{ij}\}$ を求める．ただし，

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 & , \text{if } \bar{u}_{ij} \neq \phi \text{ and } \bar{u}_{ij} \neq \bar{v}_{ij} \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases}$$

これは従来の解法[13]において，$\bar{W}^k$ 行列を生成することに対応している．

このとき，C行列の各列 j ごとの和を以下のように求める．

$$CSUM_j = \sum_{i=1}^{m} c_{ij}$$

ステップ3

$c_{ij}=1$ かつ $\bar{u}_{ij(l)} > UMIN_i$ であるとき，c_{ij} の1を0に変更しCSUM$_j$ を1だけ減らす．この修正によってCSUM$_j$=0となったとき，" 解なし" で終了する．これは，従来の解法の第 i 行に対する $\bar{a}^k_i \neq \phi$ を満足していない場合，"解なし" で終了することに対応している．

ただし，$\bar{u}_{ij(l)}$ は $\bar{u}_{ij}$ の下限値を意味する．

ステップ4

ファジィ対応の逆問題の解 $\bar{a}$ の第 i 要素 $\bar{a}_i$ を以下のように求める．

$\bar{a}_i$ はC行列の第 i 行に対して $c_{ij}=1$ かつCSUM$_j$=1を満足する j 列が

(Ⅰ)全くない場合

$$\bar{a}_i = [0 \quad , \quad UMIN_i]$$

(Ⅱ)少なくとも一つある場合

$$\bar{a}_i = [\max_{j_t} \bar{u}_{ij_t(l)} \quad , \quad UMIN_i]$$

となる．

ただし，j_t はC行列の第 i 行において $c_{ij}=1$ かつCSUM$_j$=1を満足する列である．

ここで，ファジィ対応の逆問題の解について，次の定理を示す．

[定理1]　ファジィ対応の逆問題に対する解 $\bar{a}$ の第 i 要素 $\bar{a}_i$ はステップ4で示したように求められる．

(証明)

従来の解法に基づいて証明を進める．

(Ⅰ)　C行列の第 i 行に対して $c_{ij}=1$ かつCSUM$_j$=1を満足する j 列が全くない場合

次の2つの場合(Ⅰ-1)，(Ⅰ-2)が考えられる．

(Ⅰ-1)　C行列の第 i 行に1である要素 c_{ij} が全くない場合

従来の解法のステップ2で求められた $\bar{W}^k$ 行列の第 i 行の全ての要素が $\bar{V}$ 行列の要素である．従って，(Ⅰ-1)の場合のファジィ対応の逆問題の解の第 i 要素は，従来の解法のステップ3，4より，以下のように求めることができる．

$$\bar{a}_i = [0 \quad , \quad UMIN_i]$$

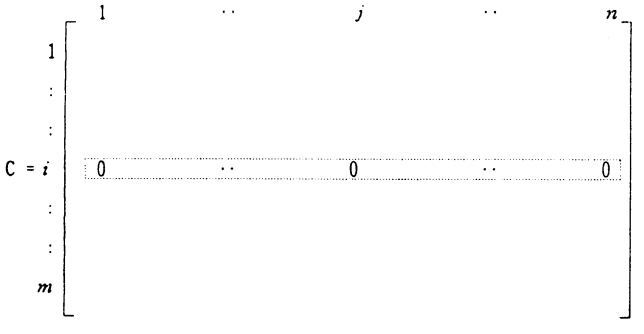


図1　(Ⅰ－1)の場合

(Ⅰ-2)　C行列の第 i 行に1である要素 c_{ij} があるが，CSUM$_j$=1を満足する列がない場合

このような列を j_q $(1 \leq q \leq p)$ とする．ここでは，従来の解法における $\bar{W}^k$ 行列に対応する C^k 行列を考える．この

場合，次の2つの場合(ⅰ)，(ⅱ)が考えられる．

(ⅰ)　C^k行列の第i行において，j_q列のどれかに少なくともひとつ1である要素がある場合

従来の解法のステップ3から，　$\bar{a}^k$の第i要素$\bar{a}^k{}_i$は次のように求めることができる．

$$\bar{a}^k{}_i = [\max_{j_q} \bar{u}_{i j_q(l)} , \ UMIN_i]$$

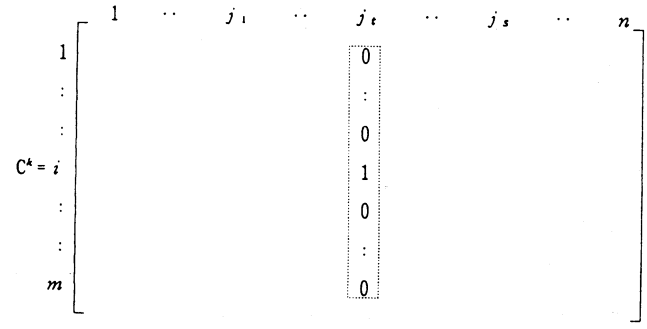


図2　(ⅰ)の場合

(ⅱ)　C^k行列の第i行において，全てのj_q列に1である要素が全くない場合

(ⅰ)と同様に，$\bar{a}^k$の第i要素$\bar{a}^k{}_i$は次のように求めることができる．

$$\bar{a}^k{}_i = [0 \qquad , \ UMIN_i]$$

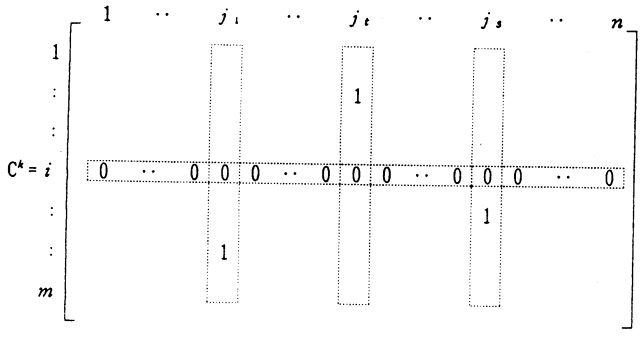


図3　(ⅱ)の場合

従来の解法のステップ4から，　ファジィ対応の逆問題の解は，従来の解法のステップ3で求められた$\bar{a}^k$の和をとることによって求められる．

従って，(ⅰ)，(ⅱ)より，(Ⅰ-2)の場合のファジィ対応の逆問題の解の第i要素は，次のように求められる．

$$\bar{a}_i = [\max_{j_q} \bar{u}_{i j_q(l)} , \ UMIN_i] \cup [0 \qquad , \ UMIN_i]$$

$$= [0 \qquad , \ UMIN_i]$$

従って，(Ⅰ-1)，(Ⅰ-2)より，(Ⅰ)の場合のファジィ対応の逆問題に対する解の第i要素は次のように求められる．

$$\bar{a}_i = [0 \qquad , \ UMIN_i]$$

(Ⅱ)　C行列の第i行に対して，$c_{ij}=1$かつ$CSUM_j=1$を満足するj列が少なくとも一つある場合

このような列を$j_t$$(1 \leq t \leq s)$とする．(Ⅰ-2)と同様に，従来の解法における$W^k$行列に対応する$C^k$行列を考える．この場合，次の2つの場合(Ⅱ-1)，(Ⅱ-2)が考えられる．

(Ⅱ-1)　C^k行列の第i行において，各j_t列に1である要素がある場合

(ⅰ)と同様に，$\bar{a}^k$の第i要素$\bar{a}^k{}_i$は次のように求めることができる．

$$\bar{a}^k{}_i = [\max_{j_t} \bar{u}_{i j_t(l)} , \ UMIN_i]$$

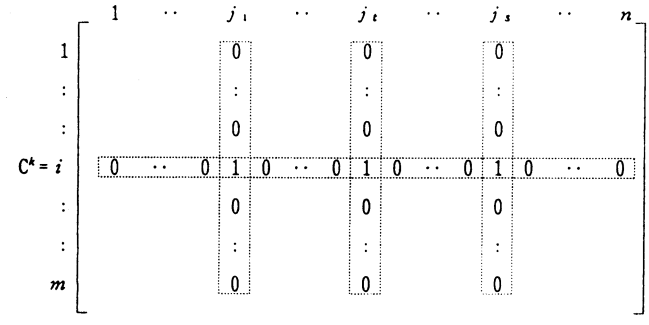


図4　(Ⅱ-1)の場合

(Ⅱ-2)　C^k行列の第i行において，j_t列以外の列にも1である要素がある場合

(ⅰ)と同様に，$\bar{a}^k$の第i要素$\bar{a}^k{}_i$は次のように求めることができる．

$$\bar{a}^k{}_i = [\max_{j} \bar{u}_{i j(l)} , \ UMIN_i]$$

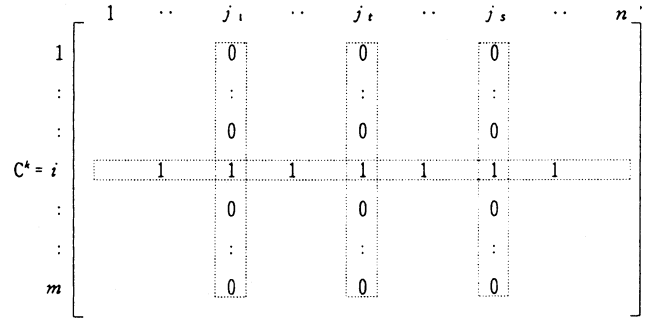


図5　(Ⅱ-2)の場合

従来の解法のステップ4から，ファジィ対応の逆問題の解は，従来の解法のステップ3で求められた $\bar{a}^k$ の和をとることによって求められる．

従って，(Ⅱ-1)，(Ⅱ-2)より，(Ⅱ) の場合のファジィ対応の逆問題の解の第 i 要素は，次のように求められる．

$$\bar{a}_i = [\max_{j_t} \bar{u}_{i j_t(l)},\ UMIN_i] \cup [\max_{j} \bar{u}_{i j(l)},\ UMIN_i]$$

$$= [\max_{j_t} \bar{u}_{i j_t(l)},\ UMIN_i]$$

従って，[定理1] は証明される．(証明終)

4　従来の解法と高速解法の比較

4．1　理論的計算量による比較

本節では，塚本らによって提案されたファジィ対応の逆問題に対する解法[12]と本研究で提案したファジィ対応の逆問題に対する高速解法の理論的計算量の比較を行う．なお，原因数及び症状数をそれぞれ m，n とする．

塚本らによって提案された解法については，次の定理が林らによって示されている．

[定理2][4]　ファジィの対応の逆問題に対する塚本らの解法の理論的計算量は $O(m^{n+1}n)$ である．

本研究では，塚本らによって提案された解法に対して，さらに厳密な計算量を示す．

塚本らによって提案された解法のステップ1で生成される $\bar{U}$ 行列の j 列において要素 $\bar{u}_{ij}$ が空集合ではなくかつ $\bar{v}_{ij}$ と等しくないという割合を p_j とする．

このとき，塚本らによって提案された解法について，次の定理を示す．

[定理3]　p_j (j =1, ･･･, n) が与えられているとき，ファジィ対応の逆問題に対する塚本らの解法の理論的計算量は $O(m^{n+1} n \prod_{j=1}^{n} p_j)$ である．

(証明) ステップ1で作られた $\bar{U}$ 行列から p_j (j =1, ･･, n) が求められるとき，ステップ2では，

$$p_1 m \times p_2 m \times \cdots \times p_n m = m^n \prod_{j=1}^{n} p_j$$

個の $\bar{W}^k$ 行列が作られる．一方，$\bar{a}^k{}_i$ を求める手間は症状数 n に比例する．従って，$\bar{a}$ を求める手間は $m^{n+1} n \prod_{j=1}^{n} p_j$ に比例する．よって，[定理3] が証明される．(証明終)

本研究で提案した高速解法について，次の定理を示す．

[定理4]　提案した高速解法の理論的計算量は $O(mn)$ である．

(証明)

ファジィ対応の逆問題の解 $\bar{a}$ の第 i 要素 $\bar{a}_i$ を求める手間は症状数 n に比例する．従って，ファジィ対応の逆問題の解 $\bar{a}$ を求める手間は mn に比例する．従って，[定理4] は証明される．(証明終)

4．2　数値実験による比較

本節では，提案した解法の有効性を SUN SPARC Station 330 上で行った数値実験(原因数:15，症状数：15)の結果によって示す．

実験として，原因と症状の間の因果関係及び症状の程度に対して図6で示すメンバシップ関数で定義されたファジィ集合をランダムに設定した異なる5例題を用いて，従来の解法と提案した高速解法をそれぞれ用いて後向きファジィ推論を行った．その推論時間を表1に示す．従来の解法を用いた場合，例題によって異なる推論時間で後向き推論を実行しているが，一方，提案した高速解法を用いた場合，どの例題でもほぼ一定の推論時間で後向き推論を実行している．また，平均して，提案した高速解法は従来の解法の約400000倍（最高約600000倍）の速度で後向き推論を実行しており，提案した高速解法の有効性が確かめられた．

表1　計算時間の比較（単位：秒）

例題	従来の方法	高速解法
1	17297.69	0.03
2	3837.38	0.05
3	22517.17	0.04
4	4637.95	0.04
5	24285.43	0.04
平均	14515.12	0.04

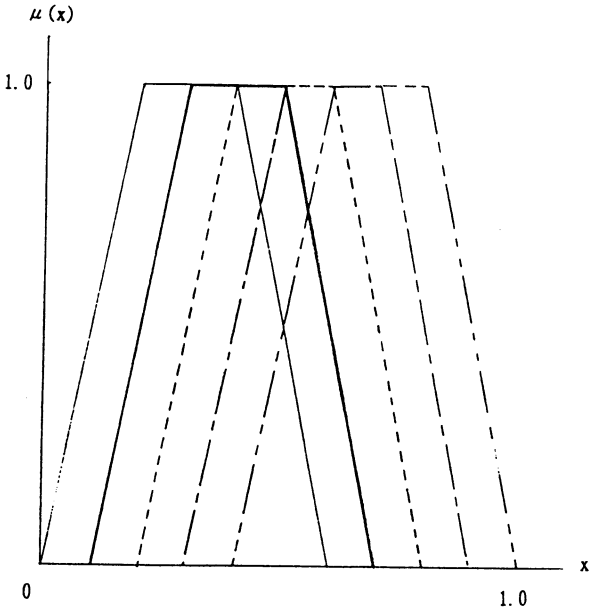


図6　メンバシップ関数の例

5　おわりに

本研究では，ファジィ対応の逆問題に対して，理論的

計算量が$O(mn)$の高速解法を提案した．さらに，数値実験によって，提案した高速解法が従来の解法と比較してかなり速い推論速度で後向きファジィ推論を実行できることを示した．また，提案した高速解法は，ファジィ論理（ Fuzzy Modus Ponens, Fuzzy Modus Tollens ）とファジィ対応の逆問題の解法の併用による診断法[13]にも容易に適用でき，診断の飛躍的な高速化が可能になることから，現実問題への応用可能性がさらに大きくなると考えられる．

参考文献

(1) Asse, A., Mangin, P. and Willaeys, D. : Assisted Diagnosis Using Fuzzy Information : Method of Inverting Equations of Fuzzy Relations with Φ Fuzzy Sets, Analysis of Fuzzy Information, Vol. 2, CRC Press, 153/162, 1987

(2) Czogala, E., Drewniak, J. and Pedrycz, W. : Fuzzy Relation Equations on a Finite Set, Fuzzy Sets and System, Vol. 7, 89/101, 1982

(3) Hayashi, Y., Tazaki, E., Yoshida, K. and Dey, P. : Medical Diagnosis Using Simplified Multi-dimensional Fuzzy Reasoning, Proc. of IEEE 1988 Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 1, 58/62, Beijing., 1988

(4) 林 陽一，井村 敦 : 簡略化されたファジィ対応の逆問題の高速解法，第11回知識・知能システムシンポジウム，139/144 ，1990

(5) 廣田 薫，生駒 哲一 : ニューラルネットワークを用いたFuzzy逆問題の解法，第15回システム/第10回知識工学合同シンポジウム講演論文集，257/260，1989

(6) 丸山 能生，高橋 亮一 : 異常診断におけるあいまい推論の試み，日本原子力学会誌，Vol. 27, No. 9, 851/860, 1985

(7) Mizumoto, M. and Tanaka, K. : Some Properties of Fuzzy Sets of Type 2, Information and Control, Vol. 31, 312/340, 1976

(8) 野本 弘平，桐元 哲郎，大橋 由昌，広瀬 保嘉，古川裕之 : 逐次型ファジィ後向き推論による目標識別，第5回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，481/486，1989

(9) Sanchez, E. : Resolution of composite fuzzy relation equations, Information and Control, Vol. 30, 38/48, 1976

(10) Tazaki, E., Hayashi, Y., Yoshida, K. and Koiwa, A. : Development of Automated Health Testing and Services System via Fuzzy Reasoning, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, Atlanta, 342/346, 1986

(11) 寺野 寿郎，浅居 喜代治，菅野 道夫 : ファジィシステム入門，オーム社，1987

(12) 塚本 弥八郎，田代 勤 : Fuzzy逆問題の解法，計測自動制御学会論文集，Vol. 15, No. 1, 21/25, 1979

(13) Tsukamoto, Y. : Fuzzy Logic Based on Lukasiewicz Logic and Its Applications to Diagnosis and Control, Doctor Thesis, Tokyo Institute of Technology, 1979

(14) Willaeys, D., Moreau, A. and Asse, A. : Processing Subjective Information for Diagnostic Assistance, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 28, 375/385, 1988

(15) 吉田 勝美，田崎 栄一郎，林 陽一，大坪 豊，島田 直樹 : Evolutionary法を持つファジィ逆問題による診断支援システム，第9回医療情報学連合大会論文集，61/64，1990

問い合わせ先：〒316 日立市中成沢町4-12-1
茨城大学工学部情報工学科
林 陽一
TEL 0294-35-6101, 内線 392
FAX 0294-34-3254

FA2-1

ファジィ制御系のチューニング方法

A Tuning Method of Fuzzy Control System

林　真司
Shinji HAYASHI
(株)東芝　総合研究所
Toshiba Corp.　R & D Center

Abstract : The control performance of fuzzy contorl system depends on it's control rules, menbership functions and scaling factors. But it is very difficult to tune them and requires human's trial and error.

The paper suggests a concept of tuning method and proposes a tuning method of scaling factors and tuning method of control rules. Former is similar to Ziegler-Nichols or CHR method and latter is based on control performances.

1. はじめに

ファジィ制御は、熟練オペレータの知識や現場のノウハウをIF－THEN型ルールで実現できるものとして注目を集め、実用化が盛んとなっている。しかしながら、ファジィ制御の性能は、制御ルール、メンバーシップ関数、スケーリングファクタなどの制御パラメータに大きく依存する。また、ファジィ制御を実プラントに適用する場合は、これらの制御パラメータの調整が必要となる。従って、これらパラメータの調整方法の確立が実用化のために非常に重要である。現状のファジィ制御の調整は、実プラント、またはそのシミュレータを利用して制御試験を行い、応答波形などの制御結果から試行錯誤的に最適化する方法が一般的である。そこで、パラメータの調整方法すなわちチューニング方法の確立がファジィ制御においても研究課題であり、人間の試行錯誤をファジィ推論で実現する学習型コントローラ[1)2)3)]やニューラルネットワークを応用した方法[4)5)]が提案されている。しかしながら、これらの手法は主に繰り返し学習を前提としているためシミュレータを用いた知識獲得やパラメータ調整には有効であるが、繰り返し同じ操業を行うことの少ない実プラントに適用するのは難しい。

本論文では、ＰＩ型ファジィコントローラを取り上げ、上述の課題を考慮した実用性を重視したチューニングの基本方針とスケーリングファクタチューニング方法、制御ルールチューニング方法を提案する。スケーリングファクタチューニング方法は、制御対象を簡単なモデルで近似し、モデルパラメータとスケーリングファクタの関係を導出するもので、ＰＩＤ制御の現調などでよく用いられているZiegler-Nichols 法やＣＨＲ法の概念を応用したチューニング方法である。制御ルールチューニング方法は、立ち上がり時間や整定時間などの制御評価量と制御ルールをグループ分割したものを対応させてチューニングする方法である。

2. チューニングの基本方針

本論文で対象とするＰＩ型ファジィコントローラの基本構成を図１に示す。

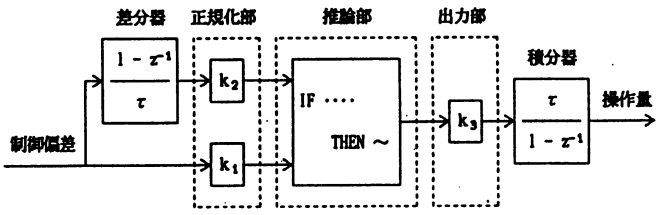


図１ ファジィコントローラの基本構成

本論文で対象とするチューニングパラメータはスケーリングファクタ(正規化ゲイン、制御ゲイン)と制御ルールの２つである。以下、各パラメータを整理する。

①スケーリングファクタ

スケーリングファクタには正規化ゲインと制御ゲインがある。

ⓐ正規化ゲイン

制御偏差と制御偏差の変化率を正規化する式(1)のパラメータ k_1 と k_2

$$\begin{cases} E = k_1 * e(k) \\ DE = k_2 * de(k) \end{cases} \qquad (1)$$

e(k):制御偏差,E:制御偏差正規化値,
de(k):制御偏差差分,DE:制御偏差差分正規化値

ⓑ制御ゲイン

操作量の変化量の正規化値を実操作量に変換する式(2)のパラメータ k_3

$$du(k) = k_3 * DU \qquad (2)$$

du(k):操作量の変化量,DU:操作量の変化量の正規化値

②制御ルール

制御ルールの後件部のファジィ変数

チューニングパラメータは上述のスケーリングファ

クタと制御ルールであるが、制御ルールの調整は繰り返し学習を必要とする場合が多い。そこで、繰り返しを最小限に抑えるチューニング方法の手順としては、図2に示すようにスケーリングファクタを中心に調整し、満足できない場合に制御ルールを調整する。

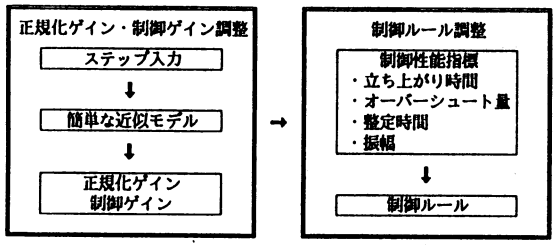


図2 チューニング方法の手順

なお、本論文で検討するＰＩ型ファジィコントローラの制御ルールの初期値を表1のルールテーブルに、前件部メンバーシップ関数を図3に、後件部メンバーシップ関数の初期値を図4に示す。

表1 制御ルールの初期値

E＼DE	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

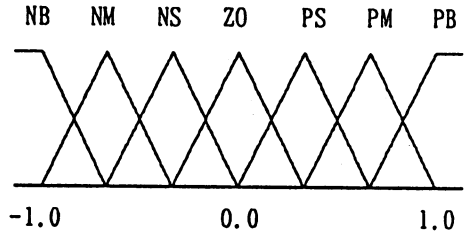


図3 前件部メンバーシップ関数

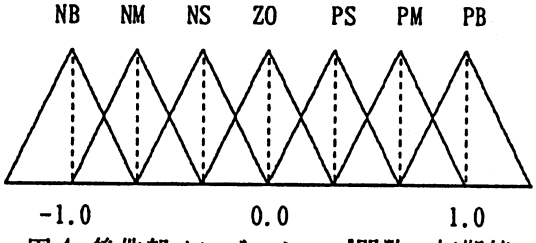


図4 後件部メンバーシップ関数の初期値

3. スケーリングファクタチューニング方法

ここでは、スケーリングファクタ(正規化ゲイン・制御ゲイン)のチューニング方法を検討する。これらのパラメータは実測定値とファジィ台集合を対応づけるもので対象の何らかの特徴量からチューニングすることが考えられるが、ファジィコントローラの適用対象は特性のよくわからないものが多く対象の簡単なデータからチューニングできる方法が求められる。そこで、ＰＩＤ制御の現調の概念を応用して、対象の簡単なモデルからチューニングする方法を考える。

[問題の設定]

制御対象を簡単なモデルで近似し、モデルパラメータからスケーリングファクタ $\{k_1, k_2, k_3\}$ を決定するチューニング式を導出する。モデルとして、式(3)、式(4)の２タイプを考える。

タイプ1

$$G(s) = \frac{R}{s} e^{-Ls} \qquad (3)$$

タイプ2

$$G(s) = \frac{K}{1 + Ts} e^{-Ls} \qquad (4)$$

[チューニング式の導出]

ファジィコントローラを適用する制御対象の時定数は秒単位から時間単位まであると考えられるので、時間スケール変換が可能なチューニング式とする必要がある。そこで、まず、時間スケール変換可能条件を導く。

時間スケール変換可能条件

ファジィコントローラの出力は、式(5)で与えられる(連続時間システム)。

$$u = \frac{k_3}{s} * F(k_1 * E, k_2 * s * E) \qquad (5)$$

$F(x1, x2)$：ファジィ推論による非線形関数

ここで、スケール変換 $s = as'$ により、変換された制御対象に対して得られたパラメータを $\{b_1, b_2, b_3\}$ とする。このとき操作量の出力は式(6)となる。

$$u = \frac{b_3}{s'} * F(b_1 * E, b_2 * s' * E) \qquad (6)$$

ここで、式(6)を元の時間スケールｓに戻すと、式(7)となる。

$$\begin{cases} k_1 = b_1 \\ k_2 = b_2 / a \\ k_3 = b_3 * a \end{cases} \qquad (7)$$

従って、式(7)のパラメータが元のパラメータと一致するには、k_1は元と同じ値となる関数、k_2は元の値のａ倍となる関数、k_3は元の値の1/ａ倍となる関数にする必要がある。また、時間スケール変換によりむだ時間Ｌ、時定数Ｔ[ｓ]はａ倍、最大傾斜Ｒ[1/ｓ]は1/ａ倍となる。このとき、時間スケール変換可能条件は、各パラメータに対して式(8)となる。

$$\begin{cases} dim(k_1) = [-] \\ dim(k_2) = [s] \\ dim(k_3) = [1/s] \end{cases} \qquad (8)$$

ただし、dim(X)はＸの単位を表す。

特徴量とパラメータの関係式

①タイプ1

タイプ1の場合、モデルパラメータ{L,R}からスケーリングファクタ{k_1, k_2, k_3}を決定する問題となる。まず、式(9)で示すように制御ゲインk_3は最大傾斜{R}の逆数に比例すると仮定する。

$$k_3 = k_3'/R \tag{9}$$

このとき、モデルパラメータ{L,R}からスケーリングファクタ{k_1, k_2, k_3}を決定する問題がパラメータ{L}からパラメータ{k_1, k_2, k_3'}を決定する問題となる。すなわち、{k_1, k_2, k_3'}はRに関係なく決定できる。従って、式(8)のスケール変換可能な条件は式(10)となる。

$$\begin{cases} dim(k_1) = [-] & (\propto \text{定数}) \\ dim(k_2) = [s] & (\propto L) \\ dim(k_3') = [1/s^2] & (\propto 1/L^2) \end{cases} \tag{10}$$

式(9),(10)から、{L,R}と{k_1, k_2, k_3}との間に式(11)の関係式が求まる。

$$\begin{cases} k_1 = \alpha_1 \\ k_2 = \alpha_2 * L \\ k_3 = \dfrac{\alpha_3}{R * L^2} \end{cases} \tag{11}$$

次に、関係式(11)のパラメータ{$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$}を決定する。まず、$\alpha_1$は実制御偏差を[-1,1]にスケーリングする正規化ゲインであるので、制御偏差の最大値の逆数とすべきである。従って、目標値の最大変化幅をr_{MAX}とすれば、式(12)で求まる。

$$\alpha_1 = 1.0/r_{MAX} \tag{12}$$

次に、α_2は実制御偏差の変化率を[-1,1]にスケーリングする正規化ゲインであるので、α_1と同様、目標値最大変化幅に反比例すると考える。最後に、α_3は[-1,1]を実操作量にスケーリングするので、目標値の最大変化幅に比例すべきである。従って、{α_2, α_3}と目標値の最大変化幅に式の関係が成立する。

$$\begin{cases} \alpha_2 = \beta_2/r_{MAX} \\ \alpha_3 = \beta_3 * r_{MAX} \end{cases} \tag{13}$$

式(13)のパラメータ{β_2, β_3}は制御対象の動特性に関係する。そこで、{L,R}={1.0,1.0}とした制御対象に対するシミュレーションにより{β_2, β_3}={4.5,0.128}に決定した。図5にパラメータを決定したときのシミュレーション結果を示す。

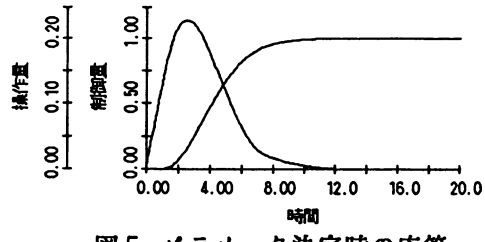


図5 パラメータ決定時の応答

以上の検討から、スケーリングファクタ{k_1, k_2, k_3}をモデルパラメータ{L,R}から求める定式化ができた。関係式を以下にまとめる。

$$\begin{cases} k_1 = \dfrac{1.0}{r_{MAX}} \\ k_2 = \dfrac{4.5 * L}{r_{MAX}} \\ k_3 = \dfrac{0.128 * r_{MAX}}{R * L^2} \end{cases} \tag{14}$$

②タイプ2

タイプ2の場合、モデルパラメータ{L,T,K}からスケーリングファクタ{k_1, k_2, k_3}を決定する問題となる。まず、式(15)に示すように制御ゲインk_3が制御対象のゲイン{K}の逆数に比例すると仮定する。また、式(16)で定義する仮想時定数を導入する。

$$k_3 = k_3'/K \tag{15}$$

$$T' = L + T \tag{16}$$

このとき、モデルパラメータ{L,T,K}からスケーリングファクタ{k_1, k_2, k_3}を決定する問題がパラメータ{T'}からパラメータ{k_1, k_2, k_3'}を決定する問題となる。従って、式(8)のスケール変換可能な条件は式(17)となる。

$$\begin{cases} dim(k_1) = [-] & (\propto \text{定数}) \\ dim(k_2) = [s] & (\propto T') \\ dim(k_3') = [1/s] & (\propto 1/T') \end{cases} \tag{17}$$

式(9),(17)から、{L,T,K}と{k_1, k_2, k_3}との間に式(18)の関係式が求まる。

$$\begin{cases} k_1 = \alpha_1 \\ k_2 = \alpha_2 * (L+T) \\ k_3 = \dfrac{\alpha_3}{K * (L+T)} \end{cases} \tag{18}$$

次に、関係式(18)のパラメータ{$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$}は、タイプ1と同様に次のように決定する。

$$\begin{cases} \alpha_1 = 1.0/r_{MAX} \\ \alpha_2 = \gamma_2/r_{MAX} \\ \alpha_3 = \gamma_3 * r_{MAX} \end{cases} \tag{19}$$

式(19)のパラメータ{γ_2, γ_3}は制御対象の動特性に関係する。そこで、{K,T,L}={1.0,1.0,1.0}とした制御対象に対するシミュレーションにより{γ_2, γ_3}={0.5,0.9}に決定した。図6にパラメータを決定したときのシミュレーション結果を示す。

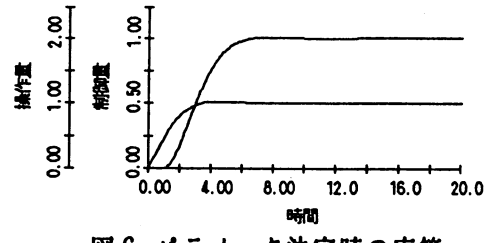


図6 パラメータ決定時の応答

以上の検討から、スケーリングファクタ{$k_1, k_2,$

k_3〕を制御対象のゲインK・時定数T・むだ時間Lから決定する定式化ができた．関係式を以下にまとめる．

$$\begin{cases} k_1 = \dfrac{1.0}{r_{MAX}} \\ k_2 = \dfrac{0.5*(L+T)}{r_{MAX}} \\ k_3 = \dfrac{0.9*r_{MAX}}{K*(L+T)} \end{cases} \qquad (20)$$

［シミュレーションによる評価］

いくつかの制御対象に対する目標値ステップ変化シミュレーションにより、求めたスケーリングファクタチューニング式を評価し、満足できる結果が得られた．シミュレーション結果は紙面の都合により当日示す．各タイプに対するシミュレーション項目は以下の通りである．

4．ルールチューニング方法

ここでは、制御ルールのチューニングを検討する．制御ルールは、目標値変更時の立ち上がり時間・オーバーシュート量・整定時間・ＩＴＡＥ・定値制御時の外乱に対する最大偏差・整定時間などの制御評価量と制御ルールをグループ分割したものを対応させてチューニングする方法を検討した．以下、立ち上がり時間を評価量とした制御ルールのチューニングについて示す．立ち上がり時間に対応するグループとして選択した制御ルールを図７に示す．また、制御ルールチューニング用のルールを式(21)に示す．

E \ DE	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	▒	▒	▒	▒	▒	▒	
NM	▒	▒	▒	▒	▒		
NS							
ZO							
PS							
PM			▒	▒	▒	▒	▒
PB		▒	▒	▒	▒	▒	▒

図７ 制御ルールのグループ(立ち上がり時間)

$$\begin{cases} \text{IF RT is slow THEN drule is P} \\ \text{IF RT is just THEN drule is Z} \\ \text{IF RT is fast THEN drule is N} \end{cases} \qquad (21)$$

ここで、RTは立ち上がり時間の評価量、slow, just, fastはRTに対するファジィ変数、druleは制御ルール変更量はＰ，Ｚ，Ｎ:druleに対するファジィ変数である．

また、ルール変更は、式(21)で得られたdruleを用いて、後件部が三角型の場合はその中心ｐを、後件部が実数の場合は実数値ｐを式(22)により変更することで行う．

$$p_{NEW} = p_{OLD} + drule \qquad (22)$$

立ち上がり時間による制御ルールチューニングを評価するためシミュレーションを行った．図８にチューニング前とチューニング後の応答を示した．立ち上がり時間が改善されているのがわかる．

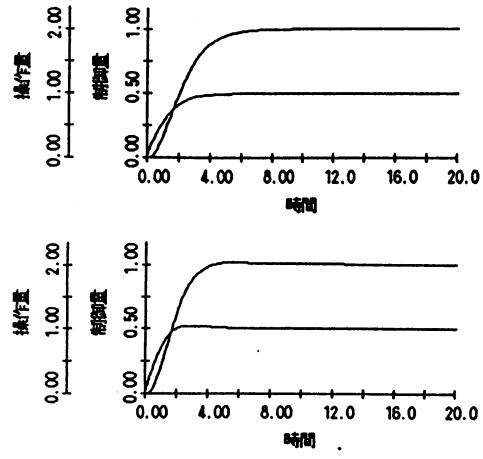


図８ 制御ルールのチューニング結果

5．おわりに

本論文では、まず制御対象を簡単なモデルで近似し特徴量からZiegler-Nichols 法やＣＨＲ法の概念を応用したスケーリングファクタチューニング方法を提案した．次に、制御評価量と制御ルールのグループを対応づけたルールチューニング方法を提案した．

参考文献

1)T.J.PROCYK and E.H.MAMDANI : A Linguistic Self-Organizing Process Controller ; Automatica, 15, 15/30 (1979)

2)山崎・菅野：自動学習ファジーコントローラ；計測自動制御学会論文集, 20-8, 720/726 (1984)

3)前田・村上・山崎：自己調整ファジィ制御装置の設計；第５回「ファジィシステムシンポジウム」講演論文集, 89/94 (1989)

4)林・野村・若見：ニューラルネット駆動型ファジィ推論による倒立振子の学習制御；第５回「ファジィシステムシンポジウム」講演論文集, 183/187(1989)

5)高木他：ニューラルネットワークを用いたファジィ制御；第５回「ファジィシステムシンポジウム」講演論文集, 151/156(1989)

［問い合わせ先］

〒210 川崎市川崎区浮島町4-1

(株)東芝 総合研究所 エネルギー機器研究所

林 真司

TEL 044-288-8020(ダイヤルイン)

FAX 044-299-3630

FA2-2

一次遅れ＋むだ時間系における ファジィコントローラの最適調整

A New Tuning Method of Fuzzy Controllers for A First Order Lag System with Dead Time

朝山 宏　森永智昭　佐野 学　田中一男
Hiroshi ASAYAMA　Tomoaki MORINAGA　Manabu SANO　Kazuo TANAKA
金沢大学　機械システム工学科
Kanazawa University　Department of Mechanical Systems Engineering

ABSTRACT

This paper proposes a new tuning method of fuzzy controllers for a first order lag system with dead time. We have carried out computer simulations of fuzzy control for a first order lag system with dead time. Two parameters of fuzzy controllers, domains of fuzzy sets in the antecedent, are tuned to correspond with the optimum response. We find the relation between the parameters and gain constant, time constant and dead time.

1．はじめに

制御対象の伝達関数が未知であるプラントをＰＩＤ制御する場合のＰＩＤ調節器の制御パラメータ値は、制御対象の伝達関数を一次遅れ＋むだ時間で近似し、ＰＩＤ値調整公式[2]を適用することによって求められる。しかし、これをファジィ制御にかえた場合の調整法は確立されておらず試行錯誤的に調整を行なっている。ファジィ制御の調整パラメータとしてはファジィ集合の幅[4]～[6]や制御規則などがあげられる。本論文では、前件部ファジィ集合の定義域の幅を調整用のパラメータとし、一次遅れ＋むだ時間系のファジィ制御を行い、最適な制御結果を得るようにパラメータを調整し、その時のゲイン定数・むだ時間・時定数とパラメータとの関係を明らかにする。

2．ファジィ推論

最適調整を行なうファジィコントローラの構成は以下のようなものである。

前件部変数は出力の偏差Ｅと１サンプリング時間におけるＥの変化分ｄＥ（偏差速度）とし、後件部変数は操作量Ｕの変化分ｄＵとしている。このとき、ファジィ推論の制御規則は次のように記述される。

$$R_i: \text{if } E \text{ is } A_{i1} \text{ and } dE \text{ is } A_{i2} \text{ then } dU \text{ is } B_i \quad i=1,2,\cdots,n \qquad (1)$$

ただし、iは制御規則の番号、A_{i1}, A_{i2}は前件部ファジィ変数、B_iは後件部ファジィ変数、nは制御規則数である。

ここで前件部ファジィ変数は図１に示すように連続型で、後件部ファジィ変数は表１に示すように離散型で表わされるものとする。このとき、(1)式の制御規則は表２のように表わされる。

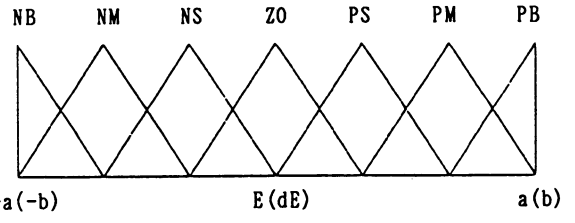


図１　前件部ファジィ変数

表１　後件部ファジィ変数

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
PB	100	75	50	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PM	0	25	50	75	100	75	50	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PS	0	0	0	0	0	25	50	75	100	75	50	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ZO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	50	75	100	75	50	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	50	75	100	75	50	25	0	0	0	0	0
NM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	50	75	100	75	50	25	0
NB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	50	75	100

表2　制御規則表

		dE						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
	NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZO	PS
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM	PB
	PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

ただし、ファジィ集合のラベルは

NB = Negative Big
NM = Negative Medium
NS = Negative Small
ZO = Zero
PS = Positive Small
PM = Positive Medium
PB = Positive Big

を意味する。

偏差および偏差速度がE_θ, dE_θで与えられた場合、推論値Y_θは次の重み付き平均で求められる。

$$\omega_i = \min \{A_{i1}(E_\theta), A_{i2}(dE_\theta)\} \quad (2)$$

$$B_i^* = \min \{\omega_i, B_i\} \quad (3)$$

$$B_\theta(Y) = \bigcup_{i=1}^{n} B_i^* \quad (4)$$

$$Y_\theta = \frac{\sum_{Y=1}^{m} B_\theta(Y) \times Y}{\sum_{Y=1}^{m} B_\theta(Y)} \qquad Y = 1, 2, \cdots, m \quad (5)$$

ただし、mは後件部ファジィ集合の台集合の要素数である。

後件部ファジィ集合の台集合を［－C，C］で規格化すると操作量dU_θは次の式で求められる。

$$dU_\theta = C \times \frac{Y_\theta - 13}{12} \quad (6)$$

本研究では、C＝60で一定とした。

3．最適調整

ファジィ制御の調整パラメータとしてファジィ集合の幅や制御規則があげられる。今回は、偏差および偏差速度の前件部ファジィ変数の定義域をそれぞれ［－a，a］、［－b，b］とし、a，bを調節することにより一次遅れ＋むだ時間系の最適制御を行い、a，bと時定数，ゲイン定数，むだ時間との関係を見つけ出す。

前件部ファジィ変数の定義域を変えることにより、入力された偏差および偏差速度の適用されるファジィ集合と、推論される制御規則が変わり、それによって操作量が変化する。

今、一例としてaが6と9の場合を考える。図2に示すように、偏差E_θが入力されたとすると、a＝6の場合の該当するファジィ集合はPM，PBであり、a＝9の場合のファジィ集合はPS，PMである。そのため、a＝6のときは式(1)でA_{i1}＝PM，PB、a＝9のときはA_{i1}＝PS，PMであり、適用される制御規則が異なる。

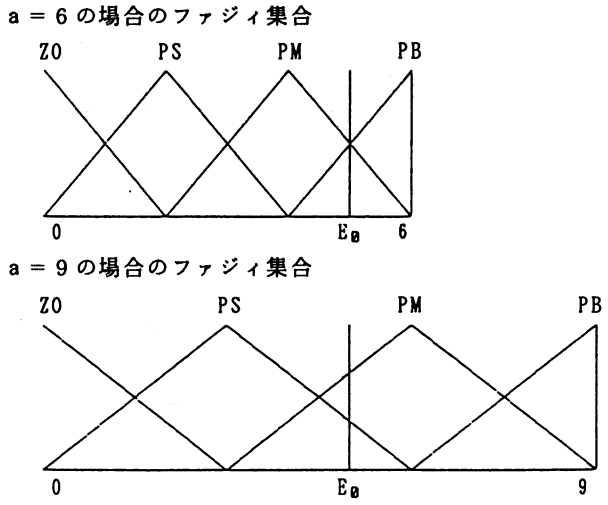


図2　a＝6と9の場合のファジィ集合の違い

a＝10，20，30の場合についてのステップ応答を図3に示す。また、b＝2，3，4の場合のステップ応答を図4に示す。図3，図4から、aはPI調節器の比例ゲインK_pに、bは積分時間T_Iに相当することがわかる。

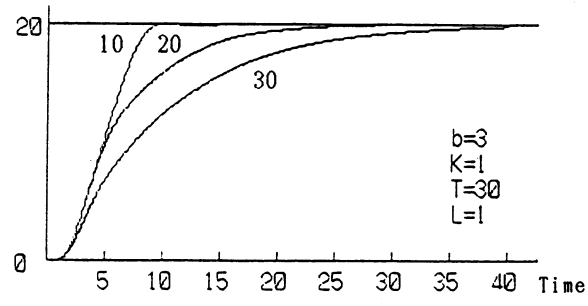


図3　a＝10，20，30のステップ応答

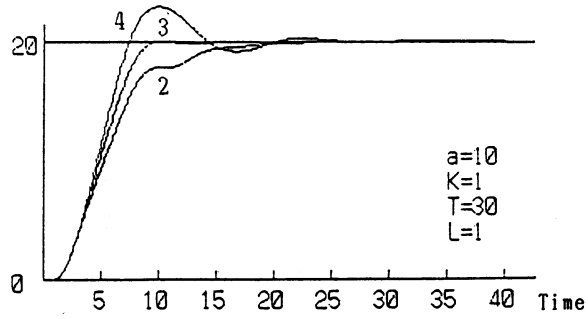


図4　b＝2，3，4のステップ応答

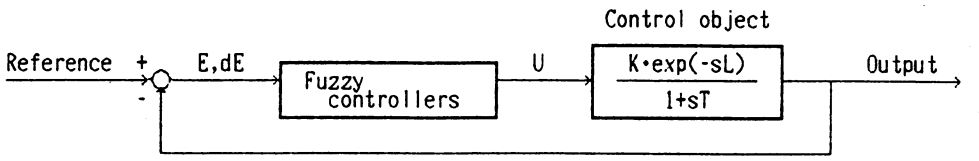


図５　一次遅れ＋むだ時間系のファジィ制御

一次遅れ＋むだ時間系のＰＩ制御の場合、ＰＩ調節器の調整パラメータ値である比例ゲインＫｐと積分時間Ｔｉは以下の式で求められる。

$$K_p = 0.6 \times T / K L \quad (7)$$

$$T_I = T \quad (8)$$

ただし、Ｔは時定数、Ｋはゲイン定数、Ｌはむだ時間である。

図５に一次遅れ＋むだ時間系のファジィ制御のブロック線図を示す。

制御対象の伝達関数は次のように表わされる。

$$G(s) = \frac{K \times \exp(-sL)}{(1+sT)} \quad (9)$$

表３　一次遅れ＋むだ時間系の最適調整値

T	L	K	a	b	T	L	K	a	b
10	1	0.5	15	5	20	3	1.5	268	31
		1.0	31	10			2.0	339	40
		1.5	46	15	15		0.5	79	10
		2.0	62	19			1.0	173	23
	2	0.5	55	10			1.5	308	40
		1.0	107	21			2.0	403	53
		1.5	213	41	5		0.5	127	30
		2.0	280	54			1.0	313	71
	3	0.5	96	15			1.5	472	107
		1.0	218	34			2.0	633	140
		1.5	372	58	30	1	1.0	10	3
		2.0	500	78	25			14	4
	4	0.5	182	25	20			17	5
		1.0	371	50	15			23	7
		1.5	546	74	5			54	20
		2.0	737	98	30	2		48	7
	5	0.5	243	30	25			53	8
		1.0	496	60	20			68	10
		1.5	729	88	15			79	13
		2.0	937	113	5			159	44
30	3	0.5	46	5	30	4		216	18
		1.0	96	10	25			250	22
		1.5	149	16	20			280	27
		2.0	275	28	15			317	35
25		0.5	58	6	5			439	89
		1.0	119	13	30	5		301	22
		1.5	236	25	25			350	27
		2.0	305	33	20			385	33
20		0.5	63	7	15			429	42
		1.0	135	16	5			561	103

この系にファジィＰＩ制御を行い、行き過ぎ量を２０％許した場合の応答のうちで整定時間の最も早いときの ａ，ｂの値を表３に示す。また、ａ，ｂとＴ，Ｋ，Ｌの関係の例を図６～図８に示す。なお、対象としたＴ，Ｋ，Ｌの範囲はＴ＝［５，３０］，Ｋ＝［０．５，２．０］，Ｌ＝［１，５］であり、サンプリング時間は ０．１である。

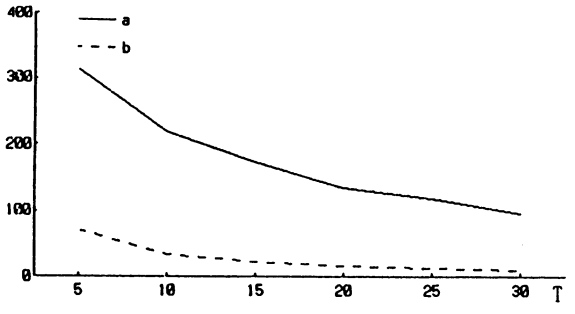


図６　Ｔとａ，ｂの関係（K=1, L=1）

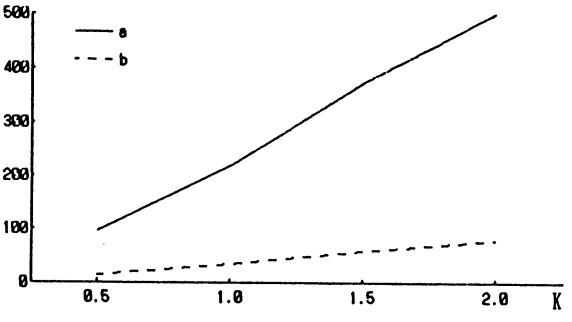


図７　Ｋとａ，ｂの関係（T=10, L=1）

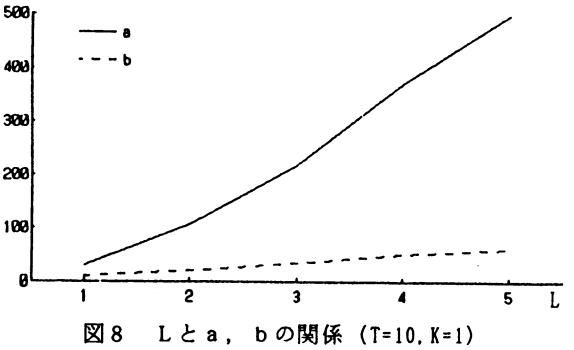


図８　Ｌとａ，ｂの関係（T=10, K=1）

表３の値から最小２乗法によって関係式を導出すると、以下の式になる。

$$\begin{aligned}\text{Log } a = {} & 0.00055T^2-0.506467K^2-0.150775L^2 \\ & +0.006932TK-0.024174KL+0.009399TL \\ & -0.095745T+2.286769K+1.496003L+1.143533 \quad (10)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Log } b = {} & 0.002081T^2-0.543533K^2-0.088207L^2 \\ & +0.007169TK-0.025100KL+0.003328TL \\ & -0.157577T+2.369946K+0.956347L+0.965124 \quad (11)\end{aligned}$$

式(10)(11)を用いて、最適調整をおこなった場合のコントローラに対するシミュレーション結果の例を図９．１～図９．３に示す。

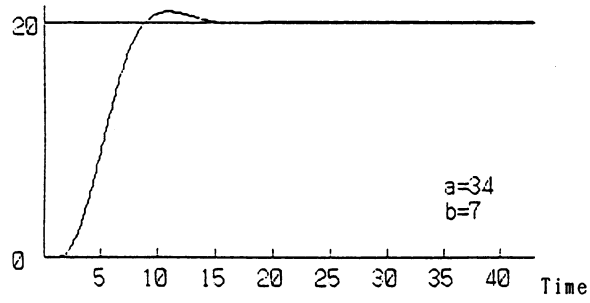


図９．１　シミュレーション結果 (K=1.3 T=28 L=1.5)

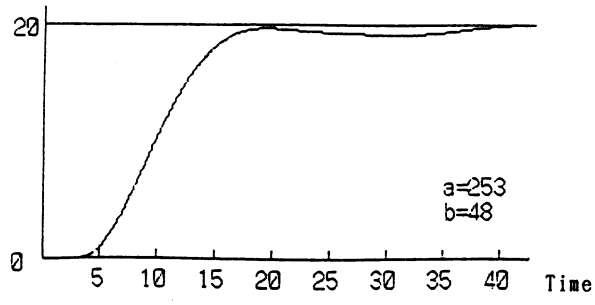


図９．２　シミュレーション結果 (K=0.7 T=5.3 L=3.5)

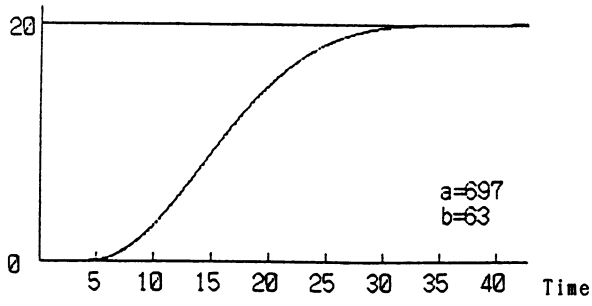


図９．３　シミュレーション結果 (K=1.8 T=17.8 L=4.5)

４．結論

前件部ファジィ変数の定義域の幅を調整パラメータとし、ファジィコントローラの最適調整をおこなうための、ゲイン定数，むだ時間，時定数とパラメータとの関係式を求めることができた。

参考文献

［１］菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社　(1988)

［２］増淵正美：改訂自動制御基礎理論，コロナ社(1977)

［３］河合素直：制御工学，昭晃堂(1983)

［４］水本雅晴：ファジィ制御に対するの改善法，第３回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 P.153-158,(1987)

［５］水本雅晴：ファジィ制御に対する改善法（Ⅱ），第４回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 P.91-96,　(1988)

［６］水本雅晴：ファジィ制御の改善法（Ⅲ），第５回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 P.499-504,(1989)

問い合わせ先

〒920 金沢市小立野2-40-20

金沢大学工学部機械システム工学科　　田中　一男

TEL　0762-61-2101 EXT.405　　FAX　0762-63-3849

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FA2-3

ニューラルネットワークを用いたメンバーシップ関数の学習法

A Learning Method of The Membership Function with Neural Networks

山岡正人　　向殿政男
Masato Yamaoka　　Masao mukaidono
明治大学　理工学部
School of Science and Technology　Meiji University

Astract

We have proposed a learning method of the membership function with neural networks. Usually the membership function was determined by trial-and-error,and it was fixed through fuzzy inferences. It is well known that the neural network has learning function and non-linearity as properties.So in this paper we show the method that we identify the flexible membership function with neural networks by and also show that with learned membership function we can obtain the most desirable Right-Hand-Side in the fuzzy inference.

1．はじめに

従来のファジィ理論に於ける推論では，メンバーシップ関数は三角形などで近似され，推論機構としては，頭切り法が主として用いられている．本論文では，代表的な入力に対するメンバーシップ関数の値からニューラルネットワークでメンバーシップ関数を学習させる．また，与えられたファジィルールの前件部と後件部のファジィ集合を与えることで，ニューラルネットワークでファジィ推論機構部を学習させる．更に，これに基づいてファジィ推論をさせた結果と従来の手法で推論させた結果とを比較する．

2．ニューラルネットワーク

ニューラルネットワークとはニューロンから成る大規模ネットワークのことで，この一つ一つのニューロンの動作が脳の情報処理体系を築き上げている．そしてニューラルネットワークには自己組織化能力があり，自ら学習，記憶していく能力がある．ネットワークのモデルとしては一般的に二つに大別できる．一つは階層型ネットワークでもう一つは相互結合型ネットワークである．図1に階層型ネットワークを示す．

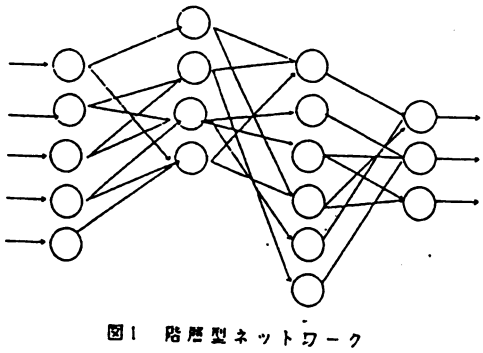


図1　階層型ネットワーク

2．1バックプロパゲーション法

バックプロパゲーション法とは，階層型ネットワークに於て行われる最も一般的な学習方法である．ここでいう学習とは，「ニューラルネットワークにあるパターンが与えられるとネットワークはあるパターンに対処できるようにニューロン間の結合すなわちシナプス結合係数を変化させ，目的に合うように調節する」ということを意味している．階層型ネットワークに於て，入力信号は入力層，中間層，そして出力層へと流れ出力層のニューロンから出力値が出される．もし，出力値が望ましい値と異なっていたとすると，望ましい値と実際の出力との誤差を出力層及び中間層にフィードバックさせ，入力-中間層間と中間-出力層間のシナプス結合係数を変化させて出力値が望ましい値になるまでこれらの操作を繰り返すのである．いま，入力層k番目ニューロンの出力をxk，中間層j番目ニューロンの出力をxj，出力層i番目ニューロンの出力をxi，望ましい出力値をdiとする．望ましい出力値diと実際の出力値との誤差が無い状態が望ましいので，誤差信号をIとすると，

$$I = \sum_{i=1}^{N} (xi-di)^2 \qquad (1)$$

が0になればよいことになる．そこでシナプス結合係数を変えて誤差信号Iをできるだけ小さくする方法を考える．最終的には次のようにすればよいことが知られている．

$$\delta wij=-a\cdot(xi-di)\cdot f'\Big(\sum_{i}\sum_{i\neq j} wij\cdot xj-hi\Big)\cdot xj \qquad (2)$$

$$\delta wjk=-a\cdot(xi-di)\cdot f'\Big(\sum_{i}\sum_{i\neq j} wij\cdot xj-hi\Big)\cdot f'\Big(\sum_{j}\sum_{j\neq k} wjk\cdot xk-hj\Big)\cdot xk \qquad (3)$$

ここで表されるδwij，δwjkはそれぞれ中間-出力層間と入力-中間層間のシナプス結合係数の修

正量を表している．またaは係数を表すとともに，hi,hjはそれぞれ出力層i番目ニューロンと中間層j番目ニューロンの閾値を表している．関数fは(4)式で示されるようなシグモイド型関数であり，f'はfの微分である．

$$f(x)=1/(1+\exp(-x)) \qquad (4)$$

式(2)と(3)からシナプス結合係数の修正量が出力層から中間層，そして中間層から入力層へと逆に計算されていることが分かる．これよりこの学習法がバックプロパゲーション法(誤差後方伝播法)と呼ばれている．

3．メンバーシップ関数の学習

以下にメンバーシップ関数を学習させる方法を提案する．

取り扱うべき推論システムの入力をx，ファジィ集合をAj(j=1,･･･,n)とする．またそのとき，ファジィ集合のメンバーシップ関数を学習させる階層型ニューラルネットワーク1に於て，入力層，中間層，出力層の各ニューロン数をそれぞれ1,m,nとする．つまり出力ニューロン数はファジィ集合の個数に対応しているわけである．(図2)

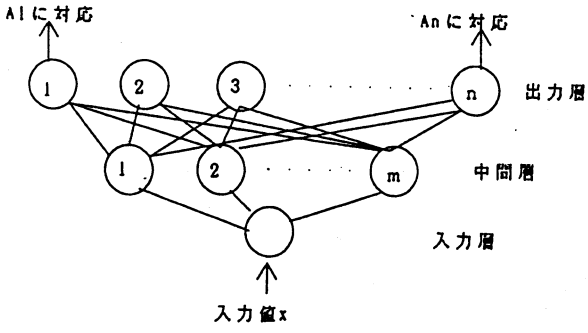


図2　メンバーシップ関数を学習するネットワーク1

本稿では，バックプロパゲーション法に於けるニューロンの活性値が連続値であることに注目し，その連続値をメンバーシップ関数値に対応させるた．

STEP1 入力xのとる代表的な値に対して各ファジィ集合のメンバーシップ値を各々与えて入出力データとする．

STEP2 STEP1で作られた各入出力データについてそれぞれ3層のバックプロパゲーションネットワークで学習する．

STEP3 構築されたネットワークにある入力値を与え，出力値を求める．これらの出力値をその入力に対する各々のファジィ集合のメンバーシップ値に対応させる．

STEP1からSTEP3で行った操作は，幾つかの代表的な入力値に対しある程度のファジィ値を与えて学習させ，その後，他の入力データを与えることにより，各ファジィ集合のメンバーシップ値を求めようというもので，この手法の特徴は代表的な入力変数の値に対するメンバーシップ関数の値を与えるだけで，ニューラルネットワークの学習機能により滑らかな曲線のメンバーシップ関数を得ることが出来る点である．具体的な例として0から10までの実数値に対し3つのファジィ集合(Small,Medium,Big)のメンバーシップ関数を学習させる例を示す．以後ファジィ集合Small,Medium,Bigをそれぞれ S,M,Bで表すとする．

STEP1 入出力データを以下のように与える．

入力値	S	M	B
1	1.0	0.2	0.1
3	0.7	0.6	0.2
5	0.4	1.0	0.5
7	0.2	0.5	0.7
10	0.1	0.2	1.0

STEP2 5000回ほど学習させてネットワークを構築する．

STEP3 構築されたネットワークに入力値を与え得られる出力値をメンバーシップ値とする．結果は以下のようになった．

入力値	S	M	B
0	0.950	0.113	0.084
1	0.933	0.170	0.099
2	0.882	0.341	0.133
3	0.750	0.649	0.205
4	0.547	0.832	0.320
5	0.378	0.857	0.466
6	0.265	0.771	0.632
7	0.190	0.559	0.777
8	0.145	0.332	0.863
9	0.120	0.205	0.904
10	0.108	0.150	0.922

上記の結果を図3に示す．

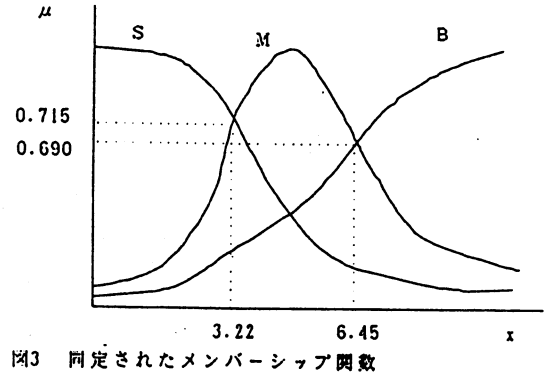


図3　同定されたメンバーシップ関数

上の結果からも分かるように，与えられた点を必ずしも正確には通らないが滑らかな曲線のメンバーシップ関数を得ることが出来る．

4．ファジィルールの学習

ここではif-thenルールに於ける前件部と後件部のファジィ集合のメンバーシップ関数のペアからファジィルールを学習させる．すなわち，ここで使われるニューラルネットワーク2は以下のようになる．

取り扱うファジィ集合の全体集合をN個の要素

で近似し各要素を入出力の各線に対応させる．即ち，入力層と出力層のニューロン数はN個とし，また中間層のニューロン数はp個とする．（図4）

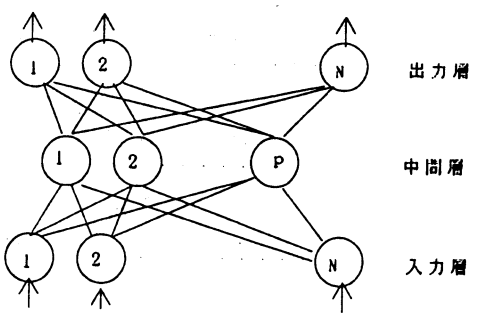


図4　メンバーシップ関数を学習するネットワーク2

STEP1' 入出力データとしてif-thenルールに於ける前件部と後件部のファジィ集合のメンバーシップ関数のペアを与える．

STEP2' STEP1'の各々の入出力データを図4に示すネットワークで学習させる．

STEP3' 構築されたネットワークに任意のファジィ集合のメンバーシップ関数を与えられた事実として入力する．推論過程に於ける結論は出力層のメンバーシップ関数として与えられる．

以上のSTEP1'からSTEP3'までの操作は，AiならばBi(i=1,･･･,n)というルールを学習し，A'が入力された時の出力を推定しようというものである．

3及び4の手法を通してその概要を述べるとまず，ある特定の入出力値からメンバーシップ関数を学習させ(図2)，学習されたメンバーシップ関数の値をルールに従ってニューラルネットワーク2(図4)に与え，ルールを学習させるために任意の事実を入力して結論のファジィ集合を得るものである．

5．具体例

ここで特殊な例として，ファジィ集合が従来の図5で与えられる場合について，従来の手法と本手法とを比較する．

ここで用いるファジィ変数は(NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB)の7つとする．7つのファジィ変数は以下のことを意味している．

NB:Negative Big
NM:Negative Medium
NS:Negative Small
ZO:About Zero
PS:Positive Big
PM:Positive Medium
PB:Positive Big

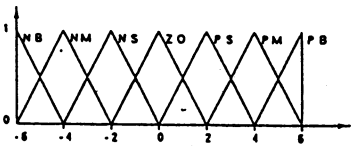


図5 従来のファジィ集合のメンバーシップ関数

また，推論ルールは例えば以下の3つに確定されているものとする．

if x is NS then y is PB
if x is ZO then y is PS
if x is PM then y is NS

① 3の手法に従ってネットワーク1を構築する．ここでのネットワーク1は入力層，中間層，出力層のニューロン数をそれぞれ1,4,7とした．

STEP1 入出力データを以下のように与えた．

入力値	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
-6	1	0	0	0	0	0	0
-4	0	1	0	0	0	0	0
-2	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0
2	0	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0	1

但しここでは0と1の極端な場合のみを用いて学習させている．更に，上のように対応させることにより，任意のクリスプな入力値に対して常に一つのファジィ集合を出力させることが出来る．この時のファジィ集合のメンバーシップ関数値はNB,NM,･･･,PM,PBの各値として現れることになる．

STEP2 5000回ほど学習させてネットワーク1を構築した．

STEP3 構築されたネットワーク1に例えば以下の入力値を与えると出力としてのメンバーシップ関数値は次のようにを取り出された．

入力値	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
-2.5	0.00	0.50	0.73	0.03	0.00	0.00	0.00
-1.3	0.00	0.02	0.76	0.56	0.00	0.00	0.00
3.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.32	0.01
5.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.35	0.70

② 4の手法でニューラルネットワーク2を構築する．

但し，ここでは3の手法で学習されたファジィ集合を用いるのではなく，極端な場合の例として0と1のみの入力により学習させることになる．

STEP1' 確定されているルールに基づき入出力データを以下のように与える．

入力データ1(x is NS)

NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
0	0	1	0	0	0	0

出力データ1(y is PB)

NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
0	0	0	0	0	0	1

入力データ2(x is ZO)

NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
0	0	0	1	0	0	0

出力データ2(y is PS)

NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
0	0	0	0	1	0	0

入力データ3(x is PM)

NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
0	0	0	0	0	1	0

出力データ3(y is NS)

NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
0	0	1	0	0	0	0

STEP2' 3000回ほど学習させてネットワーク2を構築した.

STEP3' 構築されたネットワークに例えば①のSTEP3で得られたメンバーシップ関数値を与え最終的に出力のファジィ集合メンバーシップ関数値を求めてみると次のようになる.

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
入力値	0.00	0.50	0.73	0.03	0.00	0.00	0.00
出力値	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.96
入力値	0.00	0.02	0.76	0.56	0.00	0.00	0.00
出力値	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	0.82
入力値	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.32	0.01
出力値	0.00	0.00	0.70	0.01	0.05	0.01	0.05
入力値	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.35	0.70
出力値	0.00	0.01	0.74	0.01	0.05	0.01	0.05

以上の出力された各メンバーシップ値から, 重心法によりyの推定値を求めてみると表1のようになる.

入力値x	推定値y
-2.5	5.78
-1.3	4.80
3.2	-1.17
5.1	-1.30

表1 本手法により得られる推定値

また従来通りの方法で頭切り法により推定値y'を求めた結果を表2に示す.

入力値x	推定値y'
-2.5	6.0
-1.3	4.4
3.2	-2.0
5.1	-2.0

表2 従来の手法により得られる推定値

なお, 与えられたルールはクリスプと考えると

x = -2 → y = 6
x = 0 → y = 2
x = 4 → y = -2

となる. これから線形近似法によって任意の入力値に対する推定値を求めることが出来る. そこで, 本手法, 従来の手法, 及び線形近似法による推定値を参考として表3に示しておく.

入力値	推定値 本手法	従来の方法	線形近似
-6.0	1.62	0.0	14.0
-5.0	1.66	0.0	12.0
-4.0	3.14	0.0	10.0
-3.0	5.69	6.0	8.0
-2.0	5.73	6.0	6.0
-1.0	4.02	4.0	4.0
0.0	1.98	2.0	2.0
1.0	1.67	2.0	1.0
2.0	-0.35	0.0	0.0
3.0	-1.10	-2.0	-1.0
4.0	-1.20	-2.0	-2.0
5.0	-1.30	-2.0	-3.0
6.0	-1.30	0.0	-4.0

表3 任意の入力値に対する3つの手法による推定値の比較

6. おわりに

本稿では, 従来推論過程に於て固定的に作られてきたメンバーシップ関数を2つのニューラルネットワークを用いて学習させ, 推論結果を求める手法を提案した. 今後は更に応用的な分野に本提案を拡張していきたい.

参考文献

(1)麻生 英樹:"ニューラルネットワーク情報処理", 産業図書(1988)

(2)林, 野村, 若見:ニューラルネット駆動型ファジィ推論による倒立振子の学習制御 第5回ファジィシステムシンポジウム, pp.183-188(1989)

問い合わせ先:〒214 神奈川県川崎市多摩区東三田1-1-1 明治大学理工学部情報科学科 システム科学研究室 山岡正人
TEL 044-911-8181 EXT.314
FAX 044-900-5196

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FA2-4

ブルドーザのファジィ制御

Fuzzy Control of Bulldozer

寺野寿郎　　増井重弘　　○長屋敬一
T. Terano　　S. Masui　　K. Nagaya
法政大学　工学部
Faculty of Engineering, Hosei University

Abstract
This paper describes the application of fuzzy set theory for operation support system of bulldozer.
We propose the semiautomatic bulldozer system which simplified dificult operation of bulldozer with information from an operater.

１．はじめに

ブルドーザは建設機械として最も頻繁に使われるものの一つであるが，操作が難しく完全な整地作業を行える熟練者になるためには相当の年月を必要としている．その最大の原因は，ブレードの軌跡の後を履帯が通るので，常に正のフィードバックがかかった状態になることである．また，自動化に関する問題点としては，ブルドーザの性質上丈夫な計器しか使えず適当な計器がない，もしくは高価なものになってしまう点である．

本論文では，初心者でも作業が簡単に行えるようなマン・マシン・システムを構築することを目的としている．オペレータは常にブレード操作に介入可能な状態とし，制御としてはリアルタイムに得られるデータはトルクコンバータより得られる出力トルクのみとして，そのほかの作業状況はオペレータからのファジィ入力を頼りに把握する．つまり，本論文でのファジィ制御とは，一般的に言われる熟練者知識による言語的制御ではなく，人間からの情報を積極的に使うためにそのマン・マシン・インターフェースとしてファジィ論理を用い，制御方法やパラメータを変更し対応するものである．

２．ブルドーザのオペレーション

ブルドーザの作業は細かく分けると多種にのぼるが，大きく分けて荒整地，掘削，運土，撤土等に分けることができる．ブルドーザはその車体の形状上ブレードが通った後を履帯が通るので，車体はブレードによって残された土の形状の影響を大きく受ける．そのことにより，あまり大ききくて急激なブレード操作を行うと，ブレードによって作られた窪みや小山によってさらに大きく地面を削り取ってしまい，発散してしまう傾向がある．また，地面に深く食い込ませたり，堅い部分にブレードが引っかかるとスリップを起こし進行不可能となる．

３．制御対象

本研究では，実験はすべて実機をもとにして作成したＣ言語によって書かれたシミュレーションによって行った．シミュレーションは，Fig.1のように常にブルドーザの側面を表示させ，あるサンプリング周期でブルドーザ進行を離散的に現す．

スリップ率ＳＰは，履帯速度Ｖ$_c$，対地絶対速度Ｖ$_a$より，

$$S(\%) = (V_c - V_a) / V_c \times 100 \qquad (1)$$

と定義されるが，シミュレーション上ではブレードの前の押土と，ブレードの地面への食い込み具合より実機データをもとに牽引力を算出し，それからスリップ率を算出している．

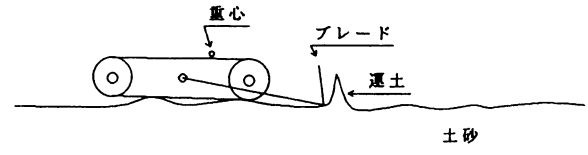


Fig.1 ブルドーザのシミュレーション画面

４．作業

ブルドーザの作業を支援する制御方法は，計測できる制御データによっていろいろなものが考えられる．しかし計測器の問題上，おのずと使用できるセンサーは限られてしまう．そこで本論文では，現時点で最も問題の少ないデータであるトルクコンバータから得ることのできる出力トルクより，ブルドーザの負荷制御（シュースリップコントロール）を行うこととした．

まず，シュースリップコントロールにおけるブレード操作を作業内容別に以下のように記述した．

（掘削）

掘削作業は，作業の中で最もスリップが高くなりやすいといえる．掘削時にはブレードを地面に押しつけるので，履帯の前部の接地性が悪くなりそのためスリップも起きやすい．スリップ回避のためのブレード操作は小さめに行う．

（整地，運土）

これらの作業の場合，ブレードの前に事前に土をある程度貯めてから行うので，ブレード操作はできるだけ小さく，そしてゆっくりと行う．大抵の場合小量のブレード操作でスリップを回避することができる．

（撤土）

崩す山の規模によっても異なるが，かなりの回数に分けて作業を行う．事前にブレードをある程度上げておく必要がある．ブルドーザに対する山の規模によって作業内容が異なる．撤土の場合，スリップが起きるとそれ以上の進行が不可能な場合がほとんどなので，ブレードを上げて，とりあえずその場を回避する．

５．制御

項目４の記述をもとに作成した，シュースリップコントロールの流れをFig.2に示す．

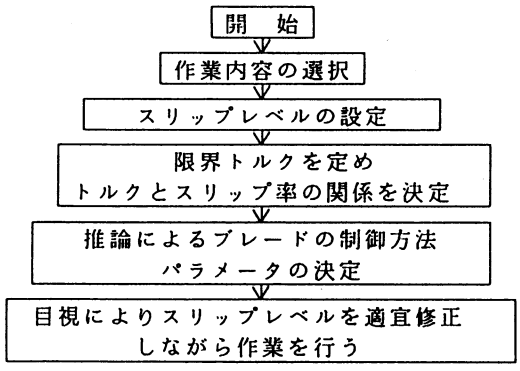


Fig.2 シュースリップコントロールの流れ

システムに関する変数を以下に示す．

Ｔ＝トルク(Kg･m)　　Ｓ＝スリップ率(%)
Ｓ。＝推定スリップ率(%)
Ｔ$_{max}$＝限界トルク(Kg･m)
Ｌ。＝目視スリップレベル
Ｕ。＝連続制御のブレード操作量(mm)
Ｕ。＝ＯＮ－ＯＦＦ制御のブレード操作量(mm)
Ｕ。＝総合出力(mm)

定数は以下のとおりである．

Ｋ＝比例ゲイン（サーボ）
Ｓ$_r$＝スリップ率目標値(%)
Ｓ$_{tu}$＝スリップ率しきい値（上）
Ｓ$_{tl}$＝スリップ率しきい値（下）
Ｗ。＝重み係数（連続）
Ｗ。＝重み係数（ＯＮ－ＯＦＦ）
Ｌ＝ブレード長(mm)

Fig.3にシミュレーションにおける全制御構造図を示す．
Fig.2に示したそれぞれの項目の説明を以下に示す．

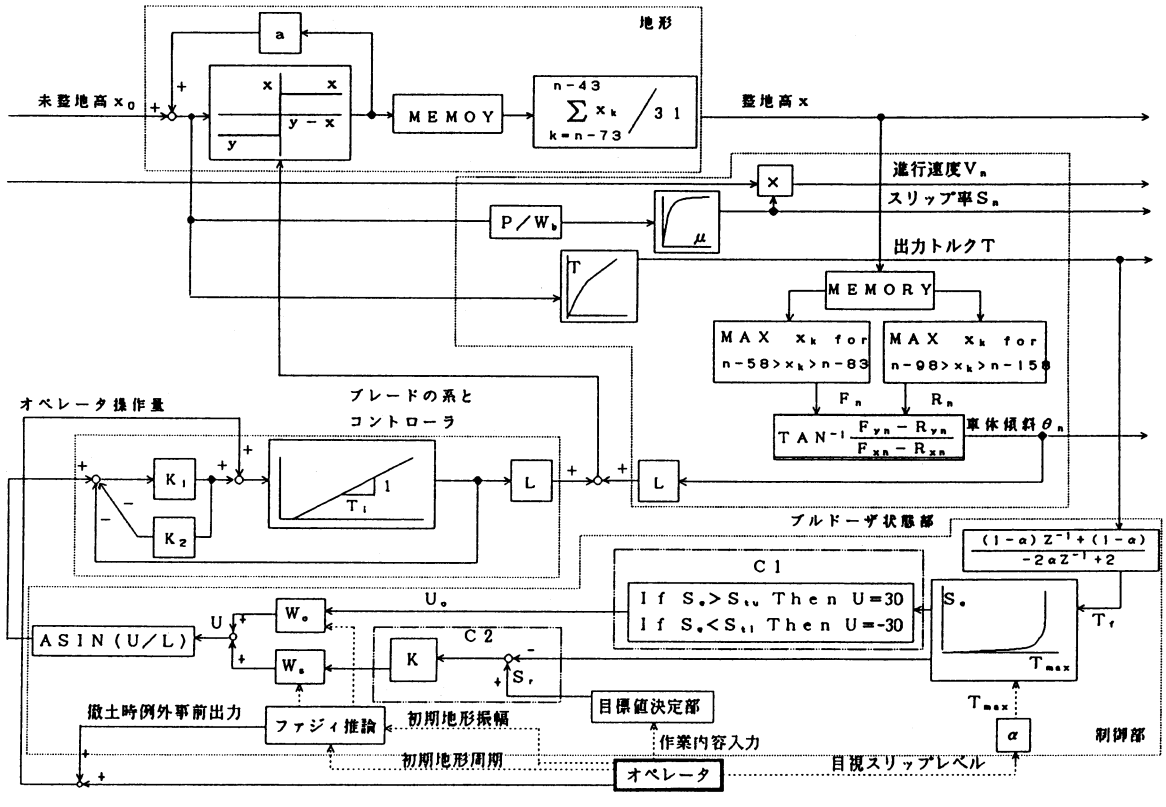


Fig.3 全制御系

５－１作業内容の選択

作業する前に，オペレータが以下の３つの作業から自分の目的にあったものをクリスプ選択をする．

作業内容：掘削，整地，撤土

５－２目視によるスリップレベルとスリップ率

ブルドーザの作業は，その作業をする場所の土質に大きく左右される．シュースリップコントロールを行う上で問題になることは，トルクとスリップ率との関係が土質によって変化してしまうことである．本制御方法は，トルクより推定されるスリップ率より負荷制御を行うものなので，トルクとスリップ率との関係が変わると制御量もおのずと変える必要がでてくる．トルクとスリップ率の関係をFig.4に示す．

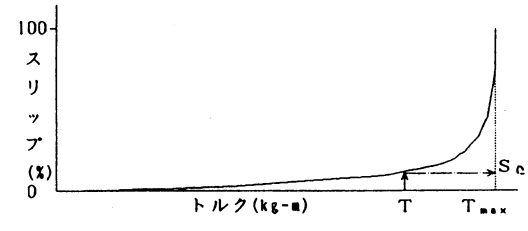


Fig.4 トルクとスリップ率の関係

限界トルクは土質によって変化するが，そこまでのスリ

ップ率の変化のしかたは相似形なので，人間が入力するスリップレベルをL₀として，限界トルクTₘₐₓを

$$T_{max} = \alpha L_0 \qquad (\alpha \text{は定数}) \qquad (2)$$

として求め，その都度Fig.3に示したトルクとスリップ率の関係に対応させトルクからスリップ率推定値S₀を算出する．

5－3ブレードの制御

ブレードは基本的に大きく急激な操作は避けるべきであることは前にも述べたとおりである．しかし，それと同時に熟練オペレータによるブレードの動きなどを見ると，以下のようなことがわかった．

①初期地形がノイズのように高い周波数を持つ地形の場合，ほとんどブレード操作は行わず，スリップが高くなってしまったときだけ，少しブレードを上げる．（車体傾斜にほとんど影響を及ぼさない程度）

②初期地形がある程度長い周期を持つ地形の場合は，その地形の振幅にもよるが，地形の形どおりにブレードを追従するように操作を行う．

これら2つの性質を合わせ持つ制御方法が望まれる．そこでFig.3の制御部のC1に示したON－OFF制御と，C2に示した連続制御を同時に行い，それらの重み係数をファジィ推論によって決定する．

（1）ON－OFF制御

①に基づき，以下のようなON－OFF制御を行う．

If $S_0 < S_{t1}$

$U_0 = -30$ (3)

If $S_0 > S_{t2}$

$U_0 = 30$ (4)

これこの範囲内のスリップ率ではブレードは操作しない．

（2）連続制御

②の場合，いっぺんに削り取ることのできるぐらいの規模のものであればON－OFF制御でことたりるが，もっと振幅が大きく周期の長いものである場合には，山肌に沿って土を削り取っていく方が効率がよいので，連続制御を行う．これは目標スリップ率S_rと推定スリップ率S_0より行う比例動作のフィードバック制御である．その構成をFig.5に示す．

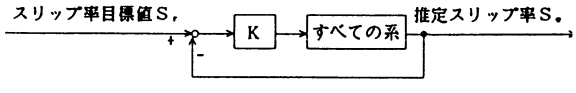


Fig.5 マクロな意味での連続制御

以上2つの制御について，オペレータによる初期地形入力によってどちらの制御に重きをおいて作業を行うかを，ファジィ推論によって決定する．（Fig.3制御部参照）

（前件部）

オペレータの入力による，ブルドーザの履帯の長さ及び履帯高を基準にした初期地形の振幅と周期

（後件部）

連続制御における，重み係数W₀

なお重み係数は，

$$W_0 + W_0 = 1 \qquad (5)$$

である．ファジィルール及び使用したメンバーシップ関数を以下のTable1とFig.6に示す．推論は代数積－代数和重心法[1]によって行う．

ただし，$S_0 = 0(\%)$のときにかぎり無条件にON－OFF制御のみ作動するものとする．（ブレードを地面に押しつける必要があるため）

周期＼振幅	MS	S	E	B	MB
MS	MS	MS	MS	MS	S
S	MS	S	S	S	E
E	S	E	E	E	B
B	E	B	B	B	MB
MB	B	MB	MB	MB	MB

Table1制御方法切り替えのファジィルール

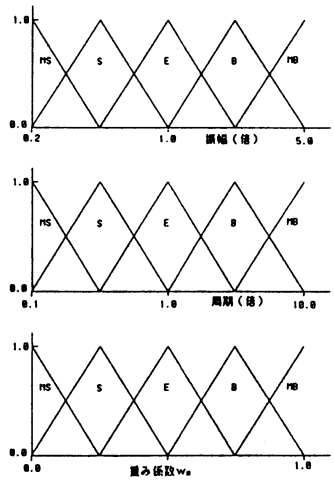


Fig.6 メンバーシップ関数

5－1において述べたオペレータによる作業内容入力によって以下のパラメータに設定する．

（掘削時）

ON－OFF制御のしきい値

$S_{t1} = 2(\%)$

$S_{t2} = 10(\%)$

連続制御スリップ率目標値

$S_r = 10(\%)$

（整地時）

ON－OFF制御のしきい値

$S_{t1} = 2(\%)$

$S_{t2} = 5(\%)$

連続制御スリップ率目標値

$S_r = 5(\%)$

（撤土時）

ON－OFF制御のしきい値

$S_{t1} = 2(\%)$

$S_{t2} = 10(\%)$

連続制御スリップ率目標値

$S_r = 10(\%)$

なお，table1で点線で囲まれたルール群の帰属度がいちばん高いとき自動的に撤土モードとなり，事前に上げておくべきブレード高を以下の式[2]によって決定する．

μ_{ij}＝点線で囲まれたルール1つ1つの帰属度

f_{ij}＝そのルールにおける事前ブレード高(mm)

f＝事前ブレード高(mm)

$$f = \frac{\Sigma \mu_{ij} \cdot f_{ij}}{\Sigma \mu_{ij}} \qquad (i, j = 1, 2, 3) \qquad (6)$$

６．実験結果

以上の方法を用いて，シミュレーションにおいて実験を行った．その結果を以下に示す．

Fig.7a,bは，初期地形に高い周波数を持ったランダム地形を考えたもので，整地モードによって制御を行った．Fig.8a,bにこの作業を行った時の制御データの時間経過を示す．

それぞれa,bの順で時間が経過している．

Fig.9a,bは大きな周期を持つ初期地形において，掘削作業を行った結果である．

Fig.10a,b,c,dは，撤土を行った結果で，３回の切り替えしにより作業を終えている．

いずれも良好な結果を得ることができた．

なお，トルクの部分の実線は計測出力トルク，点線はフィルタを通した後の出力トルクで，スリップの部分の実線は絶対スリップ率，点線は出力トルクからの推定スリップ率である．

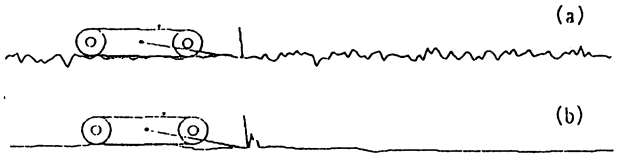


Fig.7 整地モードによる制御

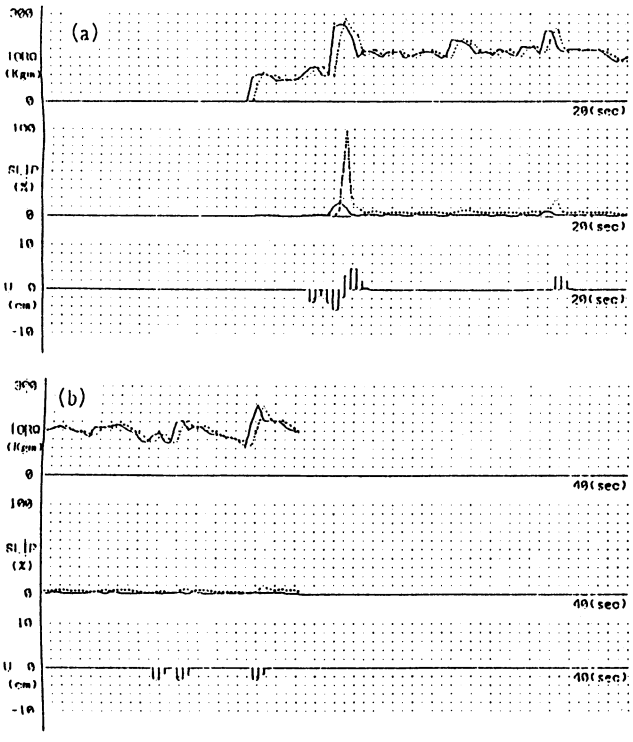


Fig.8 整地モードによる制御の時間経過

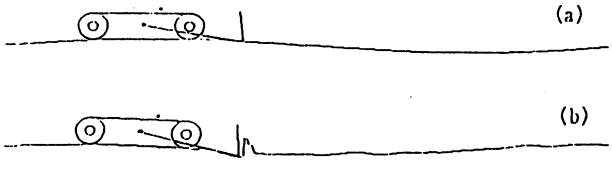


Fig.9 掘削モードによる制御

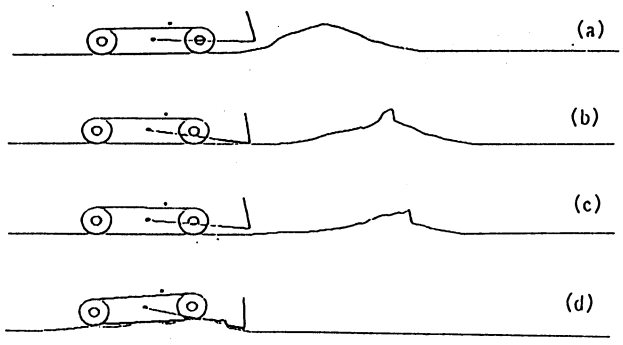


Fig.10 撤土モードによる制御

７．おわりに

ブルドーザは，それを扱うオペレータに高度な操作技術を要求する．そのうえ，計測できるデータもごく限られたものしかない．しかし，誰もが取得可能である情報をコンピュータに提供することによって，初心者でも簡単に操作することができるブルドーザの実現方法を提案し，シミュレーション実験によって良好な結果を得ることができた．これによりコンピュータと人間との間を取り持つマン・マシン・インターフェースとして，ファジィの有効性を示すことができた．

本研究を遂行するにあたり，ブルドーザに関する諸データや資料提供，そして適切なご指示をしていただいた（株）小松製作所研究本部の方々にこの場をかりてお礼申し上げます．

＜参考文献＞

1)水本：ファジィ制御に対する改善法（Ⅱ），第４回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 P91-96(1988)

2)市橋，田中：PIDとFuzzyのハイブリッド型コントローラー，第４回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，P97-102(1988)

3)寺野・浅井・菅野：ファジィシステム入門，オーム社(1987)

4)寺野・浅井・菅野：応用ファジィシステム入門，オーム社(1989)

5)守田・薩摩林：実用機械シリーズ　ブルドーザ，産業図書(1969)

6)大坪：ブレードの非線形制御方式，小松技法　第22巻第2号　P135-142(1976)

7)長屋：ブルドーザのファジィ制御，法政大学卒業論文(1990)

問い合わせ先：〒184　小金井市梶野町3-7-2
法政大学工学部
増井重弘
長屋敬一
TEL (0423)81-5341 内線329

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6〜8, 1990)

FA3-1

双対測度に関するファジィ積分とその多属性パターン認識への応用

FUZZY INTEGRAL WITH RESPECT TO DUAL MEASURES AND ITS APPLICATION TO MULTI-ATTRIBUTE PATTERN RECOGNITION

グラビッシュ・ミシェル　菅野 道夫
Michel GRABISCH　Michio SUGENO

東京工業大学 システム科学専攻
Tokyo Institute of Technology

Abstract : in this paper, we examine the properties of fuzzy integral with respect to dual measures in the framework of the general class of fuzzy t-conorm integral proposed by Murofushi and Sugeno. We use these results for defining the fuzzy measure of a fuzzy event in a general way. An example of application is given in the domain of multi-attribute classification, where attributes are interdependent. A comparison with other methods, including the Bayesian one, is provided.

1 はじめに

ファジィ測度に関するファジィ積分の概念は、菅野によって提案されてから [9] 、様々な著者、例えばKruse [7] 、Weber [11] 、市橋等 [6] 、菅野・室伏 [10] などが、もとの定義を一般化することを試みている。本質的に、Kruse 、Weber 、市橋等のファジィ積分は、菅野のファジィ積分の直接の拡張と言える。即ち、min と max 演算の代わりに、彼らは乗法的な演算と連続な Archimedean t-conorm を利用している。しかしながら、加法的な測度の場合は、これらの積分は Lebesgue 積分に一致しないため、菅野と室伏は Choquet [1] に提案された汎関数を参考にして、いわゆる Choquet 積分を提出した。

最近室伏と菅野はファジィt-conorm 積分という一般的な概念を提案した [8] 。この積分クラスは菅野のもとの定義、Weber 、Kruse 、及び Choquet の定義を含む。

菅野積分の興味ある性質とは、可能性測度に関する積分がファジィ事象の可能性に一致するということである。ファジィ事象 $\underset{\sim}{A}$ の必然性は次のような双対な関係で定義されている : $N(\underset{\sim}{A}) \triangleq 1 - \Pi(\overline{\underset{\sim}{A}})$. よって、菅野積分に対する次の関係 $1 - \int (1-f) \circ \Pi = \int f \circ N$ が成り立てば、ファジィ事象の必然性は必然性測度に関する菅野積分であると言える。事実、筆者等は上記の双対な関係についてファジィt-conorm 積分の枠組で調べた結果 [5] 、菅野積分といわゆる Choquet 的な積分に関して、すべての双対なファジィ測度の対 (μ, μ^*) に対して、上記のような関係が成り立つことがわかった。

本論文では、この結果を用いながら、ファジィ事象のファジィ測度を定義する。最後に、この定義に基づき、パターン認識の分野における応用の例をあげる。

先ず、ファジィt-conorm 積分について述べる。

2 ファジィt-conorm 積分

(詳細については [8] を参照) 本論文では、便宜上、被積分関数として単関数のみを考える。先ず、必要な定義を復習しよう。

定義 1 Xを空間とし、$\mathcal{X}$を X 上のσ−代数とする。可測空間 $(X, \mathcal{X})$ 上のファジィ測度μは、次の性質を持つ集合関数 $\mu : \mathcal{X} \longrightarrow [0,1]$ である :

(イ)　$\mu(\emptyset) = 0, \mu(X) = 1.$

(ロ)　$A \subseteq B \Rightarrow \mu(A) \leq \mu(B)$

(ハ)　$A_n \uparrow A \Rightarrow \mu(A_n) \uparrow \mu(A)$

$(X, \mathcal{X}, \mu)$ をファジィ測度空間と呼ぶ。

定義 2 単関数 $f : X \longrightarrow [0,1]$ は、次のように定まる :

$$\forall x \in X,\ f(x) = \sum_{i=1}^{n} a_i \mathbf{1}_{D_i}(x) \tag{1}$$

但し、D_iは、互いに素な X の部分集合で、$0 < a_1 < a_2 < \cdots < a_n = 1$ と仮定する。また、$\mathbf{1}_{D_i}(x)$ は D_i の定義関数を示す。

単関数 f は次のようにも表せる :

$$\forall x \in X,\ f(x) = \bigvee_{i=1}^{n} a_i \mathbf{1}_{A_i}(x) \tag{2}$$

$$\forall x \in X,\ f(x) = \sum_{i=1}^{n} (a_i - a_{i-1}) \mathbf{1}_{A_i}(x) \tag{3}$$

但し、$A_i = \cup_{j=i}^{n} D_j$、$a_0 = 0$ と置く。

定義 3 可測単関数 $f : X \longrightarrow [0,1]$ の菅野積分は次のように定義される :

$$\int f \circ \mu \triangleq \bigvee_{i=1}^{n} (a_i \wedge \mu(A_i)) \tag{4}$$

ここで、$\vee$、$\wedge$は max 、min 演算をそれぞれ表す。

定義 4 可測単関数 f の *Choquet* 積分は次のように定義される :

$$(C) \int f \, d\mu \triangleq \sum_{i=1}^{n} (a_i - a_{i-1}) \mu(A_i) \tag{5}$$

ここに、式 (1) と Lebesgue 積分、式 (2) と式 (4) 、及び式 (3) と式 (5) は相似している。

定義 5 Δ を連続な *Archimedean t-conorm* とし、kをその生成関数とする (生成関数とは、次の性質を持つ $[0,1]$ から $[0,\infty]$ への連続で狭義の増加関数である : $x \Delta y = k^{-1}((k(x) + k(y)) \wedge k(1))$ 。$k(1)$ が有限であるとき Δ はベキ零の *t-conorm* といい、そうでない場合は狭義の *t-conorm* という。

定義 6 $\mathcal{F} = (\Delta, \perp, \underline{\perp}, \diamond)$ は積分に関する *t-conorm* 系であるとは、$\mathcal{F}$が次の条件を満たすことをいう :

1. $\Delta, \perp, \underline{\perp}$は $\vee$、あるいは連続な *Archimedean t-conorm* である。
2. $\diamond : ([0,1], \Delta) \times ([0,1], \perp) \longrightarrow ([0,1], \underline{\perp})$ は次の条件を満たす乗法的な演算である :

   (イ)　$\diamond$ は $(0,1]^2$ 上で連続である。

   (ロ)　$a \diamond x = 0 \Leftrightarrow a = 0 \ or \ x = 0$

   (ハ)　$x \perp y < 1$ であるとき、
   $a \diamond (x \perp y) = (a \diamond x) \underline{\perp} (a \diamond y),\ \forall a \in [0,1]$

（ニ） $a\triangle b < 1$ であるとき、

$$(a\triangle b)\diamond x = (a\diamond x)\underline{\perp}(b\diamond x),\ \forall x \in [0,1]$$

$([0,1],\triangle)$、$([0,1],\perp)$、$([0,1],\underline{\perp})$ は、それぞれ被積分関数値、測度の値、積分値の空間である。

定義 7 任意に与えられた *t-conorm* $\triangle$ に対して、$[0,1]^2$上の演算 $\neg_\triangle$ は次のように定まる：

$a\neg_\triangle b \triangleq \inf\{c | b\triangle c \geq a\}$。

$\triangle = \vee$ のとき、次のように表現できる：

$$a\neg_\triangle b = \begin{cases} a & if \quad a \geq b \\ 0 & if \quad a < b \end{cases} \tag{6}$$

$\triangle$ の生成関数 kは存在するとき、次の関係が成り立つ：

$$a\neg_\triangle\ b = k^{-1}(0 \vee (k(a) - k(b))) \tag{7}$$

$\triangle$ と$\neg_\triangle$を用いて、単関数の別の表現が得られる：

$$\forall x \in X,\ f(x) = \triangle_{i=1}^{n}\ a_i 1_{D_i}(x) \tag{8}$$

$$\forall x \in X,\ f(x) = \triangle_{i=1}^{n}\ (a_i \neg_\triangle\ a_{i-1})1_{A_i}(x) \tag{9}$$

なお $\triangle = \vee$ のとき、式 (9) は式 (2) に一致する。

定義 8 $(X, \mathcal{X}, \mu)$ をファジィ可測空間とし、$\mathcal{F} = (\triangle, \perp, \underline{\perp}, \diamond)$ を *t-conorm* 系とする。$f : X \longrightarrow [0,1]$ が可測単関数であるとき、$\mathcal{F}$に基づき、μに関する fのファジィ *t-conorm* 積分は次のように定義される：

$$(\mathcal{F})\int f \diamond d\mu \triangleq \underline{\perp}_{i=1}^{n}\ ((a_i \neg_\triangle\ a_{i-1}) \diamond \mu(A_i)) \tag{10}$$

特殊な場合：

- $\mathcal{F} = (\hat{+}, \hat{+}, \hat{+}, \cdot)$ のとき、Choquet 積分が得られる。但し、$\hat{+}$は bounded sum を表し、$\cdot$ は乗法を表す。
- $\mathcal{F} = (\vee, \vee, \vee, \wedge)$ のとき、菅野積分が得られる。
- $\mathcal{F} = (\triangle, \perp, \perp, \diamond)$ のとき、Weber 積分が得られる。但し、$\mathcal{F}$は Archimedean t-conorm 系である。Kruse 積分は、Weber 積分に含まれている。

3 双対測度に関する積分

（詳細と証明については [5] を参照）双対測度の対 (μ, μ^*) とは、次の関係を満たすような測度である：$\mu^*(\cdot) = 1 - \mu(\bar{\cdot})$。可能性測度と必然性測度は双対測度の対の一つの代表的な例である。確率測度は自己双対測度である。

Choquet 積分は節 1 で述べた双対関係を満たすことを簡単に証明できるが、Choquet 積分と双対測度の定義を拡張すると、さらに一般的な結果が得られる。

定義 9 ファジィ *t-conorm* 積分は *Choquet* 的な積分であるとは、$(\triangle, \perp, \underline{\perp}, \diamond)$が次の条件を満足することをいう：

（イ） $a\diamond(1\neg_\perp x) = a\neg_\triangle\ (a\diamond x)$。但し、$\neg_\perp$は、定義7に沿って、$\perp$ に対して定義される。

（ロ） $\underline{\perp} = \triangle$,

（ハ） $\triangle, \perp$ はvと異なり、ベキ零の *t-conorm* である。

上記の定義から Choquet 積分は Choquet 的な積分の一種であるとわかる。

定義 10 $\perp$はベキ零の *t-conorm* であるとき、次の関係を満たす測度の対 (μ, μ^*) は$\perp$–双対測度という：

$\forall A \in \mathcal{X},\ \mu(A) = 1\neg_\perp\ \mu^*(\bar{A})$.

$\perp = \hat{+}$ であるとき、普通の定義と一致する。なお、演算 $1\neg_\perp(\cdot)$ は、Trillas[3] が提案した一般的な否定演算と同値である。この演算は、直観的に望ましい性質を持つ（連続性、減少性、対合性）。上記の定義を用いて次の結果が得られる：

定理 1 $\mathcal{F} = (\triangle, \perp, \triangle, \diamond)$ から定義される *Choquet* 的な積分を考える。このとき、すべての$\perp$–双対測度の対 (μ, μ^*) に対して、次の関係が成り立つ：

$$(\mathcal{F})\int f \diamond d\mu = 1\neg_\triangle(\mathcal{F})\int (1\neg_\triangle f) \diamond d\mu^* \tag{11}$$

普通の Choquet 積分の場合は、上記の結果は次のように書ける：

$$(C)\int f\, d\mu = 1 - (C)\int (1 - f)\, d\mu^* \tag{12}$$

菅野積分についても、同様な関係を証明できる：

定理 2 (μ, μ^*) を（普通の）双対測度の対とするとき、次の関係が成り立つ：

$$1 - \oint (1 - f) \circ \mu^* = \oint f \circ \mu \tag{13}$$

Weber が提案したような菅野的な積分に対しては、残念ながら上記の結果は成り立たない [5]。

今までの結果を使ってファジィ事象のファジィ測度を定義する。

4 ファジィ事象のファジィ測度

早くも 1968 年に Zadeh は、事象の確率という古典確率論で基本的な概念をファジィ事象の確率の概念に拡張した：

$$P(\underset{\sim}{A}) \triangleq \int \phi_{\underset{\sim}{A}}(x) dP \tag{14}$$

但し、$\underset{\sim}{A}$はメンバーシップ関数$\phi_{\underset{\sim}{A}}$で定まるファジィ事象を示し、$P$は確率測度を示す。この定義を見ると、$P(\underset{\sim}{A})$ は、確率測度 Pに関する$\phi_{\underset{\sim}{A}}$の Lebesgue 積分であることがわかる。1978 年に、Zadeh はファジィ事象$\underset{\sim}{A}$の可能性を次のように定義した：

$$\Pi(\underset{\sim}{A}) \triangleq \sup(\phi_{\underset{\sim}{A}}(x) \wedge \pi(x)) \tag{15}$$

ここで、π は可能性測度 Π の分布関数を表す。事実、$\Pi(\underset{\sim}{A})$ は、可能性測度 Π に関する$\phi_{\underset{\sim}{A}}$の菅野積分であることを証明できる。節 1 で述べたように、ファジィ事象の必然性は次の双対関係で定義される：$N(\underset{\sim}{A}) \triangleq 1 - \Pi(\bar{\underset{\sim}{A}})$。従って、定理 2 によると、$N(\underset{\sim}{A})$ は必然性測度 Nに関する$\phi_{\underset{\sim}{A}}$の菅野積分であることがわかる。

ここで、二つのことに注目すべきである。先ず、上記の定義は両立しないことである。つまり、[8] で強調されているように、Choquet 積分と菅野積分は本質的に異なる汎関数である。次に、この二つの定義に基づく任意のファジィ測度に関するファジィ事象のファジィ測度の概念は、まだ提案されていない。直観的に、μ に関するファジィ事象$\underset{\sim}{A}$のファジィ測度の定義は次の条件を満たさなければならないと考えられる：

（イ） $\underset{\sim}{A}$は crisp であるとき、普通の定義に一致する。即ち、

$\underset{\sim}{A} = A \Rightarrow \mu(\underset{\sim}{A}) = \mu(A)$

（ロ） 単調性：

$\underset{\sim}{A} \subseteq \underset{\sim}{B} \Rightarrow \mu(\underset{\sim}{A}) \leq \mu(\underset{\sim}{B})$

（ハ） 連続性：

$\underset{\sim}{A}_n \uparrow \underset{\sim}{A} \Rightarrow \mu(\underset{\sim}{A}_n) \uparrow \mu(\underset{\sim}{A})$

（ニ） $\perp$–双対性：

$\mu(\underset{\sim}{A}) = 1 \dashv \mu^*(\overline{\underset{\sim}{A}}^{\perp})$

但し、$\perp$はベキ零のt-conormであり、μ^*はμの$\perp$–双対測度を表し、$\overline{\underset{\sim}{A}}^{\perp}$は次のように定義されるTrillasの一般的な$\underset{\sim}{A}$の否定を表す：

$\phi_{\overline{\underset{\sim}{A}}^{\perp}}(x) \triangleq 1 \dashv \phi_{\underset{\sim}{A}}(x)$

（ホ） Zadehの定義との両立性：

$\mu = \Pi \Rightarrow$ Zadehによる$\underset{\sim}{A}$の可能性

$\mu = P \Rightarrow$ Zadehによる$\underset{\sim}{A}$の確率

条件（イ）は、新しい定義が普通の定義の拡張であることを保証する。条件（ロ）と（ハ）は、拡張された定義もファジィ測度の公理を満たすことを確保する。条件（ニ）は、一般的に双対測度の存在を保証する。最後に、条件（ホ）は、新しい定義がZadehの定義を含むため必要である。

上記の考慮に基づき、次の定義を提出する：

定義 11 μを任意なファジィ測度とし、$\underset{\sim}{A}$を$\phi_{\underset{\sim}{A}}$で定まるファジィ事象とする。$\mu$に関する$\underset{\sim}{A}$のファジィ測度は次のように定義される：

$$\mu(\underset{\sim}{A}) \triangleq (\mathcal{F}) \int \phi_{\underset{\sim}{A}} \diamond d\mu \tag{16}$$

但し、*t-conorm*系$\mathcal{F}$は次の二つの種類の中でどちらかに属さなければならない：

種1 $\mathcal{F} = (\vee, \vee, \vee, \wedge)$（菅野積分）

種2 $\mathcal{F} = (\triangle, \triangle, \triangle, \diamond)$。$\triangle$、$\diamond$は*Choquet*的積分を定めるように定義される。更に、$\diamond$は次の条件を満たすこと：

$1 \diamond a = a$

種1の場合は、菅野積分による定義と呼び、種2の場合は、Choquet積分による定義と呼ぶ。次の定理は、この定義に意味があることを明らかにする。

定理 3 $\mathcal{F} = (\vee, \vee, \vee, \wedge)$とする。菅野積分によるファジィ事象のファジィ測度は、条件（イ）、（ロ）、（ハ）、（ニ）及び（ホ）を満す。但し、（ニ）については普通の双対性のみ満たし、（ホ）については可能性の場合のみ*Zadeh*の定義に一致する。

定理 4 $\mathcal{F} = (\triangle, \triangle, \triangle, \diamond)$とする。*Choquet*積分によるファジィ事象のファジィ測度は、条件（イ）、（ロ）、（ハ）、（ニ）及び（ホ）を満す。但し、（ニ）については$\triangle$–双対性のみ満たし、（ホ）については確率の場合のみ*Zadeh*の定義に一致する。

証明の概略。
上記の定義と定理1、2から、条件（イ）、（ニ）、（ホ）は明らかである。菅野積分は、被積分に関して単調性と連続性を持つので（[9]を参照）、菅野積分の場合は条件（ロ）、（ハ）を満足させる。Choquet積分による定義の場合は、$\mathcal{F} = (\hat{+}, \hat{+}, \hat{+}, \cdot)$、つまり普通のChoquet積分のときのみ証明をすれば十分である（[8]を参照）。Choquet積分は、被積分関数に関して単調性を持つ[10]。なお、ファジィ測度の連続性と単調性から、簡単にChoquet積分について（ハ）を証明できる。□

結論として、ファジィt-conorm積分の理論により、本質的に異なるファジィ事象の可能性と確率の概念を一つの枠組に取り込むことができた。更に、提出した定義は望ましい性質を持つ。

5 多属性パターン認識への応用

次の応用例は、パターン認識の枠組で行われるが、そのまま一般的な多属性意思決定の問題でも使うことができる。

5.1 問題の設定：確率的・可能性的アプローチ

（詳細については[4]を参照）$\{C_1, \ldots, C_m\}$をクラスの集まりとし、$X \triangleq [x_1, \ldots, x_N]^T$をそのクラスを記述する数値の属性ベクトルとする。パターン認識の問題というのは、与えられた未知のサンプル$X^\circ \triangleq [x_1^\circ, \ldots, x_N^\circ]^T$を分類することである。つまり、$X^\circ$がどのクラスに属するかを決定する。上記の$x_i^\circ$は属性$i$の計測量を表す。一般に、パターン認識問題には、分類以外にクラス$\{C_1, \ldots, C_m\}$の学習も含まれているが、ここでは分類の部分のみを考える。

クラスと属性ベクトルについては、次のことを仮定する：

- 各クラスjと各属性iに対して、クラスC_jにおける属性x_iの典型的な値の知識がある。確率論の枠組で、それは条件付き確率分布関数で表すが、可能性理論の場合は条件付き可能性分布関数で表す。ともに、$\pi(x_i|C_j)$で示す。
- 属性$x_1, \ldots, x_N$は、ある未知の度合いで互いに依存する。即ち、各クラスjに対して、条件付き変数$x_1|C_j, \ldots, x_N|C_j$は独立ではない。
- 各クラスjに対して、ベクトルX全体の典型的な値の分布関数は得られない。属性の相互依存のため、周辺の分布関数$\pi(x_i|C_j)$の知識からその結合分布関数が計算できない。

サンプルX°が与えられたとき、$\pi(x_i^\circ|C_j)$の知識から簡単に$\pi(C_j|x_i^\circ)$を求められる[4]。（例えば、確率論の場合はBayes則を使う）$\pi(C_j|x_i^\circ)$は、属性iに対してX°がクラスC_jに属する可能性（または確率）を意味する。関数$\pi(\cdot|x_i^\circ)$（あるいはこれに比例の関数）を属性iに関する部分的な判別関数と呼び、記号$\phi_i(\cdot)$で表す。同様に、$\pi(X^\circ|C_j)$が与えられたら、$\pi(C_j|X^\circ)$を求められ、この関数を属性ベクトルXに関する全体的な判別関数と呼び、記号$\Phi(\cdot)$で表す。

確率論の枠組で、Bayesの分類方法というのは、全体的な判別関数を最大にするクラスを選択する。この方法は、誤分類（misclassification）の確率を最小し、その意味で最適であり、以下Bayesの最適法（Bayesian optimal method）と呼ぶ。けれども、我々の仮定では、全体的な判別関数Φを求めることができないので、適当な演算Ψで部分的な判別関数を結合するという方法しかない：

$$\forall j,\ \hat{\Phi}(C_j) \triangleq \Psi(\phi_i(C_j)) \tag{17}$$

一般に、$\hat{\Phi}$とΦは異なるので、明らかに劣最適な方法である。

今、Ψの例をいくつかあげる。$x_1, \ldots, x_N$が独立の仮定の下に、$\Psi = \Pi$（乗法）のとき$\hat{\Phi} = \Phi$となることを簡単に証明できる。これはよく使われている手法であり、以下Bayesの独立法（Bayesian independent method）と呼ぶ。一方、可能性理論の枠組で、基本的に$\Psi = \min$演算で分類を行なう。以下これはBellmann-Zadeh法と呼ぶ。もう一つの手法の族は、各属性の重要度を表現するための重み付け法という手法である。その中で、重み付の和（weighted sum）がよく知られている：

$$\hat{\Phi}(C_j) = \sum_{i=1}^{N} w_i^j \phi_i(C_j) \tag{18}$$

ここで、w_i^jはクラスjに関して属性iの重みを表す。但し、$\sum_{i=1}^{N} w_i^j = 1, \forall j$（確率的な正規化）。Duboisらは、重みを用いてmin演算の定義を拡張している[2]：

$$\hat{\Phi}(C_j) = \bigwedge_{i=1}^{N} ((1 - w_i^j) \vee \phi_i(C_j)) \tag{19}$$

ここで、$\max_{i=1}^{N} w_i^j = 1, \forall j$（可能性的な正規化）。以下、この手法は weighted min と呼ぶことにする。上記の式(18)(19)は、$X = \{x_1, \ldots, x_N\}$ 上のファジィ事象$\phi_i(C_j)$（jが固定）の確率（式(18)）、または必然性（式(19)）であるというふうに解釈できる。但し、確率測度は確率分布関数 $w_1^j, \ldots, w_N^j$ で定まり（式(18)）、必然性測度 Nは、可能性分布関数 $w_1^j, \ldots, w_N^j$ で定まる可能性測度 Π の双対測度である（式(19)）。

5.2 ファジィ積分によるパターン認識

ファジィ積分は、主観的な多属性評価の分野においてよく使われている。特に属性が相互に依存する場合は weighted sum 法よりかなり良い結果が得られる [6]。相互依存はファジィ測度で表す。つまり、x_i と x_j が互いに依存するのは、ある意味で x_i に含まれる情報と x_j の情報がある程度重なっているということである。従って、ファジィ測度を情報測度と見なせば、$\mu(\{x_i, x_j\}) \leq \mu(\{x_i\}) + \mu(\{x_j\})$ となる。この解釈の下で、相互依存は劣加法性を導き、weighted sum 法は独立な属性の評価という意味を持つ。

上記の解釈及び節4の結果に基づき、ファジィ積分による pattern matching の手法を提案する。定まったクラス C_j に関して、部分的な判別関数の値$\phi_1(C_j), \ldots, \phi_N(C_j)$ は、属性の空間 $\{x_1, \ldots, x_N\}$ 上でファジィ事象を決定する。このファジィ事象は$\underset{\sim}{C}_j$ で表し、そのメンバーシップ関数は次のように定義される：

$$\forall i,\ \phi_{\underset{\sim}{C}_j}(x_i) \triangleq \phi_i(C_j) \tag{20}$$

全体的な判別関数$\hat{\Phi}$を次のように定義する：

$$\forall j,\ \hat{\Phi}(C_j) \triangleq \mu_j^*(\underset{\sim}{C}_j) \tag{21}$$

但し、μ_jはクラス C_j に関して属性の相互依存を表す劣加法的なファジィ測度であり、μ_j^*は節4で定義したその双対測度を表す。上記の結果から、提案した定義が Bellmann- Zadeh 法、weighted min 法（菅野積分による定義）及び weighted sum 法（Choquet 積分による定義）を含むのは明らかである。しかしながら、Bayesian independant 法は含まれていない。

ここで、二つの点に注目すべきである。先ず、主観的な評価と違って、パターン認識の分野では、一般的に属性を合接的に結合する。つまり、あるサンプル X°を分類するとき、それぞれの属性がクラスにマッチングしなければならない。その中にある一つの属性がクラス C_lにマッチングしなければ、全体的にサンプル X°はクラス C_l に属さないという意味である。従って、式(21)では劣加法的な測度（可能性型）μ_jの代わりに双対測度（必然性型）μ_j^*を使う。次に、weighted sum 法と weighted min 法は両方とも極端な状態を表す。つまり、weighted sum 法は各クラスに関して属性の間の完全な独立を意味し、weighted min は完全な相互依存を表す。上に提案した方法は、幅広く様々な状態を表現できるということが明らかである。

5.3 例

この節では、次の簡単な状態を考える：$C \triangleq \{C_1, C_2\}$、$X \triangleq [x_1, x_2]^t$。更に、$X|C_1, X|C_2$は二次元ガウス分布関数に従う。各例には、シミュレーションで次の手法を通用した：Bayes の最適法（BO）、Bayesian independent 法（BI）、Bellmann-Zadeh 法（BZ）、weighted sum（WS）、weighted min（WM）、菅野積分による方法（式(21)、$\mathcal{F} = (\vee, \vee, \vee, \wedge)$）（SI）及び Choquet 積分による方法（式(21)、$\mathcal{F} = (\hat{+}, \hat{+}, \hat{+}, \cdot)$）（CI）。それ以外は、$\Psi$ =maxsum[1] や$\hat{\Phi}(C_j) = \mu(\underset{\sim}{C}_j)$（離接的な結合）という手法を行なったが、予測された通り、良い結果は得られなかったので、ここで省略する。

[1] $\text{maxsum}(x, y) \triangleq \max(0, x + y - 1)$

上記の方法を比較するために、決定領域と誤分類確率という古典決定理論でよく使われる基準を利用する。決定領域とは、空間(x_1, x_2)の中の、C_1を決定する領域 D_1と C_2を決定する領域 D_2のことである。即ち：

$$D_i \triangleq \{(x_1, x_2) \mid \hat{\Phi}(C_i) \geq \hat{\Phi}(C_j),\ \forall j\} \tag{22}$$

誤分類確率 ε は，同様に確からしい二つのクラスの場合次のように定義されている：

$$\varepsilon \triangleq \frac{1}{2}\left(\int_{D_1} p(X|C_2)dX + \int_{D_2} p(X|C_1)dX\right) \tag{23}$$

但し、$p(X|C_j)$ は $X|C_j$の分布関数を表し、積分は普通（non fuzzy）の積分である。

次の三つの基礎的な状態を考慮した：

例1 $x_1|C_1$と $x_2|C_1$は独立で、$x_1|C_2$と $x_2|C_2$ の相関係数は高い。

$$E[X|C_1] = [0\ \ 0]^t,\ \ E[X|C_2] = [1\ \ 1]^t$$

$$\Gamma[X|C_1] = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.0 \\ 0.0 & 0.2 \end{bmatrix},\ \ \Gamma[X|C_2] = \begin{bmatrix} 0.20 & 0.18 \\ 0.18 & 0.20 \end{bmatrix}$$

但し、$E[\cdot]$、$\Gamma[\cdot]$ はそれぞれ期待値、分散行列を示す。ここで用いたファジィ測度は、次のように定義された：

$$C_1 : \begin{cases} \mu_1(\{x_1\}) = 0.5 \\ \mu_1(\{x_2\}) = 0.5 \end{cases},\ \ C_2 : \begin{cases} \mu_2(\{x_1\}) = 0.95 \\ \mu_2(\{x_2\}) = 0.95 \end{cases}$$

WS 法、WM 法の重みについては、μ_1、μ_2と同様な係数を用いた。

例2 $x_1|C_1$と $x_2|C_1$、$x_1|C_2$と $x_2|C_2$は両方とも独立である。
例1と違うのは、クラス C_2の分散行列だけである：

$$\Gamma[X|C_2] = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.0 \\ 0.0 & 0.4 \end{bmatrix}$$

ここで加法性的な測度$\mu_1(\{x_1\}) = \mu_1(\{x_2\}) = \mu_2(\{x_1\}) = \mu_2(\{x_2\}) = 1/2$ を用いた。

例3 $x_1|C_1$と $x_2|C_1$の相関係数、$x_1|C_2$と $x_2|C_2$の相関係数は両方とも高い。

$$E[X|C_1] = [1\ 0]^t,\ \ E[X|C_2] = [1\ 1]^t$$

$$\Gamma[X|C_1] = \begin{bmatrix} 0.20 & 0.18 \\ 0.18 & 0.20 \end{bmatrix},\ \ \Gamma[X|C_2] = \begin{bmatrix} 0.20 & 0.25 \\ 0.25 & 0.40 \end{bmatrix}$$

ファジィ測度μ_1とμ_2は、共に例1のμ_2と同じである。

図1、2、3は、各例の場合決定領域と誤分類確率を示す。図から次のことがわかる：

- 決定領域の形を見ると、例1の場合は SI と CI が最適な形に近い形を取れ、他の手法は全く違う形を示す。例3では、BZ 法の方が良いが、BZ 法は SI 法の一種である。一般には、CI 法と SI 法は似ている決定領域を示す。
- 誤分類確率の面では、行なわれた方法が二つのグループに分かれている：（BI、BZ、SI、CI）と（WS、WM）。一番目のグループはかなりよい性能を示す。
- 予測した通り、相関係数が高い場合、BI 法と WS 法では良い結果を得ない。
- BZ 法は、どんな場合でもかなり良い性質を持つ。

6 おわりに

本論文では、ファジィ事象のファジィ測度の概念に基づき、多属性パターン認識の手法を提案した。簡単な例でBayes最適法と比較した結果、提案した方法は良い性質を持つ。

今後、具体的な例に向けて、ファジィ測度の学習、相関係数と劣加法性の関係が課題になろう。

謝辞 本論文の作成に関する室伏俊明氏（東京工業大学）の有益な助言と議論に感謝する。

References

[1] G. Choquet, Theory of capacities, *Annales de l' Institut Fourier* 5 (1953), 131-295.

[2] D. Dubois, H. Prade, C. Testemale, Weighted fuzzy pattern matching, *Fuzzy Sets & Systems* 28 (1988), 313-331.

[3] D. Dubois, H. Prade, A class of fuzzy measures based on triangular norms, *Int. J. General Systems* 8 (1982), 43-61.

[4] M. Grabisch, H. Prade, Multi-attribute classification and fuzzy integral, *Proc. Int. Conf. on Fuzzy Logic & Neural Networks*, Iizuka (1990).

[5] M. Grabisch, M. Sugeno, Fuzzy integrals and dual measures — Application to pattern classification—, *Proc. Sino-Japan Joint Meeting on Fuzzy Sets & Systems*, Beijing (1990)

[6] 市橋秀友、田中英夫、浅居喜代治、ファジイ積分とその多属性意思決定問題への応用、計測自動制御学会論文集、22 No 5,(1986),61-66

[7] R. Kruse, Fuzzy integrals and conditional fuzzy measures,*Fuzzy Sets & Systems* 10 (1983), 309-313.

[8] T. Murofushi, M. Sugeno, Fuzzy t-conorm integrals with respect to fuzzy measures : generalization of Sugeno integral and Choquet integral, to appear in *Fuzzy Sets & Systems* .

[9] M. Sugeno, *Theory of fuzzy integrals and its applications*, Doct. Thesis, Tokyo Institute of Technology (1974).

[10] 菅野道夫、室伏俊明、ファジイ測度の一般形に対する積分としてのChoquet積分、第3回ファジイシステムシンポジウム、東京、(1990),31-36

[11] S. Weber, ⊥-decomposable measures and integrals for Archimedean t-conorms ⊥, *J. Math. Anal. Appl.* 101 (1984), 114-138.

問い合わせ先：
〒２２７横浜市緑区長津田町４２５９番地
東京工業大学 総合理工学研究科
システム科学専攻
TEL 045-922-1111 ext. 2641
FAX 045-921-1485

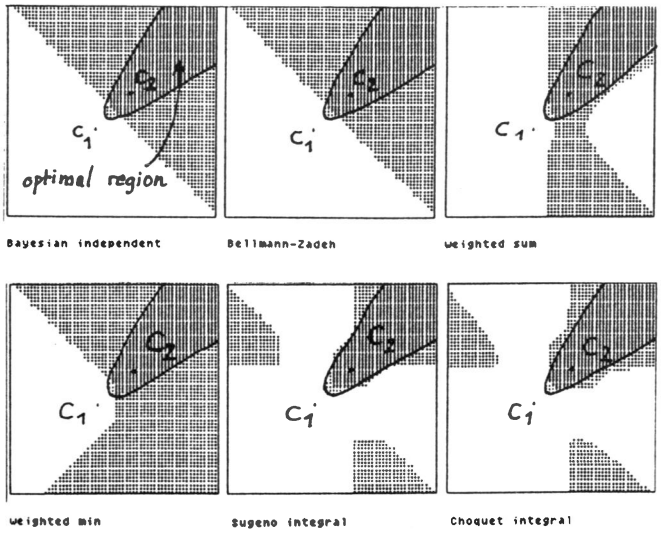


図1 ：例1のクラス C_2 に関する決定領域

誤分類確率（例１）			
Bayesian optimal	0.0685	weighted sum	0.123
Bayesian independent	0.0925	weighted min	0.142
Bellmann-Zadeh	0.0925	Sugeno integral	0.0935
maxsum	0.1575	Choquet integral	0.0855

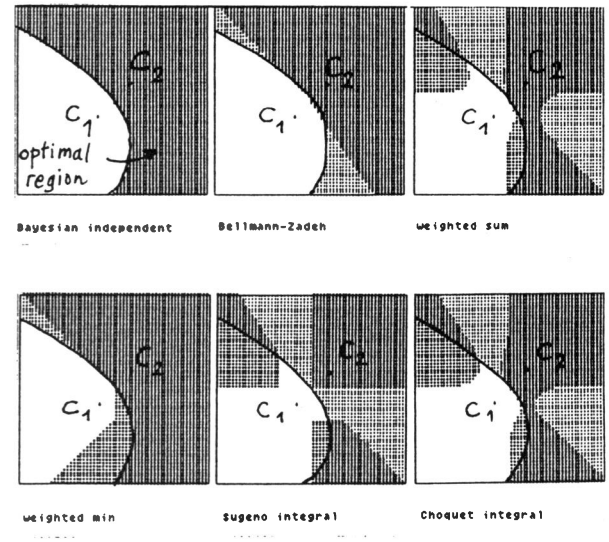


図2 ：例2のクラス C_2 に関する決定領域

誤分類確率（例２）			
Bayesian optimal	0.0726	weighted sum	0.114
Bayesian independent	0.0726	weighted min	0.108
Bellmann-Zadeh	0.0732	Sugeno integral	0.180
maxsum	0.207	Choquet integral	0.108

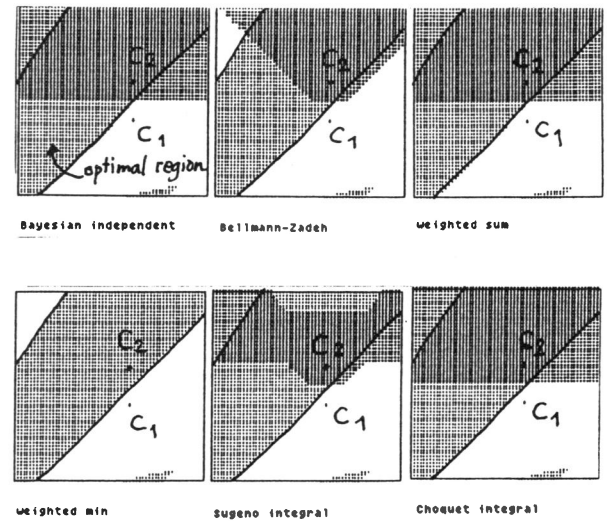


図3 ：例3のクラス C_2 に関する決定領域

誤分類確率（例３）			
Bayesian optimal	0.0258	weighted sum	0.173
Bayesian independent	0.173	weighted min	0.500
Bellmann-Zadeh	0.150	Sugeno integral	0.156
maxsum	0.223	Choquet integral	0.173

FA3-2

A Dynamic Memory Model for Scene Understanding

Weijing ZHANG and Michio SUGENO

Department of Systems Science, Tokyo Institute of Technology
4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227, Japan

Abstract: In our view, to understand a scene means to create a linguistic model of the scene. In [6], we proposed an approach to scene understanding using Fuzzy Case Based Reasoning(FCBR), but some problems remain unsolved. In this paper we try to make some of the problems clear. We give definitions of some important concepts including *case* and give examples to show how to use cases in order to understand a scene. We also discuss about some different types of learning with our Memory Model and the relation between case base and the proposed Memory Model.

1 Introduction

Scene understanding is a very complex recognition process and deeply concerned with memory. We use knowledge unconsiously and still know little about the mechanism. What we are sure is that we understand a scene because we know. Knowing means remembering and reminding, and also means we have some knowledge in our mind before we see. If we have no information about what we are seeing, we will be unable to understand it.

For this reason, we proposed an approach to understand a scene based on memory[6]. The Memory Model we proposed consists of five levels : Individual-Memory (IDM), Category-Memory (CM), Scene-Memory (SNM), Situational-Memory (STM), and Intentional-Memory (IM).

In the model(details can be found in [6]), IDM is used to store particular knowledge about an individual object; CM contains general features of a class of objects; SNM contains information about relations among objects in scenes; STM tells us how SNM and CM should be revised according to different situations; and IM plays the role of controling the whole process of scene understanding.

These five levels of memory correspond to five different kind of knowledge concerning a scene. We think all these levels are necessary when we want to understand a scene. Among them, CM, SNM and IM are basic levels.

In all these memory levels, we suggested to use linguistic variables to represent knowledge [6] about features of objects in a scene and relations among the objects. Linguistic variables can be defined as fuzzy sets [7] with membership functions and is proposed by Zadeh as a new approach to the analysis of complex systems which are difficult to be handled by conventional numerical approaches[8, 9].

We think linguistic variables can be very useful in scene understanding because it is not easy to use conventional numerical approaches to describe a scene, but it is natural to use linguistic variables to do so. For example, "color is *blue* " and "area is *very_very_big* " are fuzzy features of object sky; "cloud *in* sky " and "sky *above* mount " are examples of fuzzy relations related with sky. Here, *blue, very_very_big, in, above* are linguistic values characterized with membership functions as their meanings.

We called our approach Fuzzy Case Based Reasoning in [6], but what a case is and how to use Case Based Reasoning [3, 2, 1, 4, 5] were not very clear. We will give definitions of some important concepts used in our research on scene understanding including *case* and try to make the problems clear in the following sections.

In addition, we will give some discussions about the problem of learning and about the relation between *Case Base* and the proposed Memory Model. In [6], we pointed out that our Memory Model can be used for learning and we called it Relation Based Learning(RBL). In this paper, we will discuss Feature Based Learning as well as RBL.

2 What Is a Case?

In [6], we did not define what a case is. To use Case Based Reasoning, we must make the problem clear at first. We define some important concepts used in our scene understanding system as follows:

- **scene:** A scene is a view that we see; there are some objects in a scene. Among the objects, there are some relations.
- **structure:** A region or a line extracted from a scene input into a computer with image processing methods.
- **input data or 2D data:** A set of 2-dimensional data of features and relations of structures extracted from a scene. Usually represented by linguistic variables.
- **interpretation:** Result of scene undertanding. A connection between 2D data and objects in the real world. Linguistic model of a scene.
- **case:** Composed of input data and interpretations of a scene. The first part is called Part-D and the second Part-I. (As we will see, Part-D has two parts: Part-DS and Part-DR; Part-I has Part-IS and Part-IR).

From the definitions, we know that a scene is remembered along with the interpretations as a *case* in the Case Base.

Now let us see a simple example of a scene in Case Base: (written in Prolog in our scene understanding system under development. the 1st argument is case No. and the 4th is structure No. or relation No., `d,s,r,i` are abbreviations of `2D-data`, `structure`, `relation` and `interpretation` respectively).

CASE-1 : Part-D

Part-DS

```
sn(1,d,s,1,color,blue).
sn(1,d,s,1,area,vvb).
sn(1,d,s,1,shape,rectangle).
sn(1,d,s,2,color,white).
sn(1,d,s,2,area,b).
sn(1,d,s,3,color,blue).
sn(1,d,s,3,area,vvb).
sn(1,d,s,3,shape,rectangle).
sn(1,d,s,4,color,white).
sn(1,d,s,4,area,m).
```

Part-DR

```
sn(1,d,r,1,2,in,1).
sn(1,d,r,2,4,in,3).
sn(1,d,r,3,1,adjoin,3).
sn(1,d,r,4,1,above,3).
```

CASE-1 : Part-I

Part-IS

```
sn(1,i,s,1,sky).
sn(1,i,s,2,cloud).
```

S-No.	Color	Area	Shape	Others
1	blue	vvb		
2	white	b		
3	green	vb		
4	green	vvs		
5	brown		strip	lg=s,wd=vvs,ag=90
6	red	cs	parallelogram	
7	white	cs	parallelogram	
8		vvs	parallelogram	
9	red	vs	triangle	
10	white	s	parallelogram	
11		vvs	parallelogram	
12	green	m		
13	brown		strip	lg=m,wd=vs,ag=90
14	grey		strip	lg=vb,wd=s,ag=175
15	blue	s		
16	grey		strip	lg=b,wd=s,ag=175
17	green	vvb	quadrilateral	

Table 1: Structures in Picture-1 (S-No.:structure-No.; lg:length; wd:width; ag:axis-angle)

```
sn(1,i,s,3,sea).
sn(1,i,s,4,boat).
Part-IR
sn(1,i,r,1,cloud,in,sky).
sn(1,i,r,2,boat,in,sea).
```

CASE-1 is very simple. The scene has only four structures (in this case a structure corresponds to an object): blue sky, blue sea, white cloud in the sky and white boat in the sea. The first part of CASE-1(Part-D) can be divided into two parts: Part-DS, containing features of structures extracted from the scene; Part-DR, containing relations among the structures. The second part of CASE-1(Part-I) are interpretations of the scene with Part-IS denoting what object a structure is and Part-IR describing relations among the objects. Representation `sn(1,d,r,1,2,in,1)` in Part-DS reads "in scene-1, structure-2 is in structure-1 "; and `sn(1,i,s,1,sky)` in Part-IS reads "in scene-1, structure-1 is sky ".

It is necessary to point out that usually Part-IR is not a repetition of Part-DR. They can be different because Part-DR is the raw data of a input scene and Part-IR is the result of the interpretations about the raw data. Suppose we have "car *on* road " in Part-IR. Usually in the Part-DR we cannot find a relation as "structure-X *on* structure-Y ". Instead, we may have relations like "structure-X *above* structure-Y " and "structure-X *near* structure-Y " in Part-DR. How to express relations in Part-IR is a problem being worth considering. Indeed, how to build a language for our scene understanding system is under consideration.

We assume that all scenes can be represented by structures extracted from themselves. We think this assumption is appropriate considering present image processing techniques.

All structures in CASE-1 are regions; in fact we do not consider lines in this paper because regions are sufficient in our examples.

3 Case Based Reasoning

3.1 A New Scene

Suppose we have a new input scene(Picture-1) with 17 structures as listed in Table 1 (in system they are written in Prolog clauses as Part-DS of CASE-1) and we want to understand it using scenes in memory. Relations in Picture-1, i.e. Part-DR of the new scene, are omitted for space limitations.

The image of this new scene is shown in Figure 1 and the corresponding object names of structures in the scene are listed in Table 2.

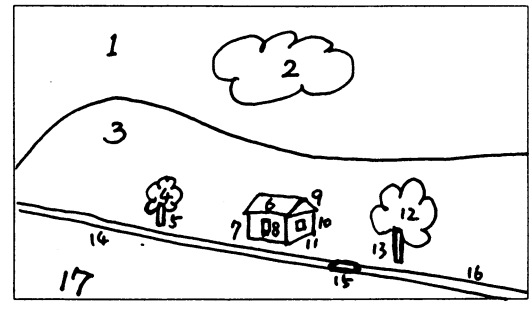


Figure 1: A new scene : image of Picture-1

S-No.	Object	Memo
1	sky	
2	cloud	
3	mount	
4	t-crown	tree on the left
5	t-trunk	tree on the left
6	h-roof	house-roof, the left part
7	h-body	house-body, the left part
8	door	house-door
9	h-roof	house-roof, the right part
10	h-body	house-body, the right part
11	window	house-window
12	t-crown	tree on the right
13	t-trunk	tree on the right
14	road	road, the left part
15	car	
16	road	road, the right part
17	field	

Table 2: Objects in Picture-1 (S-No.: structure-No.)

3.2 Cases in Case Base

Except CASE-1 shown in section 2, other cases in Case Base are as follows(for the sake of space we give only Part-IR to show the images of these cases):

CASE-2 : Part-IR

```
sn(2,i,r,1,cloud,in,sky).
sn(2,i,r,2,mount,under,sky).
sn(2,i,r,3,road,under,mount).
sn(2,i,r,4,field,before,road).
sn(2,i,r,5,road,between,mount,field).
```

CASE-3 : Part-IR

```
sn(3,i,r,1,car,on,road).
sn(3,i,r,2,tree,along,road).
sn(3,i,r,3,road,in,field).
sn(3,i,r,4,road,nearer,tree).
sn(3,i,r,5,tree,nearer,mount).
```

CASE-4 : Part-IR

```
sn(4,i,r,1,house,near,road).
sn(4,i,r,2,tree,near,road).
sn(4,i,r,3,road,in,field).
sn(4,i,r,4,tree(4,5),in,field).
sn(4,i,r,5,tree(12,13),nearer,tree(4,5)).
sn(4,i,r,6,house,nearer,mount).
sn(4,i,r,7,road,nearer,house).
```

CASE-2, CASE-3, CASE-4 have 5,13,16 structures respectively. As we have mentioned in the previous section, how to express relations in Part-IR as well as Part-DR is a problem we are considering.

3.3 Search an Object

There are two problems of scene understanding, one is to find a particular object in a given scene, i.e. to answer whether the object is in the scene and give its location; another is to tell something

Object	Process-OBJ		Test-CM	
	Result	Memo	Result	Memo
car	7	F	15	T
cloud	2	T	*	
door	8,11	T,F	*	
field	17	T	3,17	F,T
h-body	7,10	T,T	*	
house	7,10	F,F	*	
h-roof	fail		*	
mount	3,4	T,F	*	
road	fail		14,16	T,T
sky	fail		1	T
t-crown	4,12	T,T	*	
tree	fail		*	
t-trunk	5,13	T,T	*	
window	8,11	F,T	*	

Table 3: Results of searching objects in Picture-1 (T:True,F:False)

about the whole scene, like "a red car on a road ", "five trees along the road ", i.e. to give a linguistic description of the scene. The first one is a search problem, the second is an interpretation one. Let us consider search problem here.

There are more than one approaches to search an object in our model and this can be considered as the flexibility of the model. The general process of searching an object in a scene using Part-IS and Part-DS in Case Base can be summarized as follows (Suppose the object we want to search is B):

Process-OBJ:

- Find out all scenes where there is B in Part-IS.
- Collect all features and their values from Part-DS of found scenes. B can be characterized by these features.
- Search structures matching with these features in the input scene.

Results of searching objects in Picture-1 are shown in Table 3. Fails and false are due to the lack of data in the system. For instance, structure No.7 is *house_body* (see Table 2) but is recognized as *car* because there is no information about how *house_body* is different from *car* in the present Case Base. This kind of things do happen when we have little experience (the system has only four cases now!).

When we use Part-IR and Part-DR in addition to Part-IS and Part-DS, results can be improved and the process becomes different. For example, we can use all these four parts to answer a question like "cloud in sky ? ". In this case, the process is as follows (suppose the question is "$X\ R\ Y$? " where X, Y are objects' names and R is a relation between them):

Process-REL:

- Find out features of X and Y by **Process-OBJ**.
- Find out all scenes where there is ($X\ R\ Y$) in Part-IR.
- For each scene, find the corresponding structures of X and Y by Part-IS.
- Find relations of the corresponding structures from Part-DR.
- From structures possessing the relations found above in the input scene, check whether they are X and Y by features obtained from **Process-OBJ**.

In Process-REL, relations in Part-IR and Part-DR serve as constraints used to reduce searching area. This is very important in recognitive processes.

```
========  SEARCH OBJECT <sky>  ========
----------  Related Scenes  ------------
r-sn( sky, 1, 1 ).
r-sn( sky, 2, 1 ).
r-sn( sky, 3, 1 ).
r-sn( sky, 4, 1 ).
-----  Features of <sky> in Scenes  -----
obj-f( sky, 1, 1, color, blue ).
obj-f( sky, 1, 1, area, vvb ).
obj-f( sky, 1, 1, shape, rectangle ).
obj-f( sky, 2, 1, color, blue ).
obj-f( sky, 2, 1, area, vvb ).
obj-f( sky, 3, 1, color, blue ).
obj-f( sky, 3, 1, area, vvb ).
obj-f( sky, 4, 1, color, blue ).
obj-f( sky, 4, 1, area, vvb ).
----------  Features of <sky>  ----------
obj-gf( sky, 3, shape, rectangle, 1 ).
obj-gf( sky, 1, color, blue, 4 ).
obj-gf( sky, 2, area, vvb, 4 ).
------------  Search Result  ------------
<fail>
```

Table 4: Results of searching object *sky* by Process-OBJ

3.4 Knowledge Aquisition and CM

Table 4 shows results of searching object *sky* in Picture-1. Although *sky* was not found (the result is `fail`), some features of *sky* is obtained from cases. Saving these features for later use, they will act as CM(Category-Memory).

As we mentioned in the first section, CM is a memory level containing general features of a class of objects. In order to understand a scene, we need CM and other four levels of memory.

We can teach a system CM (and other levels also) in two different ways: one is to input CM knowledge directly into the system, another is to give the system cases and let the system extract data from the cases when necessary (by Process-OBJ) and store the extracted data as CM. We think both methods are important. With the direct input method we can modify data in memory and check the data extracted from cases. With the extraction method, data in all levels of memory can be acquired automatically as long as we give cases to the system.

Table 5 is an example of CM data directly input into the system. Column Test-CM in Table 3 shows some results of searching objects with knowledge in CM. As we see, they improved the results obtained by Process-OBJ.

3.5 Memory and Case Base

Now let us consider the problem of how the memory is related with cases. A case is a scene remembered with the interpretations of the scene and is stored in Case Base. The Memory Model with five levels contains information we need to recognize objects and understand a scene. In this sense, memory and cases are closely related. Cases are raw materials of knowledge, and memory is organized knowledge. Use either of them or both is a problem depending on how we like the work to be done.

Generally, when the number of cases in the system is small, we need to input data into memory directly if we expect a satisfactory recognition result. While cases in the system increase, the extracted data get closer to the true values in the real world. Cases are something like human experience. Of course, data difficult to be extracted from cases should be input into the system even if there are a large number of cases.

```
***********      CM - sky      ***********
--------     feature - value     ---------
cm( sky, f, 1, color ).
cm( sky, f, 2, area ).
cm( sky, f, color, s, blue, 0 ).
cm( sky, f, color, s, grey, 0 ).
cm( sky, f, color, s, white, -1 ).
cm( sky, f, color, s, black, -1 ).
cm( sky, f, color, s, green, -1 ).
cm( sky, f, color, s, yellow, -1 ).
cm( sky, f, color, s, brown, -1 ).
cm( sky, f, color, s, red, -1 ).
cm( sky, f, area, m, [cb,vvb], 0 ).
cm( sky, f, area, m, [vvs,m], -1 ).
-------   feature - relation    --------
cm( sky, r, 1, above ).
cm( sky, r, 2, has-in ).
cm( sky, r, 3, adjoin ).
cm( sky, r, above, any, 1 ).
cm( sky, r, has-in, cloud, 0 ).
cm( sky, r, adjoin, mount, 0 ).
cm( sky, r, adjoin, sea, 0 ).
cm( sky, r, adjoin, tree, 0 ).
cm( sky, r, adjoin, house, 0 ).
cm( sky, r, adjoin, field, 0 ).
-------    weight of features    ------
cm( sky, w, f, color, 1 ).
cm( sky, w, f, area, 1 ).
cm( sky, w, f, shape, -1 ).
cm( sky, w, r, above, 1 ).
cm( sky, w, r, has-in, -1 ).
```

Table 5: CM *sky* : Direct input

4 How to be Dynamic?

In our opinion, *dynamic* means changing according to some rules. For this reason, dynamic memory has a very close relation with *learning*. In our scene understanding system, learning means aquisition of knowledge about, for example, features of objects, relations among objects in a scene, etc.

As we pointed out, a system can learn from cases. This is a great advantage of Case Based Reasoning comparing with rule based reasoning[1, 4, 5].

4.1 Relation Based Learning

Relation Based Learning(RBL) is a kind of learning we named in [6] using the proposed Memory Model.

When we have no information about an object in CM, but have something in SNM, we can *learn* about the object. Suppose we have nothing in CM about a *car*, i.e. we know nothing about the features of a *car*. But by SNM, we know "car on road". We find out all structures satisfying the constraint "on road". Suppose structure S among them is something we did not know. Then we can expect that S is a *car*, and descriptions about S from the input picture become the features of a *car* to be stored in CM to create a new category.

We can find examples from daily life for this kind of learning. When a child, who does not know the meaning of *book*, is told to get a *book* on a table, he will succeed to do it if he knows what a table is and other objects except the *book* on the table. By doing it, he will get some knowledge about what a *book* is.

We think this kind of learning is very important because we need not to tell computers everything about objects when inputing cases into the system. We suggested to call this kind of learning Relation Based Learning because we used relations to learn the meaning of an object.

4.2 Feature Based Learning

In addition to RBL, we have another kind of learning which is based on features and we suggest to call it Feature Based Learning(FBL).

Suppose we have a scene of a room and hear a sentence about the room which says "...a red table in the room ...", then by feature color is *red* we can recognize the *table* and learn what a table is.

When a system makes a connection between the word *table* and the features of a table (e.g. color is red, shape is round, etc.), relations among table and other objects (e.g. table on floor, book on table, chair near table, etc.), we can say that the system has learnt something about *table*.

FBL, together with RBL, are very natural approaches we human often use to learn things. We think these kinds of learning can be realized by connecting data extracted from cases.

5 Conclusions

In [6], we suggested to use linguistic variables to describe a scene and store knowledge to understand a scene in a Memory Model consisting of five levels.

In this paper, we defined what a *case* is and gave examples of recognizing objects in a scene to show how Case Based Reasoning works. Furthermore, we discussed the problem of learning and the relation between Case Base and the Memory Model. We named a new kind of learning Feature Based Learning in addition to Relation Based Learning. As we discussed, these kinds of learning are very useful when we hope a system to be dynamic.

Scene understanding is not a problem of data processing with some mathematical functions. This is the starting point of our research.

A scene understanding system based on our proposed approach is now under development. The processing is still limited in high-level data. While inputing more cases into the system and investigating the relations of Case Base with each levels of memory in detail, we are thinking of building a set of linguistic variables for scene description.

Acknowledgements

Authors thank Dr.T.Murofushi and Dr.M.Grabisch for reading the draft and giving useful advices.

References

[1] K.J.Hammond : *Case-Based Planning,* Proc. Workshop on CBR by Defense Advanced Research Projects Agency(1988), 17-20.

[2] J.L.Kolodner : *Extending Problem Solver Capabilities through Case-Based Inference,* Proc. 4th Annual Int. Machine Learning Workshop(1987), 167-178.

[3] R.C.Schank : *Dynamic Memory,* Cambridge University Press (1982)(in Japanese translation).

[4] C.M.Seifert : *Goals in Reminding,* Proc. Workshop on CBR by Defense Advanced Research Projects Agency(1988), 357-369.

[5] H.S.Shinn : *Abstractional Analogy: A Model of Analogical Reasoning,* Proc. Workshop on CBR by Defense Advanced Research Projects Agency(1988), 370-387 .

[6] M.Sugeno, W.Zhang : *An Approach to Scene Understanding Using Fuzzy Case Based Reasoning,* Proc. of Sino-Japan Joint Meeting on Fuzzy Sets and Systems(1990)(to appear).

[7] L.A.Zadeh : *Fuzzy Sets,* Information and Control, 8(1965), 338-353.

[8] L.A.Zadeh : *Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes,* IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, SMC-3(1973), 28-44.

[9] L.A.Zadeh : *The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning,* I, II, III, Information Sciences, 8(1975), 199-249, 301-357, 9(1975), 43-80.

Address of authors:

Department of Systems Science, Tokyo Institute of Technology
4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227, Japan
Tel: 045-922-1111 ext. 2641 Fax: 045-921-1485

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FA3-3

On Osherson and Smith's contradiction

Kenpei Shiina (椎名乾平)

Waseda University

Abstract

Osherson and Smith (1981) falsified fuzzy set theory since its application to cognitive modeling of concepts and categories leads to some contradictory results which seem to suggest the insufficiency of fuzzy set theory. The purpose of this note is to throw doubt on their paradoxes and to relieve fuzzy set theory from false charges. The reason why their exmaples seem contradictory is that people can hardly deal with sets as axiomatic set theory requires ; people are naive set theorists.

What if an ambitious new theory would be misunderstood and totally ignored in a scientific field? This is the case with fuzzy set theory in cognitive science. We know that fuzzy set theory received some attention from cognitive scientists studying concepts and categories. However, research in the seventies aside, those who attempt to make serious use of fuzzy set theory must face the counterintuitive examples presented by Osherson and Smith (1981) which, at a glance, seem to be insurmountable. In their paper, Osherson and Smith tried to raise questions about the validity of prototype theory and, for this purpose, proposed an amalgam of prototype theory and fuzzy set theory. Although their study raised several fundamental questions, it brought forth controversy(Jones, 1982 ; Zadeh, 1982; Lakoff, 1987) and arguments for and against it have been made up to now(Cohen and Murphy, 1984; Shiina,1989 ;Fuhrmann, in press). As for the prototype theory part of their amalgam, however, researchers have often claimed the insufficiency of their falsification (Cohen and Murphy, 1984; Lakoff, 1987; Fuhrmann, in press). But the fuzzy set theory part still remains falsified. Therefore it is fuzzy set theory that is badly damaged by their examples. At present we can point out the following facts: 1) no one has ever succeeded in direct falsification of their examples, 2) even the supporters of fuzzy set theory do not deny the existence of the counterintuitive results and the proposals to explain the results have been somewhat ad hoc(Smithson, 1987; 1989, p.116), and 3) the papers which cite Osherson and Smith's study almost always regard it as strong evidence against fuzzy set theory ; all of which have blocked the way of otherwise promising fuzzy set theory. The purpose of this note is twofold : to relieve fuzzy set theory from false charges by showing that the paradoxes are groundless, and, by doing so, to indicate that people are using naive set theory rather than axiomatic set theory.

Osherson and Smith (1981) presented four contradictions concerning fuzzy set theory, namely, contradictions about (1) conjunctive concepts, (2) logically empty or universal concepts, (3) disjunctive concepts, and (4)truth conditions. We do not consider (2) and (3) in this note since, in (3), there is a simple misunderstanding in modeling (Zadeh, 1982), and in (2), there is too great a gap to bridge between Osherson and Smith's argument and fuzzy set theory; they advocate the law of contradiction while fuzzy set theory does not. Therefore it will be fruitless to discuss this matter any further. By contrast, contradictions (1) and (4) are somewhat technical and may be worth reconsidering ; the postulates and operations of fuzzy set theory are preserved, but it is still argued that the application of the set theoretic operations yields counterintuitive results, which gives us the impression that there is some internal inconsistency in the theory.

As for the general notions of fuzzy set theory and its set theoretic operations, readers should be referred to Zadeh (1965), Osherson and Smith(1981), and Dubois and Prade (1980). We should make clear only one point here;to define a fuzzy set, we need a total set which is a normal (crisp) set. Upon the normal set membership functions are to be defined. And fuzzy logical operations are performed on the membership functions constructed as above. Consequently, the theory says nothing about what becomes of the result of a fuzzy logical operation when it is performed on membership functions defined on different total sets.

Now we introduce Osherson and Smith's conjunction paradox.

1: Let F be the set of all fruit. Consider the fuzzy concepts, apple and striped, represented by characteristic functions C_{apple} and $C_{striped}$, respectively, defined on F. Now consider a conjunctive concept striped apple.

2:Since striped apple is a conjunctive concept, we have

3: $\forall x \in F$

4: $C_{striped\ apple}(x) = \mathrm{Min}(C_{striped}(x), C_{apple}(x))$.

5: Suppose that a striped apple a is contained in F.

6: a is less prototypical of apple than of apple-with stripes. Thus we have,

7: $C_{striped\ apple}(a) > C_{apple}(a)$,

8: which contradicts (4).

Before proceeding, we introduce two absurd fake paradoxes : FP1 and FP2.

FP1:Let O be the set of all living things, A be the set of all apples, and D be the set of all dogs. Let a be an apple. Then it is apparent that;

$$a \notin A \cap D. \qquad \text{(FP1.1)}$$

One day a capricious witch whimsically metamorphosed a into a new creature :`apple-dog'. Since a is now an apple-dog, we have

$$a \in A \cap D, \qquad \text{(FP1.2)}$$

which contradicts (FP1.1).

FP2:Let O be the set of all living things, A be the fuzzy set representing the concept `apple', and D be the fuzzy set representing the concept `dog'. Let a be an apple. The reason why we introduce fuzzy sets is, of course, that natural categories are said to have graded structures. According to the standard fuzzy set theory, we have

$$C_{A \cap D}(a) = \mathrm{Min}\,(C_A(a),\ C_D(a)). \qquad \text{(FP2.1)}$$

One day a capricious witch whimsically metamorphosed a into, again, an `apple-dog'. Since a is now an apple-dog, we have

$$C_{A \cap D}(a) > C_A(a) \qquad \text{(FP2.2)}$$

which contradicts (FP2.1).

No one will consider FP1 and FP2 contradictory. They are merely absurd, since the `apple-dog' is not contained in O of FP1.1 and FP2.1 but is contained in O of FP1.2 and FP2.2, because of the magic in the stories ; formally O of FP1.2 and FP2.2 must be interpreted as $O \cup \{a\}$. Now we are ready to consider the relation between the stories and Osherson and Smith's conjunction paradox. In a nutshell, all the three stories have the same structure: FP1 is a normal set version, and FP2 has virtually the same structure as the Osherson and Smith paradox. This means that what is problematic in Osherson and Smith's paradox is that we are implicitly changing the total set, while the total set is explicitly changed in the stories. That is, in the subjective evaluation of membership functions in their thought experiment, the total set upon which the membership functions are evaluated are rather arbitrarily extended ; they use F when evaluating a striped apple's appleness, while they use the set of $F \cup \{\text{striped apple}\}$ when evaluating the membership of a striped apple's striped appleness. As mentioned previously, the axioms of fuzzy set theory say nothing about the comparison between membership functions defined on different total sets and fuzzy logical operations are not feasible in such a case.

Furthermore we can point out the second type of rather implicit change of total set : spot lighting or focusing of total sets. Intuition tells us that we are actually using neither F nor $F \cup \{\text{striped apple}\}$, but the spotlighted set of apples, which is a subset of F, in evaluating a striped apple's appleness. Similarly in Osherson and Smith's pet-fish example, we are using the set of pet-fishes when evaluating a guppy's pet-fish-ness, while we are using the set of pets and the set of fishes when evaluating a guppy's petness and fishness, respectively.

A third type of change of totality can be observed in Osherson and Smith's(1982, p.306, 3-5) round-ball example :the total set, the set of objects on a block-ball continuum, is replaced with the set of ordinary balls.

The above arguments that the paradox is caused by the three types of change of total set, e.g., extension, spotlighting and replacement of totality, might be, however, insufficient, since we can present a stronger version of striped-apple example.

Let A be the set of all animals. Consider the fuzzy concepts, white and lion, represented by characteristic functions C_{white} and C_{lion}, respectively, defined on A. Now consider a conjunctive concept `white lion'. Many of us know that biological variation sometimes yields white lions.

Let n be a white lion. Then we have

$$C_{white\ lion}(n) > C_{lion}(n).$$

which is contradictory.

Certainly no extension of the original set A takes place in this case, but our explanation in terms of spotlighting of totality remains probable : $C_{white\ lion}(n)$ is evaluated on the set of white lions and $C_{lion}(n)$ on the set of lions. If this is the case, we have a sufficient reason to suspect the paradoxes. What is more, spotlighting of total set inevitably produces a contingent psychological effect. Suppose that there exist on the earth hundred billion animals, million lions, and hundred white lions. We can expect that $C_{lion}(n)$, when evaluated on A, will be very high, since A contains extremely various creatures which are by no means similar to lions, we cannot but assign a large value to $C_{lion}(n)$ even if n is not a typical lion. But if we evaluate $C_{lion}(n)$ on the set of lions, it will have a low value. This kind of context effect on judgment is an established psychological fact (Helson, 1964; Kakizaki, 1974), and is enough to dismiss the paradoxes.

We are now in the position to touch on some possible psychological processes which might produce the paradoxes. For this purpose, it will be useful to list the previous examples together with the new ones.

a) $C_{red\ apple}(x)$
vs. $\mathrm{Min}(C_{red}(x), C_{apple}(x))$

b) $C_{striped\ apple}(x)$
vs. $\mathrm{Min}(C_{striped}(x), C_{apple}(x))$

c) $C_{pet\ fish}(x)$
vs. $\mathrm{Min}(C_{pet}(x), C_{fish}(x))$

d) $C_{white\ lion}(x)$
vs. $\mathrm{Min}(C_{white}(x), C_{lion}(x))$

e) $C_{cubical\ tomato}(x)$
vs. $\mathrm{Min}(C_{cubical}(x), C_{tomato}(x))$

f) $C_{apple\ and\ not\ apple}(X)$
vs. $\mathrm{Min}(C_{apple}(x), C_{not\ apple}(x))$

First of all, a) is not paradoxical at all and b) and c) can be readily explained by either extension or spotlighting. Therefore we deal with d), e) and f) hereafter. Secondly, if lions were commonly white (and our language had such an idiom as "white as lion"), the contradiction would vanish. Similar inference holds for e) and f). Thirdly, in order for d), e), and f) to be paradoxical, the argument of the membership function, say, a white lion, must be a typical white lion. Otherwise the paradox will vanish. Finally, observe that the concept white lion (or cubical tomato) is ambivalent, or, according to Osherson and Smith's terminology, "negatively diagnostic" ; the whiteness impairs lionhood and vice versa. A sharper example may be f), "apple and not apple", which is Osherson and Smith's logically empty concept. To sum up, a typical conjuctive paradox occurs when :1) the conjuctive concept is ambivalent, 2) the argument of the membership function is a typical member of the ambivalent concept, and 3) the argument is not a typical member of a constituent fuzzy subset. There may be two possible views on the typicality of ambivalent concepts. The first is the traditional fuzzy set theory's view : ambivalent concepts are abnormal concepts and thus cannot attain high membership values. The second view is : even if a conjunctive concept is ambivalent, we can evaluate at least relative magnitude of membership values. According to this view, $C_{\text{white lion}}(x)$ is not what directly derived from Min operation, but it is obtained from higher order membership evaluation (HOME). HOME computes the degree that a membership value is larger (smaller) than the other membership values on a spotlighted total set CT. CT is defined, for example, by

$$CT=\{ x \mid C_A(x) \geqq \varepsilon \ \wedge \ x \in T\}$$

where A is a concept,
$0 < \varepsilon < 1$ is a constant,
and T is a total set.

The membership function $C_A(\cdot)$ is a mapping from T to [0,1] and HOME is a order-preserving mapping, defined not on T but on CT, from the set of $C_A(x)$, $x \in CT$ to [0,1] as a function of the distribution of $C_A(x) \geqq \varepsilon$. HOME re-evaluates membership values and represents typicality or representativeness of $x \in$ CT. It is probable that the composite membership function $\text{HOME}(C_A(x))$, which is not comparable with $C_A(x)$, is a cause of the paradox as well as the change of total set. Perhaps HOME is a generalization of Zadeh's normalization (Zadeh, 1982) and is applicable to ordinary conjunctive concepts, but the point is that our HOME hypothesis is explicitly utilizing the idea of spotlighted total set and the spotlighting, in itself, is sufficient reason to fasify Osherson and Smith's paradox from the formal set-theoretic standpoint.

The change of total set is also found in the paradox about truth conditions. Let A be the set of animals. According to a version of fuzzy set theory, the truth condition of such a sentence as

"(1) All grizzly bears are inhabitants of North America",

can be written as

$$\forall x C_{\text{grizzly bear}}(x) \leqq C_{\text{inhabitant of north America}}(X).$$

(2)Let Sam be a squirrel. Then we have

(3) $C_{\text{grizzly bear}}(\text{Sam}) > p$, where p is a some small value.

(4)If Sam is living somewhere very far from North America, say, on Mars, we would have

$C_{\text{inhabitant of north America}}(\text{Sam}) < p$.

(5) This yeilds

$C_{\text{grizzly bear}}(\text{Sam}) > C_{\text{inhabitant of north America}}(\text{Sam})$, which contradicts (1).

The problem lies in (4). In (1) and (3) we never take into account a squirrel living on Mars. Therefore in (3) we evaluate p on total set A, whereas in (4) the domain of discourse we consider is now $A \cup \{\text{Sam}\}$. Thus p in (3) and p in (4) are not comparable, since the total set is apparently changed.

Discussion

The lesson we have learned from Osherson and Smith's paradoxes (now pseud-paradoxes) is that, although a predicate and the set derived from the predicate may be psychologically interchangeable, this is not permitted in axiomatic set thoery (as for set theories, see Wilder (1965)). In naive set theory, a set X is intensionally derived from a predicate Φ:

$$X=\{x \mid \Phi(x)\}.$$

As is well known, this formulation brings forth severe paradoxes (the most famous one is Russell's paradox). To avoid the paradoxes, the axiom of separation :

$$X=\{x \mid \Phi(x) \wedge x \in T\},$$

where T is a total set,
is used instead in axiomatic set theory. Fuzzy set theory is a generalization of the latter type of set theory (but see Furhmann, 1988) and thus T must remain unchanged during set operations. Osherson and Smith's results and the reactions of researchers to them, taken together, seem to indicate that people, including good scientists, have a strong tendency to use not the sets which axiomatic systems prescribe but the sets derived from predicates at hand : we are naive set theorists. It is this tendency that compels us to use $F \cup \{\text{striped apples}\}$ as the total set in the evaluation of a striped-apple's striped appleness, and to use F in the evaluation of a striped apple's appleness. Psychologically this is a very interesting phenomenon and would have something to do with the conjunction fallacy of probability judgment (Tversky and Kahnemann, 1983).

In conclusion we make some remarks on the implications of the present results. 1) Osherson and Smith's criticism for fuzzy set theory is somewhat

misleading in a technical sense and fuzzy set theory is free from the contradictions they presented. 2) This does not necessarily mean, however, that fuzzy set theory remains a powerful tool for studying concepts and categories, especially when it is used extensionally (Cohen and Murphy, 1984). What is demonstrated in this note is that Osherson and Smith misused fuzzy set theory and, surprisingly, no one have noticed this for nearly ten years. Therefore it is an open question whether or not fuzzy set theory is useful in modeling concepts and categories. Studies have suggested that the theory will be inappropriate for noun conjunctions, but probably it is compatible with adjective conjunctions. 3)What is crucial for fuzzy set theory and received little attention is intensional (representational) use of fuzzy set theory ; fuzzy features (Shiina,1988) and fuzzy propositions (Oden and Lopes, 1982 ; Oden, 1984) are interesting research directions and perhaps it is in these directions that fuzzy set theory finds its proper place. 4) Finally, that we are naive set theorists has profound implications for various research domains: fuzzy set theory, probability theory, language theory, and logic are more or less connected with and based upon axiomatic set theory. Some of the controversies in such domains might be clarified by the idea that people are naive set theorists.

References

Cohen, B. and Murphy, G.L. (1984) Models of Concepts. Cognitive Science, 8, 27-58.

Dubois, D.and Prade, H.(1980) Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications. Academic Press.

Fuhrmann, G. (1988) "Prototypes" and "Fuzziness" in the Logic of Concepts. Synthese, 75, 317-347.

Fuhrmann, G. (in press) Note on the Integration of Prototype Theory and Fuzzy Set Theory. Synthese.

Helson,H. (1964) Adaptation-level Theory. Harpar and Row.

Jones, G.V. (1982) Stacks Are Not Fuzzy Sets:An Ordinal Basis for Prototype Theory of Concepts. Cognition, 12, 281-290.

Kakizaki,S (1974) 柿崎祐一 知覚判断 培風館

Lakoff, G. (1987) Women,Fire,and Dangerous Things. University of Chicago Press.

Oden, G.C. and Lopes, L.L. (1982) On the Internal Structure of Fuzzy Subjective Categories. In Yager, R.R.,(Ed.), Fuzzy Set and Possibility Theory. Macmillan.

Oden, G.C. (1984) Integration of Fuzzy Linguistic Information in Language Comprehension. Fuzzy set and systems, 14, 29-41.

Osherson, D.N. and Smith, E.E. (1981) On the Adequacy of Prototype Theory as a Theory of Concepts. Cognition, 9, 35-58.

Osherson, D.N. and Smith, E.E. (1982) Gradedness and Conceptual Combination. Cognition, 12, 299-318.

Smithson, M. (1987) Fuzzy set Analysis for Behavioral and Social Sciences. Springer-Verlag.

Smithson, M. (1989) Ignorance and Uncertainty. Springer-Verlag.

Shiina, K. (1988) A Fuzzy-Set-Theoretic Feature Matching Model and its Application to Asymmetric Similarity Data Analysis. Japanese Psychological Research, 30, 95-104.

Shiina,K (1989) Osherson & Smith のパラドックス 心理学評論,32,370-386.

Tversky, A and Kahnemann, D. (1983) Extentional Versus Intuitive Reasoning: Conjunction Fallacy in Probability Judgement, Psychological Review,90, 293-315.

Wilder, R.L. (1965) Intoroduction to the Foundations of Mathematics. Second edition. John Wiley & Sons.

Zadeh, L.A. (1965) Fuzzy sets. Information and Control, 8, 338-353.

Zadeh, L.A. (1982) A Note on Prototype Theory and Fuzzy Sets. Cognition, 12, 291-297.

FA4-1

下水ポンプ所へのファジィ制御適用

APPLICATION OF FUZZY CONTROL TO WASTE WATER PUMPING STATION

＊ 村瀬雄一郎　　＊＊ 臼井正和　　＊＊＊ 伊藤　修
Yuichirou MURASE　　Masakazu USUI　and　Osamu ITOH
＊ 東京都下水道局　　Sewage Bureau , Tokyo Metropolitan Government
＊＊ 富士電機㈱水処理技術第２部　　Water Treatment Department No.2 , Fuji Electric Co.,Ltd.
＊＊＊ 富士電機㈱第一システム開発部　　Systems Development Department No.1 , Fuji Electric Co.,Ltd.

Abstract : This paper describes an application of fuzzy control to pumps and gates of combined sewer pumping station and its results. Yushima pumping station in Tokyo is operated by skilled operator's judgement because of existing of rapid inflow change by rainfall. For the purpose of automatic control, we have developed a fuzzy adaptive controllor and applied to this station. After describing the outline of this control system and its simulation study, we show its effectiveness of cooperation control of pumps and gates.

1．はじめに

日本の下水道事業は全国レベルでは諸外国に比べ大きく立ち遅れているが、大都市では普及が既成しつつあり、「建設の時代」から「管理維持の時代」に入ったと言われている。しかし、都市化の進行による雨水流出量の増大と急激な流出、公共水域の水質保全のための合流式下水道の分流化など、下水道に求められるニーズは、より多様化、高度化している。

このような状況の中で、下水道普及率が９０％近い東京都においても、上記の問題とともに下水道施設の普及拡大に対応するため、単純作業、夜間勤務などからの解放や作業環境の改善が強く求められている。そこで、東京都では施設の運用と維持管理の質的向上、効率化のために、下水道管渠に光ファイバーケーブルを布設し、子ポンプ所を無人遠方監視制御化し、親ポンプ所で管理する総合管理、集中監視システムを構築する構想を立てた。この構想の第一ステップとして、湯島ポンプ所を後楽ポンプ所より遠隔監視制御化し、作業環境の改善を図った。それを実現するために、湯島ポンプ所のポンプと阻水扉の制御にファジィ制御を適用し、自動化したのでその内容を報告する。

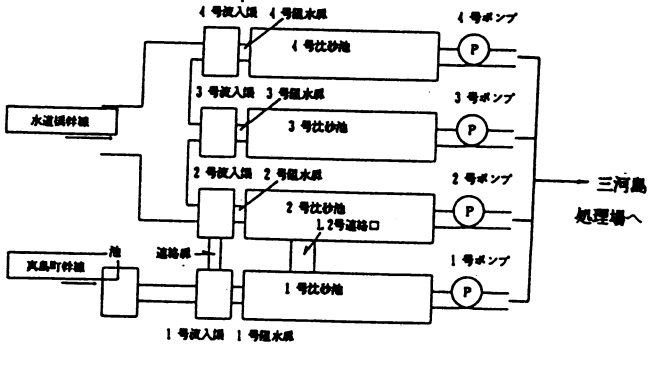


図１　湯島ポンプ所の構造

2．ポンプ所の概要

湯島ポンプ所は建物全体が地下にあり、汚水と雨水が一緒に流入する合流式のポンプ所である。その構造を図１に示す三河島処理区内の水道橋幹線と真島町幹線から流入する汚水および雨水を３台（４台中１台は予備）のポンプで揚水し、三河島処理場へ送水するのがその役割である。その計画揚水量は晴天時で１４３，６００㎥／日であるが、不浸透域の増大、人口の増加などにより、近年揚水量が増大している。そのため、雨天時など流入量が多い時には、阻水扉や連絡扉を操作し、ポンプ所への流入量を抑える構造となっている。

3．従来の制御方式

ポンプ所では、ポンプの運転はポンプ井水位による台数制御が多く使用されている。簡単な制御であるが、プロセスの動的な変化をとらえられないため、次のような問題点がある。

① ポンプの起動・停止に時間を要し、ポンプ井の貯留容量が少ないと、急激な流入量変化への対応が難しい。

② 流入量に応じた柔軟な運転ができず、ポンプの起動・停止頻度が多くなる。

③ ポンプと阻水扉の協調が難しい。

湯島ポンプ所においても、計画揚水量を大幅に越える流入量があり、流入２幹線の流入状況、管渠条件の違いなどから、阻水扉や汚水ポンプの自動運転が難しく、熟練者が絶えず監視し、状況に応じて介入する操作が必要であった。

その操作の目的を次に示す。

晴天時：阻水扉と連絡扉を全開とし、ポンプの回転数制御でポンプ井水位を目標値に維持。

雨天時：ポンプをなるべく１００％で運転しつつ、阻水扉の開度制御でポンプ井水位の目標値を維持。そのとき真島町幹線からの流入水は水道橋幹線の流入水より優先。

そのため、次のような考え方で運用をしていた。

① 晴天時と雨天時ではポンプ井水位目標値を変える。

晴天時はポンプの切替頻度を抑え、かつ効率良い制御を行い、雨天時は安全かつ確実な制御を行う。そのため晴天時ではポンプ井水位を高水位に保ち、揚水効率を上げるが、雨天時には浸水しないように、低水位に保った運転を行う。しかも、これらの目標水位は流入する汚水（雨水）量で異なり、その切替は連続性を保つ必要がある。

② 阻水扉の非線形応答を考慮した制御が必要である。

雨天時は阻水扉制御を行い、ポンプ能力を越えないように、流入量を調節する。阻水扉開度と流入量が比例しないため、阻水扉開度制御に非線形特性を持たせる必要がある。

③ 阻水扉、連絡扉、ポンプ制御は協調させ、干渉を防ぐ必要がある。

真島町幹線からの流入水は1号ポンプで揚水する。その能力を越える場合は水位を高く維持し、連絡口より、2号沈砂池へ流入させ、2号ポンプで揚水する。雨天時は水道橋幹線水位が真島町幹線水位より高くなるため、連絡扉を操作し、真島町幹線側への流入を抑える必要がある。更に、2号ポンプ井水位を目標値に維持するために、2号阻水扉の開度制御により、水道橋幹線からの流入を抑える。3号または4号のポンプも阻水扉と協調を取り、その能力を100%維持するように操作する。

④ ポンプ故障時の代替運用が必要である。

ポンプの最大同時運転台数は3台であり、ポンプ故障時は予備ポンプを起動し、揚水量を確保する。

⑤ 可変速ポンプの停止による効率化を図る必要がある。

ポンプの可変速運用は2台まで可能であるが、速度を抑えて1台で十分の場合は1台を停止する。

このように、流入量に応じて、3台のポンプと阻水扉を協調させた操作を行うには、従来のポンプ井水位によるＰＩＤ制御や台数制御手法では自動化が難しく、熟練者の操作をそのまま計算機で実現できるファジィ制御の導入が検討された。

4. ファジィ制御システムの概要

4．1 ファジィ制御の適用

前項の課題を解決するために、次の特長を持つ適応型ファジィ制御方式を開発し、湯島ポンプ所の自動化を実現した。

① 前件部適応型のファジィコントローラの開発により、汚水の流入状況に合わせた目標水位の設定が可能。

② ファジィ制御による非線形制御は実現容易。しかも、少降雨時と大雨時のメンバーシップ関数を設計すれば良く調整が簡単。

③ 互いの運転状況を入力値とする制御規則を設計することにより、干渉を防ぎ、複数の制御を協調させたシステムの構築が容易。

実現手順は次の通りである。

① 適応型ファジィコントローラの開発

② 湯島ポンプ所を対象とした制御シミュレーションによる効果の確認

③ ガイダンス運用による効果、安全性の確認

④ オンライン運用による検証

⑤ 実運用の実施

4．2 適応型ファジィ制御方式

ファジィ適応制御とはプラントのパラメータ変動に適応させて、制御アルゴリズムを変化させる制御手法である。図2にその下水ポンプ所への適用フローを示す。

ポンプ全吐出量と降雨強度より汚水の流入状況（ω）を推論する。ωの値により適応させるパラメータは、ポンプ回転数やポンプ吐出量の変化量を推論するポンプ井水位とその変化勾配に対するメンバーシップ関数のパラメータである。その理由は汚水の流入状況により、危険か危険でないかなどの判断値が異なるからである。

すなわち、少降雨時の汚水ポンプの起動・停止頻度を抑える前件部メンバーシップ関数と大雨時の安全優先の前件部メンバーシップ関数の二組を用意し、ωで適応させる。その演算例を図3に示す。

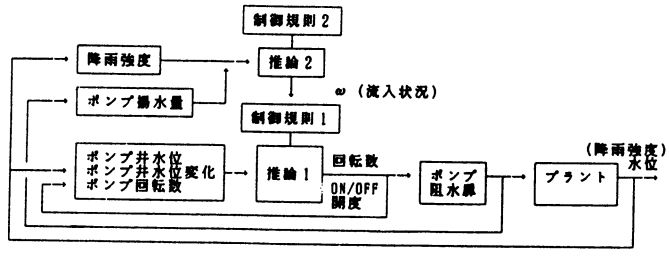


図2 ファジィ適応制御フロー図

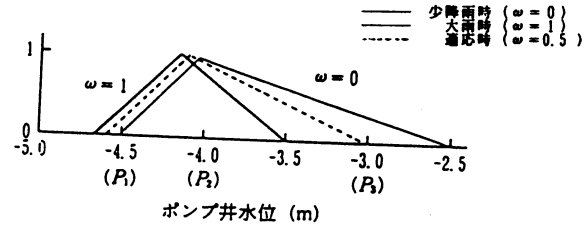


図3 メンバーシップ関数の適応

4．3 シミュレーションによる検討

湯島ポンプ所へのファジィ制御を適用するにあたり、その有効性と効果を事前評価するため、シミュレーションによる検討を行った。まず、真島町幹線と水道橋幹線を含む湯島ポンプ所の数学モデルを作成し、実降雨のデータを用いてモデルの有効性を確認した。一方、制御規則は実際に運用に携わっている熟練者の操作ノウハウをベースに作成した。

シミュレーションモデルの有効性を確認した後、ポンプ、阻水扉及び連絡扉をファジィ演算で制御し、その効果の検討を行った。その例を図4に示す。

初期の降雨により、流入幹線の水位が上昇し、今まで1号

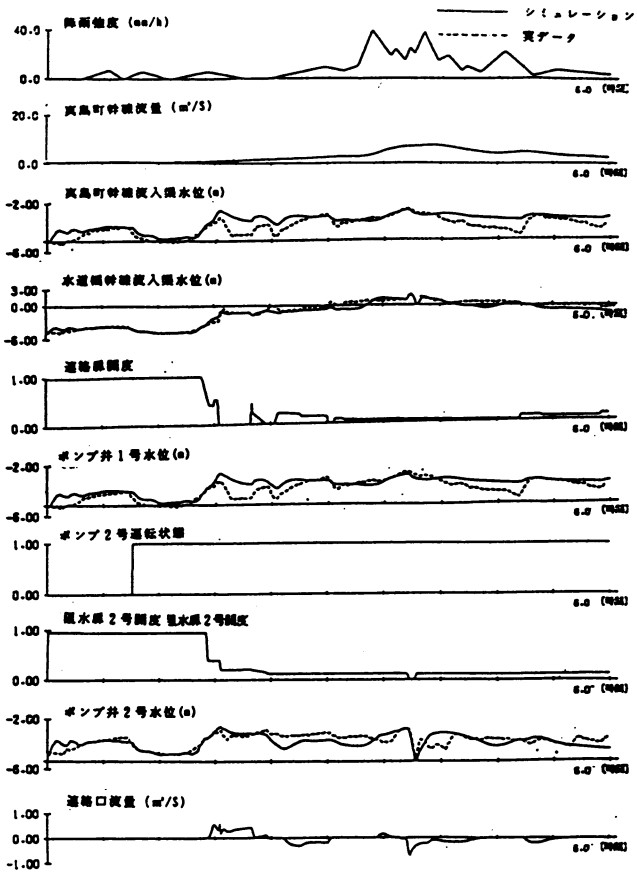


図４　シミュレーション例

ポンプ（定速）と３号ポンプ（可変速）の運転であったのが２号ポンプも起動された。その結果、一時的に各ポンプ井の水位が下降するが流入増大に伴い、連絡扉と２号阻水扉の閉操作が行われ、真島町幹線からの流入汚水を１号と２号ポンプで揚水している。その状況は連絡口の横越流量からも分る。このとき、３号阻水扉も２号阻水扉とほぼ同様に操作されている。その後も制御の良好なことが、各水位の変化が破線（実データ）と実線（シミュレーション結果）を比較することにより分る。このようなシミュレーションにより、種々の降雨状況における制御応答・安全性の検討、万一の機器故障を想定した検討を重ね、ファジィ制御の適用が可能であり、その効果の得られることを確認した。

４．４　システムの構成

湯島ポンプ所を自動化し、かつ後楽ポンプ所より、遠隔監視制御を行うシステムの構成を図５に示す。後楽ポンプ所には監視制御用の計算機を設置し、システム全体を管理している。ファジィ制御は湯島ポンプ所に設置された専用の計算機で実行する。ポンプ、阻水扉の制御はバックアップ機能を有する分散制御システムを経由して行うと共に、必要なプロセス情報の収集を行う。又、ファジィ制御専用計算機にはグラフィックＣＲＴ端末とコンソールＣＲＴが接続され、制御規則やメンバーシップ関数の設定、修正、推論内容の表示を行う。ファジィ制御の情報は他のプラント情報と共に、光ファイバーケーブルで後楽ポンプ所に伝送され、ＣＲＴ端末による監視制御が可能となっている。

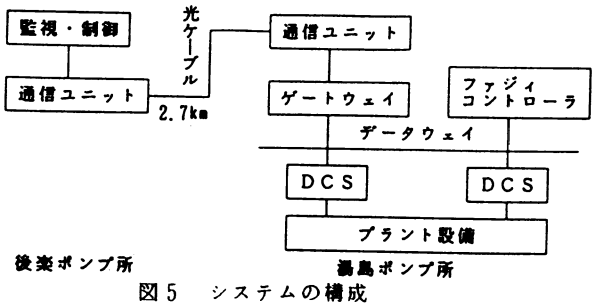


図５　システムの構成

４．５　ファジィコントローラの機能

湯島ポンプ所のファジィ制御の機能を図６に示す。降雨強度とポンプ総揚水量の情報から汚水流入状況を推論するサブコントローラが上位に位置する。その下位に、ポンプ井水位やその変化、ポンプ回転数、幹線水位などからポンプの起動停止、ポンプ回転数を推論するサブコントローラおよび阻水扉、連絡扉の開度を推論するサブコントローラがある。前者は入力数２、出力数１、制御規則数２５であり、後者は入力数６４、出力数１７、制御規則数５４６である。ただし、同一情報でもメンバーシップ関数を別に定義する場合は異なる入力とし、出力も９操作量に対し、運転状況により推論値を切り替えて使用している。これらのファジィコントローラは１分間隔でファジィ推論を行い、操作値を出力する。そのファジィ推論方法はMAX PRODUCT 演算で非ファジィ化は重心演算を使用している。これにより、図７に示すような複数操作の協調を可能としている。

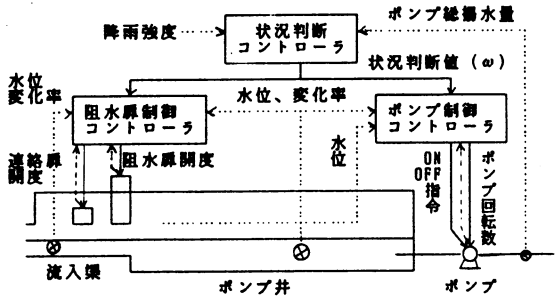


図６　ファジィコントローラの機能

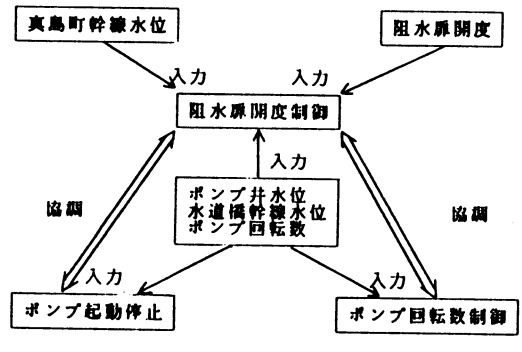


図７　制御の協調性

5．運用状況

本ファジィ制御は１９８９年９月より実運用に入り、現在順調に稼働している。写１にそのマンマシンシステムを示す。実運用に入るために、まず、次の手順で制御規則、メンバーシップ関数の調整を行った。

① ガイダンス運用試験

晴天時、雨天時において、オンライン情報に基づくファジィ推論結果を表示し、その値の良否の確認とその値でのマニュアル操作を実施。

② ポンプ故障代替試験の実施

ポンプ故障を想定し、予備ポンプが正常に起動されることを確認。

③オンライン運用試験

晴天時、雨天時において、技術者の立会いのもとにオンライン運用を実施し、正常に動作することを確認。

これらの試験を経て、ファジィ制御による運用の可能なことを確認し、実運用に入った。

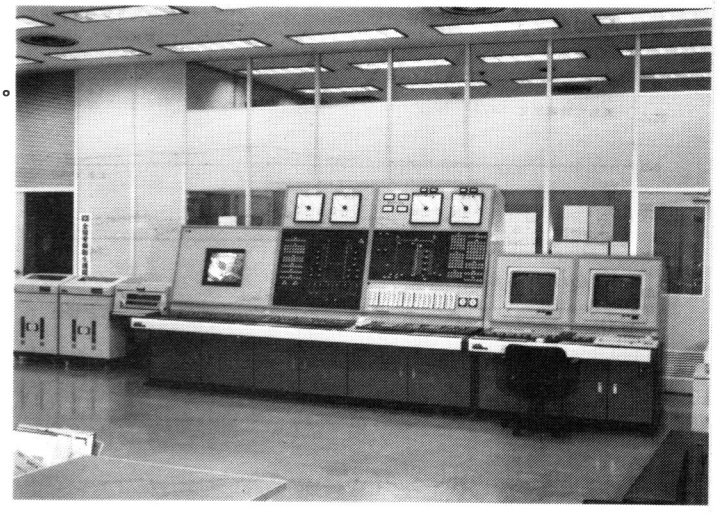
図８に、約１５mm/hの降雨強度に対する１２時間の実運用状況を示す。晴天時は連絡扉、各阻水扉とも全開で２号ポンプと３号ポンプが使用されていた。降雨により、雨天時モードに入り、３号ポンプが停止し、１号ポンプが起動されている。そして、３号阻水扉は全閉となった。流入量の増加とともに２号阻水扉が操作され、２号ポンプ井の水位は良好に制御されている。このとき１号阻水扉は全開であるが連絡扉の制御により、水道橋幹線水位の上昇にもかかわらず安全な水位に維持されていることが分る。なお、４号阻水扉は２号阻水扉と同様の動きをしている。この結果からも、ポンプ、阻水扉および連絡扉が協調して制御されていることがわかる。

このように、下水ポンプ所の運用にファジィ制御を適用し、自動化による運用負荷の軽減、作業環境の改善が図れた。その理由は、多目的で複数の操作を協調させた熟練者の運用方法をそのまま制御規則でモデル化し、計算機で実現させたことにある。しかも、揚水効率の向上による電力量削減、安全優先という相い反する操作を、適応型ファジィコントローラを開発することにより、協調システムとして実用化した。その結果、制御規則やメンバーシップ関数の調整も容易にでき、作業効率が向上した。

6．あとがき

東京都下水道局殿湯島ポンプ所の遠隔監視制御化にあたり、ポンプ、阻水扉の制御にファジィ適応制御手法を導入し、運用の自動化を図った。このシステムの特徴は、複数の操作量を協調させ、システム全体を良好に維持する点にあり、従来の制御手法では実現が難しいプロセスである。このようなプロセスでもファジィ制御で自動化が可能なことを実証したことにより、今後他の多くの分野へ適用できるものと考える。

最後に、本システムの製作において、制御規則の設計や調整試験の実施にあたり、種々御協力いただいた東京都下水道局の関係者の方々に心から感謝いたします。また、適応型ファジィコントローラの開発にあたり、御指導いただいた東京工業大学の菅野教授に深く感謝いたします。



写１　マンマシンシステム

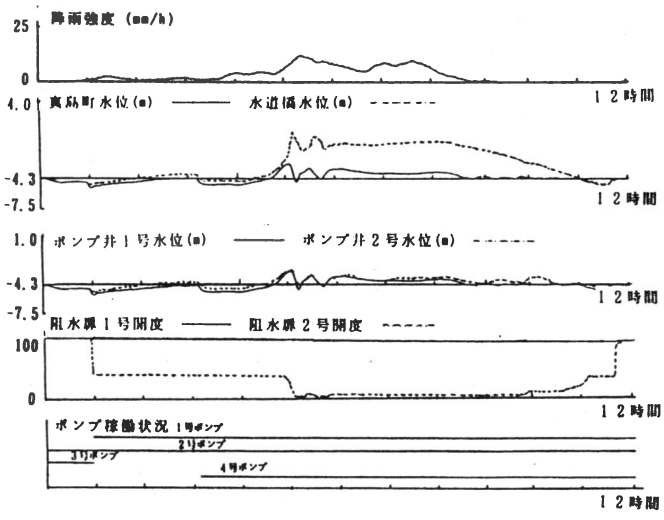


図８　実運用例

参考文献

(1) 伊藤他：雨水ポンプ運転におけるファジィ適応制御、第３回ファジィシステムシンポジウム、pp.121-126(1987)

(2) 適応形ファジィコントローラによる雨水ポンプの協調制御、Trans. IEE of Japan, Vol.109-C, no.5, pp.361-366(1989)

(3) 菅野：ファジィ制御、日刊工業新聞社(1988)

問合先：　〒１９１　東京都日野市富士町１番地
富士電機㈱第一システム開発部第二システム開発課
伊藤　修
TEL　(0425)85-1294
FAX　(0426)86-9528

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FA4-2

ファジィ時制推論によるむだ時間システムの制御
A Control Method for Time Delay System Based on Fuzzy Temporal Reasoning

今崎 直樹
Naoki Imasaki
(株) 東芝, システム・ソフトウェア技術研究所
Systems and Software Engineering Laboratory, TOSHIBA Corporation

Abstract

A fuzzy control method based on fuzzy temporal reasoning is applied to control of time delay systems. Control of time delay systems involves difficulties, because the past states of the systems influence the present states. Fuzzy temporal reasoning represents and examines fuzzy control rules containing ambiguous temporal information. This method is expected to be useful for control of systems with unknown time delay.

1 はじめに

状態にむだ時間を含むシステム (以下、むだ時間システム) とは、ある時刻から先の状態推移に、その時刻以前の一定区間の状態が影響を及ぼすシステムである。むだ時間システムは化学プラントをはじめ、多くの分野で見受けられるが、その性格上、非常に制御しにくい。ただし現在では、むだ時間システムに対する最適レギュレータの設計法が確立されており、理論上は集中定数システムと同様の性質 (ロバスト性など) が得られる。しかしながら、制御対象に関して、むだ時間をはじめとするシステムの動特性が正確に分かることは少ない。最適レギュレータも、そのロバスト性が有効な範囲を越えてしまうと安定性は保証されない。

本稿では、ファジィ制御にファジィ時制推論 [1] を導入し、むだ時間システムの制御を試みる。ファジィ時制推論によれば、「少し前に」などの時間に関するあいまいな情報を扱うことができる。このように過去の状態を考慮した推論を行うファジィ時制推論は、むだ時間システムの制御に向いていると考えられる。

計算機シミュレーションにより、本制御手法の有効性を検討する。

2 むだ時間システム

対象システムとして、つぎのように状態にただ1つのむだ時間 $h(>0)$ を含むものを考える。

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t) + A_1 x(t-h) + Bu(t) \qquad (1)$$

$$(x(0), x(\beta)) = (x_0, \phi(\beta)), -h \le \beta \le 0 \qquad (2)$$

ここで、

$$x(t) \in R^n,\ u(t) \in R^m,\ A_0, A_1 \in R^{n\times n},\ B \in R^{n\times m}$$
$$(x_0, \phi(\beta)) \in R^n \times L^2([-h, 0]; R^n),\ x_0 = \phi(0)$$

であり、システム (1) は安定化可能 [2] であると仮定する。

むだ時間システムに対しては、従来から様々な制御手法が提案されている。その中で、最適レギュレータは集中定数系の場合と同様、大きなゲイン余裕、位相余裕をもつロバストな制御系が構成できるため、理論上好ましい。ある2次形式評価関数を最小化する最適レギュレータの操作量は、つぎのように h 時間前の状態から現在の状態を連続的にフィードバックするものである。

$$u^*(t) = -K_0 x(t) - \int_{-h}^{0} K_1(\beta) x(t+\beta) d\beta \qquad (3)$$

ここで $K_0 \in R^{m\times n}, K_1(\cdot) \in L^2([-h, 0]; R^{m\times n})$ は、ある連立偏微分リカッチ方程式の唯一非負解に基づくフィードバックゲインである。

3 ファジィ時制推論に基づくファジィ制御

一般に、ファジィ制御は「専門家の制御知識を表現できる」といわれ、熟練者にまかせていた制御が自動化できると期待されている。実際、種々の制御対象に適用され稼働している。しかし、人間の制御知識には必ずといっていいほど時間の概念が含まれる。従来のファジィ知識表現では時間の概念を表現することがむずかしく、したがって専門家のもつ制御知識を十分に表現することは困難である。

ファジィ時制推論 [1] は、従来のファジィ知識表現を時間の概念を扱えるように拡張したものである。「約10分前に」とか「しばらく前からずっと」といった時間に関す

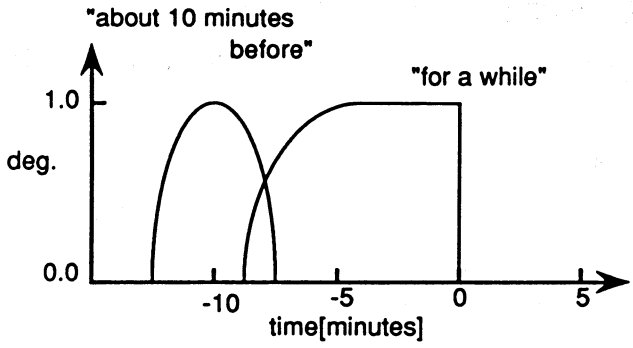


図 1: ファジィ時制子の例

るあいまいな情報を、図1に示すようなメンバーシップ関数で表現し、これをファジィ時制子と呼ぶ。これにより、「少し前にバルブ1を開けたなら、バルブ2を開けろ」のように、より柔軟かつ実際的に制御知識を表現できる。

ファジィ時制推論に基づくファジィ制御における制御ルールは、ファジィ時制子 $\tau_i, (i = 1, \cdots, n)$ を用いて次のように表現できる。

$$If(\tau_1(x_1 = P_1))\&(\tau_2(x_2 = P_2))\& \cdots \\ \cdots\&(\tau_n(x_n = P_n)),\ then\ (u = Q) \qquad (4)$$

ただし、x_i および u は、それぞれ入力および出力変数を表す。P_i, Q はファジィ値である。いま、$x_i(t)$ を時刻 t における入力 x_i とする。あるルール $R_k, (k = 1, \cdots, K)$ において、現在時刻 t_c における操作量 $u_{R_k}(t_c)$ のメンバーシップ関数 $f_{R_k}(u)$ は、つぎのように決定される。

$$f_{R_k}(u_{R_k}(t_c)) \\ = (\bigwedge_{i=1,n} h(f_{\tau P_i}(t, x_i(t)))) \bigwedge f_Q(u) \qquad (5)$$

ここで、$f_{\tau P}(t, x)$ は、

$$f_{\tau P}(t, x) = f_\tau(t) \bigwedge f_P(x) \qquad (6)$$

で定義されるファジィ関係である。また、$h(\cdot)$ はファジィ関係 $f_{\tau P_i}$ に関するオペレータである。$h(\cdot)$ は、ファジィ時制子 τ_i の性質によって2種類定義される。第1に、状態の継続を評価するもの、第2に、状態の発生を評価するものである。それぞれ、つぎのように表される。

$$= \frac{h(f_{\tau P}(t, x(t)))}{\int_{t \le t_c} f_{\tau P}(t, x(t))dt \Big/ \int_{t \le t_c} f_\tau(t)dt} \qquad (7)$$

: for system state continuation

$$= \sup_{t \le t_c} f_{\tau P}(t, x(t)) \qquad (8)$$

: for system state occurrence

n個のルールをまとめた後の、出力 $u(t_c)$ についてのメンバーシップ関数 $g(u(t_c))$ は、つぎのようになる。

$$g(u(t_c)) = \bigvee_{k=1,K} f_{R_k}(u_{R_k}(t_c)) \qquad (9)$$

操作量 $u^*(t_c)$ は、式(10)のように重心法により決定する。

$$u^*(t_c) = \frac{\int u(t_c) \cdot g(u(t_c))du}{\int g(u(t_c))du} \qquad (10)$$

4 制御ルール設計の方針

(1)式のように過去の状態が現在の状態に直接関与するシステムを制御する場合、ファジィ時制推論を用いることが考えられる。ファジィ時制推論は、過去のあいまいな時間における、あいまいな状態を評価する。むだ時間 h が正確に分からないとか、変動するとかいう場合には特に効果的であることが期待される。

むだ時間システムの制御を行う際、以下のような方針にしたがってコントローラを設計する。

- 現在の状態だけではなく、過去の状態を評価する。
- むだ時間をあいまいに取り扱うことで、むだ時間の変動に強くする。

評価する項目としては、つぎの3つを選んだ。

- 現在の状態 $x(t)$
- むだ時間前の状態 $x(t-h)$ (ただし、h はあいまいに扱う)
- $-h \le t \le 0$ における状態推移の傾向

これは(3)式で示したように、最適レギュレータが h 時間前から現在までの状態を連続的にフィードバックしていることを考慮した結果である。

2つのファジィ時制子 η, τ を考え、

$\eta \cdots$ h 時間前において

$\tau \cdots$ h 時間前からずっと

のような情報を与える。ファジィ制御ルール $R_k, (k = 1, \cdots, K)$ は、つぎのような形式となる。

$$R_k: If\ (x = P_{k1})\&(\eta(x = P_{k2})) \\ \&(\tau(x = P_{k3})), then\ u = Q_k \qquad (11)$$

ここで P_{1k}, P_{2k}, P_{3k} および Q_k はファジィ数である。(11)のルールを用いることにより、システム(1)の現在の状態と共に、むだ時間前の状態およびむだ時間前からの状態推移を評価できる。例えば、「もしシステムの状態が、現在は微小、むだ時間前にはやや大きく、しばらくはやや小さかった場合、(むだ時間の影響を受けるので)操作量を負でやや大きくせよ」のようなルールが考えられる。

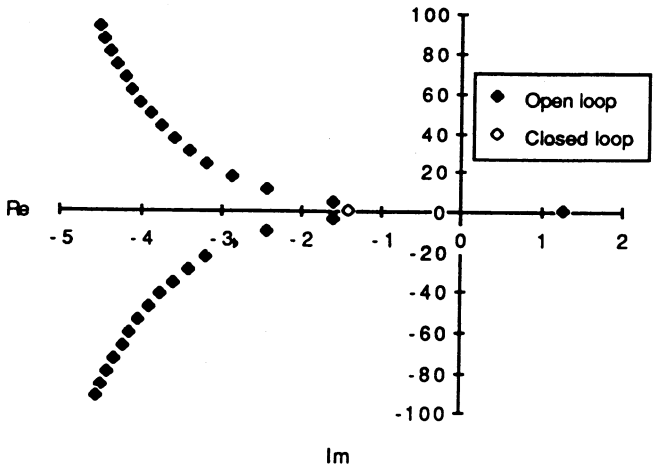


図 2: システムの極配置

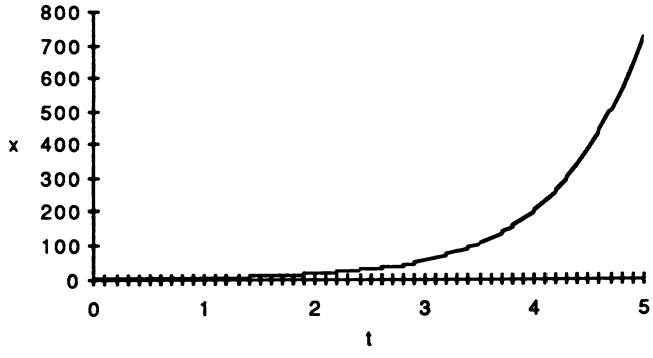


図 3: 開ループ系の時間応答

5 シミュレーション

制御対象の例として、つぎのような簡単なシステムを考える。

$$\dot{x}(t) = x(t) + x(t-h) + u(t) \tag{12}$$

$$x(t) \in R, u(t) \in R, (x_0, \phi(\beta)) = (1,1), -1 \leq \beta \leq 0$$

むだ時間は $h = 1$ とする。このシステムは図 2(黒プロット) に示すように、複素右半平面に極をもつ不安定なシステムであるが、安定化可能である。システム (12) の自由応答は図 3のようになる。

システム (12) に対して、$Q = 1, R = 1$ として最適レギュレータを構成した。その場合の閉ループ系の極配置を図 2(白プロット) に、応答を図 4に示す。良好な制御応答を示している。

つぎにファジィ制御を考える。ファジィ制御ルールは図 5のように調整した。このときの応答を図 6に示す。最適レギュレータの場合と同様、おおむね良好な制御応答を示す。

むだ時間が変動した場合を考える。むだ時間を $h = 1.2, 2.0$ に設定したとき、ファジィ制御では図 7に示すように、むだ時間のずれが生じた場合にも良好な応答が得られ

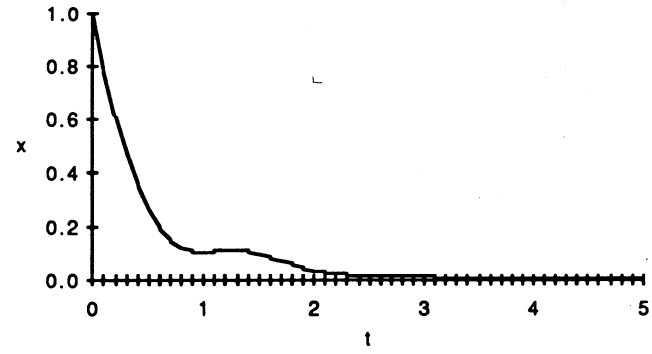
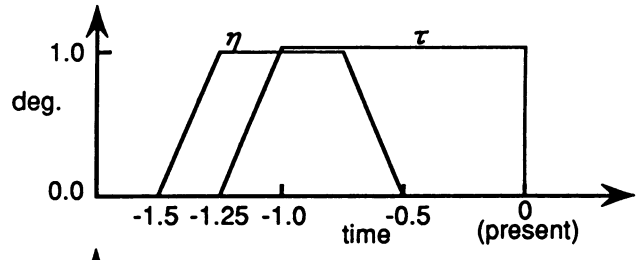
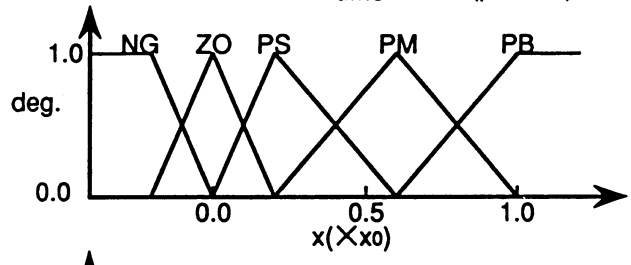
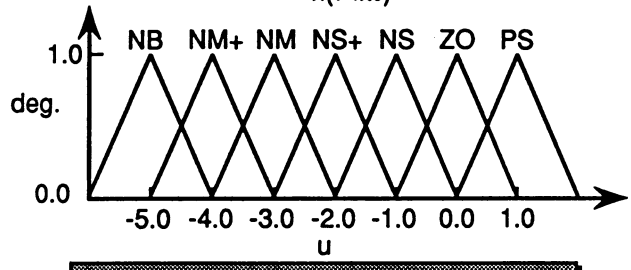


図 4: LQ 閉ループ系の時間応答







Rules
R0 { (x = NG) --> (u = PS) }
R1 { (x = ZO) (# τ (x = ZO)) --> (u = ZO) }
R2 { (x = ZO) (# τ (x = NG)) --> (u = PS) }
.....
.....
Rn { (x = PB) (# η (x = PB)) --> (u = NB) }

('#' represents *state continuation*)

図 5: ファジィ制御ルール

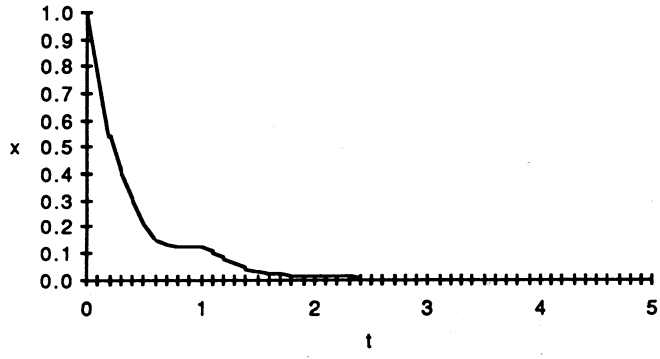


図 6: ファジィ制御による時間応答

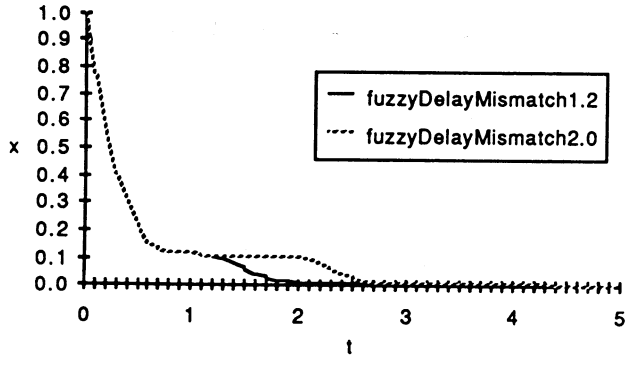


図 7: むだ時間にずれが生じた場合のファジィ制御結果

た。最適レギュレータの場合には図8に示すように、システム自体は不安定にはならないものの、応答に振動が生じる。

これらのシミュレーションにより、ファジィ時制推論に基づくファジィ制御がむだ時間システムの制御に有効であることが分かる。ただ、ファジィ制御では定常状態において微小な振動が残ることが多い。フィードバックに積分項が入る最適レギュレータではこのような不具合は生じない。また、時間に関する評価項目を入れた結果、ルールの設計・調整は自由度の高い複雑なものになった。これらの

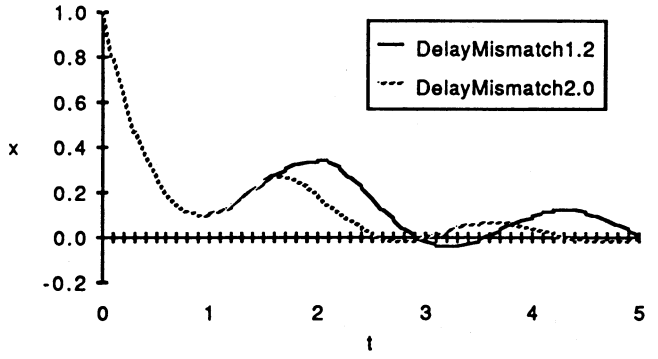


図 8: むだ時間にずれが生じた場合の LQ 閉ループ系の時間応答

問題点に対する解決策を考える必要がある。

6 おわりに

本稿では、状態にむだ時間を含むシステムに対してファジィ時制推論に基づくファジィ制御を行うことを提案した。また、簡単な制御対象について数値シミュレーションを行い、良好な結果を得た。今回は、第1ステップとして対象システムのむだ時間がただ1つのものを考えたが、ファジィ時制制御が効果を発揮するのは、むだ時間が複雑に関与する分布系だと思われる。今後、これについて考えてみたい。

最後になりましたが、本制御手法の検証にあたっては、早稲田大学理工学部電気工学科内田研究室で開発した、むだ時間システムの解析ツールを利用させて頂きました。内田健康教授をはじめ研究室の皆さんに深く感謝致します。

参考文献

[1] T.Endo, M.Ishii and K.Haruki: "Fuzzy Control Shell Based on Fuzzy Temporal Reasoning" *Proceedings of the 1989 IFSA Congress*, 220/223, 1989.

[2] K.P.M.Bhat and H.N.Koivo: "Modal Characterizations of Controllability and Observability in Time Delay Systems" *IEEE Trans. on Autom. Control*, AC-21, 292/293, 1976.

問い合わせ先
〒210 川崎市幸区柳町 70 番地
(株) 東芝 システム・ソフトウェア技術研究所 研究第二部
今崎 直樹
PHONE (044)548-5637
FAX (044)533-3593
E-mail saki@ssel.toshiba.co.jp

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FA4-3

地震力を受けるシェル構造へのファジィ制御の応用

An Application of the Fuzzy Control to a Shell Structure Subjected to Seismic Forces

新宮　清志*，川西　利昌*，春本　光紀**，船本　大蔵***

Kiyoshi SHINGU, Toshimasa KAWANISHI, Mitunori HARUMOTO, Daizo FUNAMOTO

*日本大学　理工学部　**旭化成　***日本大学大学院　理工学研究科

* Nihon University ** Asahi Chemical Industry *** Nihon Univ. Graduate School

Abstract: In the past, research has developed effective vibration control in low buildings, but as yet there has been no such development in the design of shell structures. This paper represents the first effort to create such a design in shell structures, and the authors believe to establish its possibility. The finite element method and the step-by-step integration method was used to analyze the conical shell subjected to seismic forces. The analysis adopted here was the mode control method. Further, "fuzzy control" was applied to the damping of the shell, and resulting displacements and stresses were reduced.

1．序論

最近、建築構造物の制震・免震についての研究が盛んであるが、シェル構造物の制御に関する研究は皆無であった。　その理由としては、1）シェル構造物のような連続体の制御については、制御系の作成にあたってシステムの同定が困難であり、もし正確にシステムが記述できたとしても、パラメータの数が膨大となり、使用困難なモデルになってしまう、2）また、パラメータの数が少ない見通しのよい近似モデルによって制御系を設計しようとしても、シェル構造物のような分布質量系構造物では、モデル作成の段階から工学的にも無視できないほどの誤差が生じるため、意義のある制御を行うことが困難であるためである。しかし、シェル構造物のような連続体であっても、制御系作成にあたって数式でシステムを記述する必要のないファジィ制御を用いるならば、構造物の定性的な状態が既知である場合、高精度な制御が期待できる。　また、数式をよりどころにしていた従来の制御では無視せざるを得なかった施工上のばらつきや不確定な外乱も、そのまま受け入れて制御することができるため、比較的不確定な要素の多い建築構造物の制御において、ロバスト安定性の高い制御系を設計することが可能である。

一般にシェルでは、絶対変位を抑制すると地盤とシェルとの接合部付近に過大な応力が発生するため、応力を軽減させるためには、地盤とシェルとの相対変位を抑制することが重要となる。また、粘性ダンパーの設計においては、エネルギー吸収量と発熱量のバランスが重要となるが、いたずらに大きなダンパーを取り付けるわけにはいかず、建築物のような重量級の構造物では、減衰係数としてはζ=0.2程度が限界であると考えられる。そこで、地盤の運動と構造物の応答の関係に着目してみると、相対変位が小さくなるように系が運動している場合には、運動エネルギーを熱エネルギーに変換する必要はなく、そのような運動状態では、一時的に減衰を小さくすることができるため、ダンパーの容量が同じであっても最大減衰率を大きく設定することができる。

そこで本論文では、円錐形シェルに可変ダンパーが付加された構造物が地震力をうける場合を想定し、ファジィ制御により減衰を調節することによって、制御しない場合より小さな減衰率、すなわち容量の小さなダンパーで構造部材の応力を軽減できることを数値シミュレーションによって示すものである。

2．シェルの振動方程式

2.1　変位関数

円錐形シェルのような軸対称構造物において、軸対称荷重を受ける場合については、中央面上の任意点の変位は、接線方向変位 u と法線方向変位 w の二つの成分で表すことができる。　変位関数としては、要素の母線方向の長さ s の多項式で表されるものとする。回転角 X_θ は、w を s で一階微分することによって求められる。

$$\left.\begin{aligned} u &= \alpha_1 + \alpha_2 s \\ w &= \alpha_3 + \alpha_4 s + \alpha_5 s^2 + \alpha_6 s^3 \\ X_\theta &= dw/ds = \alpha_4 + 2\alpha_5 s + 3\alpha_6 s^2 \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

$$\{f\} = [u\ w]^T = [N]\ \{\delta\}_e \quad (1)'$$

未定係数 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ は、要素両端の端末条件より求めることができる。

2.2　歪－変位の関係式

歪と変位の関係式は 次のように表すことができる。

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_s \\ \varepsilon_\theta \\ \kappa_s \\ \kappa_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} du/ds \\ (u\ sin\phi + w\ cos\phi)\ /\ r \\ -\ d^2w/ds^2 \\ -\ (sin\phi\ /\ r)\ \cdot\ dw/ds \end{Bmatrix}$$

$$= [B]\ \{\delta\}. \qquad (2)$$

ここで、［Ｂ］は、歪マトリックスという。

2.3 応力－歪の関係式

等方性の回転体シェルにおける応力と歪の関係式は次式で表される。

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} N_s \\ N_\theta \\ M_s \\ M_\theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K & \nu K & 0 & 0 \\ \nu K & K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D & \nu D \\ 0 & 0 & \nu D & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_s \\ \varepsilon_\theta \\ \kappa_s \\ \kappa_\theta \end{Bmatrix}$$

$$= [D]\ \{\varepsilon\} \qquad (3)$$

ここで、$K = Et/(1-\nu^2)$　　$D = Et^3/12(1-\nu^2)$

E：ヤング係数　　ν：ポアソン比　　t：シェル厚

2.4 運動方程式

円錐形シェルの構造全体の運動方程式は次式で表される。

$$[M]\ \{\ddot{\delta}\} + [C]\ \{\dot{\delta}\} + [K]\ \{\delta\} = \{F\} \qquad (4)$$

ここで、[M],[C],[K]は構造全体の質量、減衰、剛性行列、$\{\ddot{\delta}\}$,$\{\dot{\delta}\}$,$\{\delta\}$ は加速度、速度、変位ベクトル、{F}は外力ベクトルである。

減衰行列は質量比例を採用し、次式で表されるものとする。

$$[C] = 2\zeta\omega\ [M] \qquad (5)$$

ζ：減衰係数　　ω：角振動数

任意の地震力が作用する場合の動的応答解析には、ニューマークβ法を用いるものとし、求まった応答変位に時間に関する差分法を適用し、速度・加速度を求める。

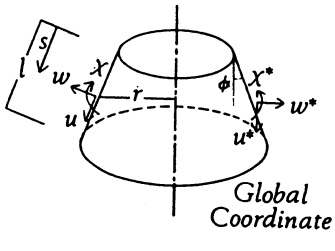


図１　変位成分

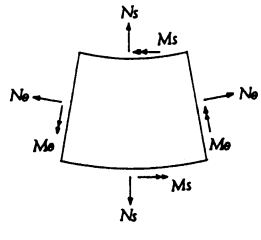


図２　応力成分

３．制御理論

3.1 ファジィ推論法

本論文では、ファジィ推論法としてmin-max重心法を採用した。これは前件部、後件部ともに、言葉に対応させることができ、定性的に分かりやすく、目的に応じて制御規則の改良を行うことも容易であるためである。また、メンバシップ関数として式 (6) で表される、図３～図４のような三角型を採用する。

$$A(x) = \frac{1}{a}\ (-\ |\ x-b\ |\ +\ a) \sim 0\ ,\ a > 0 \qquad (6)$$

式（6）におけるパラメータａは、メンバシップ関数の左右の広がりを表しており、パラメータｂはメンバシップ関数の値が１となるようなｘの値である。

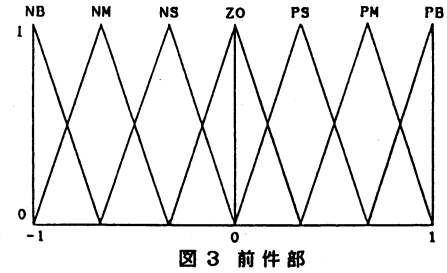


図３ 前件部

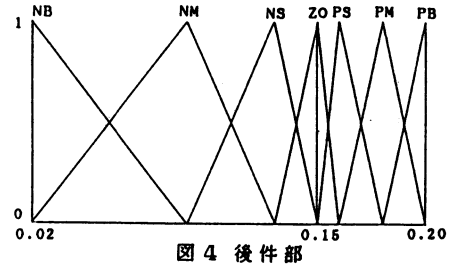


図４ 後件部

3.2 制御方法

本論文では、円錐形シェルの固有振動解析を行い、応答が極大になる１次～３次の各モード腹部分の６節点について、制御を行うことにする。

時刻ｎにおける地盤の変位をU_nとし、時刻n+1 における地盤の変位は次式によって求まるものとする。

$$U_{n+1} = U_n + (U_n - U_{n-1})\ (n \geq 2) \qquad (7)$$

式(7)によって予測した地盤の変位 U_{n+1} と、時刻ｎにおけるシェルの任意の部分の応答変位 R_n との偏差を E_nとすると、

$$E_n = U_{n+1} - R_n \qquad (8)$$

と表すことができる。　また、１サンプリング時間におけるR_nの変化分をΔE_n とすると、

$$\Delta E_n = R_{n-1} - R_n \qquad (9)$$

となる。

まず、時刻ｎにおける地盤の変位 U_n とシェルの節点の応答変位 R_n を観測する。そして、式(7) (8)

(9) の３個の式によって E_n と ΔE_n を求める。
次に、E_n と ΔE_n を前件部変数とし、後件部変数としては時刻 n+1 における減衰係数 ζ_{n-1} を考えファジィ推論を行う。　このような操作を節点ごとに行うことによって、減衰を逐次定めていくことができる。

$\Delta E/\Delta t$ が速度であることから、サンプリング時間間隔 Δt が本論文のように0.02秒と一定の場合は、ΔE_n は速度に比例した量となる。したがって、前件部変数として E_n と ΔE_n を採用することの物理的意味は、構造部材と地盤の相対変位および構造部材の運動速度に着目して制御するということである。

3.3　ファジィ制御器の設計

ファジィ制御器の設計は、構造物の応答のいろいろな状態を想定し、どのような制御をすればよいか定めればよい。　本論文においては、制御規則は次のようにして定める。

構造物にステップ変位が印加された場合を考えると、応答変位は図５のようになる。　定常状態から地盤がＵだけ変位した瞬間のR_1付近では、部材の質量による慣性のため応答に時間的遅れが生じるため、偏差 E は正で非常に大きく ΔE はゼロに近い。　この状態では、減衰 ζ を非常に小さくすれば、部材にたくわえられたポテンシャルエネルギーの解放をたすける効果があり、地盤との追従性がよくなる。　したがって、状態 R_1 での制御規則は次のようになる。

状態 R_1: if E = PB and ΔE = ZO then C = NB

次に R_2 の付近では、E は正で中くらいであり、ΔE は負で大きい。　E と ΔE の関係から、部材は地盤との相対変位を少なくする方向に運動していることがわかるので、運動を妨げないように減衰 ζ を非常に小さくすればよい。　よってR_2付近での制御規則は次のようになる。

状態 R_2: if E = PM and ΔE = NB then C = NB

以上のような考え方にもとずいて他の制御規則も作成し、表にまとめると次のようになる。　縦の列は E の値、横の行は ΔE の値、表の中は ζ の値を示している。

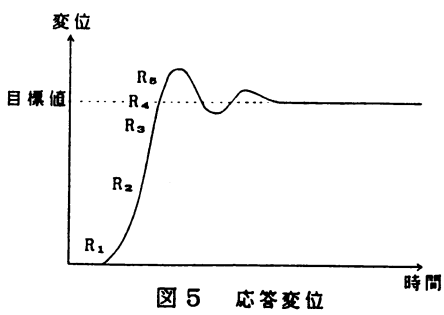


図５　応答変位

表１　制御規則表

E \ ΔE	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	NB	NB	NB	NB
NM	PB	PB	PB	NM	NB	NB	NB
NS	PB	PM	PS	NS	ZO	PS	PM
ZO	PB	PM	PS	ZO	PS	PM	PB
PS	PM	PS	ZO	NS	PS	PM	PB
PM	NB	NB	NB	NM	PB	PB	PB
PB	NB	NB	NB	NB	PB	PB	PB

表１の49個の制御規則をもとにして、ファジィ理論による多重推論を行い減衰係数を逐次定めていく。　このような、部材と地盤との相対変位を小さくする制御を各節点で行うことにより、節点間の相対変位が小さくなり、必然的に応力も小さくなる。

4.　解析結果

4.1　解析モデル

解析にあたり、使用した円錐形シェルは図６に示す通りである。

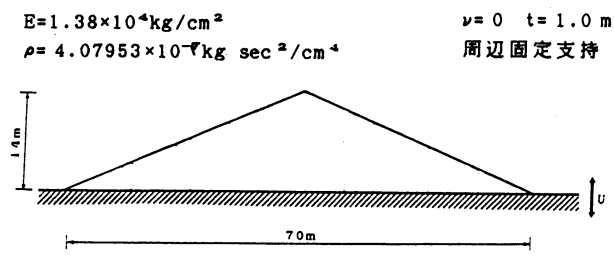


図６　円錐形シェル

4.2　解析結果

図７に示す宮城沖地震の加速度波形を最大２００galになるように拡大して入力した場合の１次モード腹部分の応答変位及び鉛直変位 U･ が最大になるときの応力を図８以下に示す。

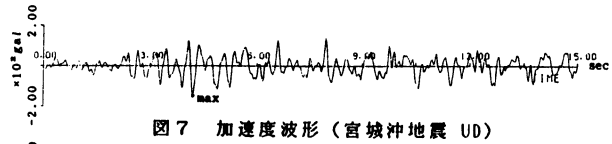


図７　加速度波形（宮城沖地震 UD）

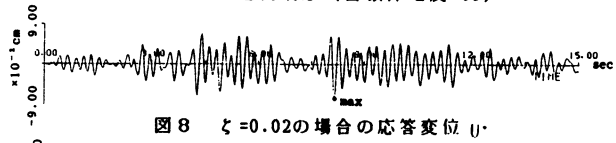


図８　ζ=0.02の場合の応答変位 U･

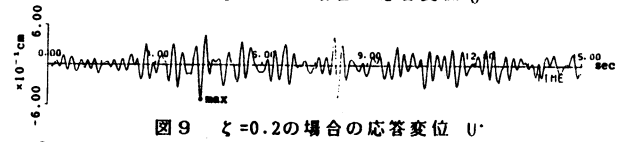


図９　ζ=0.2の場合の応答変位 U･

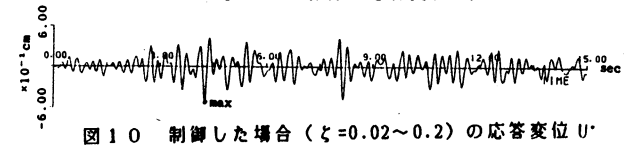


図１０　制御した場合（ζ=0.02～0.2）の応答変位 U･

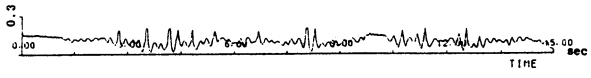


図１１　制御した場合のζの変化（１次モード腹部分）

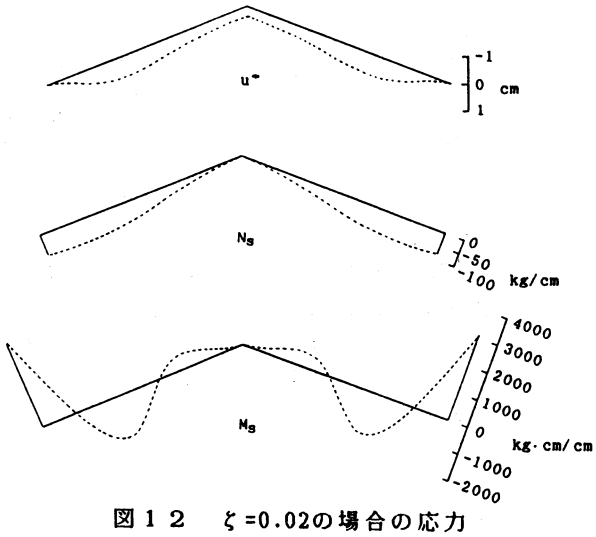


図１２　ζ=0.02の場合の応力

（鉛直変位 U· が最大のとき8.12 sec）

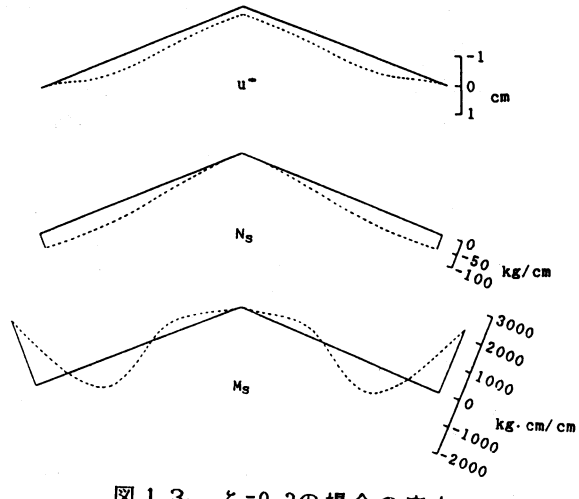


図１３　ζ=0.2の場合の応力

（鉛直変位 U· が最大のとき4.22 sec）

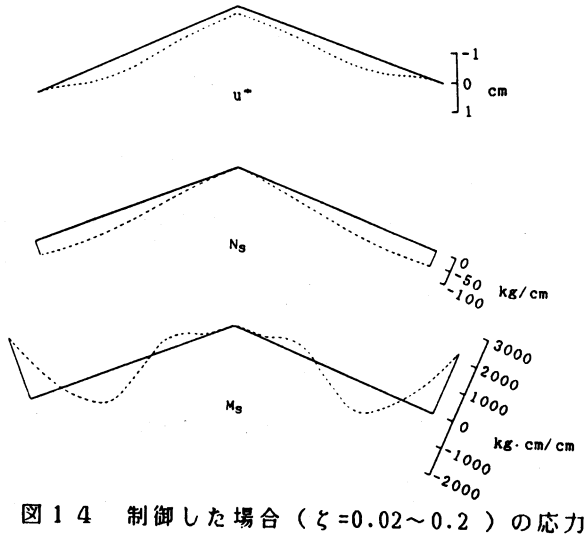


図１４　制御した場合（ζ=0.02～0.2）の応力

（鉛直変位 U· が最大のとき4.22 sec）

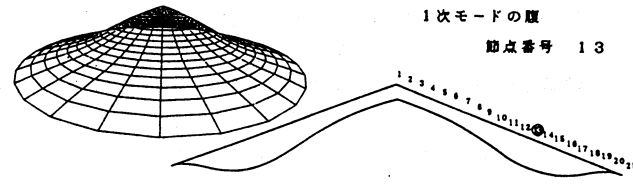


図１５　１次モード（4.78Hz）

５．結論

以上の解析結果より次のような結論が得られた。

１）外部ダンパーを取り付けた場合はζ= 0.2 に固定した場合と減衰を制御した場合ともに構造減衰のみの場合（ζ= 0.02 ）にくらべて、応答変位を７割程度に軽減できる。

２）減衰をζ= 0.2 に固定した場合と、ζ= 0.02 ～0.2まで可変にして制御した場合を比較すると、応答変位・応力ともにほとんど同じであるが、制御した場合は図１１のように減衰率が変化し、平均減衰率としては、ζ= 0.101 程度になるため、オイルダンパーを使用する場合は、ダンパーの容量を約半分にすることができる。

３）粘性ダンパーでは、剛性はゼロと考えられるためダンパーを取り付けても構造減衰のみのときと同じ応答性状を示し、応答変位および応力は節点間で同じ割合を保ったまま小さくなる。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、日本大学精密機械工学科教授・工学博士　伊藤堅先生には、制御について貴重な助言をいただきました。　厚く御礼申し上げます。

参考文献

１）西村敏雄：ベクトルとシェル構造
彰国社，１９７７年１０月

２）西村敏雄，新宮清志：上下動および水平動地震を受ける裾梁付回転体シエルの動的応答に関する研究　日本建築学会論文報告集 第326号
PP47-59 １９８３年４月

３）Kiyoshi Shingu: A STUDY ON DYNAMIC RESPONSES OF ROTATIONAL SHELLS WITH EDGE BEAMS SUBJECTED TO EARTHQUAKES 3rd International Conference on Computing in Civil Eng., Canada, pp357-364, Aug.1988

４）菅野道夫：ファジィ制御，
日刊工業新聞社，１９８８年５月

５）坂和正敏：ファジィ理論の基礎と応用
森北出版，１９８９年１０月

６）大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門
鹿島出版会，１９８３年３月

問い合わせ先：〒274 船橋市習志野台７丁目２４－１
日本大学理工学部海洋建築工学科
新宮清志
TEL　0474-69-5426
FAX　0474-67-9446

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FA4-4

ファジィを用いた時定数適応型モータサーボコントロール

Adaptive Motor Servo Control with FUZZY for Several Time Constants

高木 啓史　　Bigge Franz (独)
Hirohito TAKAGI
トムソン・コンシューマ・エレクトロニクス R&D研究所
THOMSON CONSUMER ELECTRONICS R&D Laboratories in Germany

ABSTRACT

This paper describes a pre-study of adaptive servo control with FUZZY logic. To start the learning curve of FUZZY logic, we experimented with motor servo control. Our final target is the development of several servo controls with FUZZY logic in consumer products. Therefore we compared the behavior of digital PID control with FUZZY control. As a result of our experiment, we can demonstrate the feasibility to realize adaptive servo control with FUZZY.

1. はじめに

現在応用例のあるファジィを用いたフィード・バック制御としては、温度制御や浄水場などのプロセス制御で、エキスパートシステムとして代用されているのが殆どであり、プロセス制御以外でのサーボ制御に用いられた例は未だ見当たらない。家電分野をとってみても、ＶＴＲにおけるドラムサーボ、ＣＤやＭＯＤにおけるモータサーボ、フォーカスサーボ、トラッキングサーボ等、種々のフィード・バック制御が用いられているなか、ファジィ制御は従来のＰＩＤ制御に対して、どのような位置づけになるかが興味あるところである。従って、我々は各種サーボ制御においてファジィを用いた適応制御の可能性を検討する為、第一段階として、ディスクモータサーボ制御における実験を行った。従来の手法における適応制御は、制御対象の時定数や伝達関数において最適な制御系の制御変数を適宜算出して設定していくものであるが、今回はＦＵＺＺＹ推論によってモータ時定数の変化に影響が少なく、速応性の高い制御系を実験で検証することで、ファジィ推論による適応型制御の可能性を検討した。我々の最終目標は、各種サーボ系のファジィを用いた非線型制御で安定性と速応性を満足できる適応型制御の開発にある。現時点の課題としては、①安定性の解析手法の獲得、②制御ルールの獲得などがある。

本論文では、ディスクモータサーボをＰＩＤ制御とファジィ制御で各々実験した比較検討結果とともに、非線型制御における適応型制御の可能性を報告する。

2. 制御系の構成

ディジタルＰＩＤ制御とディジタルファジィ制御におけるモータサーボのブロック図をそれぞれ図１と図２に記す。今回の実験では、速度検出として１２０パルス／回転のマグネティック・エンコーダーを用い、そのパルス幅を最小分解能２μsのカウンターで計測することでモータ回転速度を検出した。因みにＣＤプレイヤーでのディスク回転速度は約３～８回転／秒と変動するが、今実験では定速度制御を行った為、エンコーダ出力値を５１２Hz（４．２回転／秒）と１０２４Hz（８．５回転／秒）の一定速度になるように制御した。ＰＩＤ制御における入力要素は偏差Ｅ、偏差一階微分値ΔＥ、偏差積分値∫Ｅでモータ入力電圧値Ｕを出力する。ファジィ制御における入力要素は偏差Ｅ、偏差一階微分値ΔＥでモータ入力電圧変位値ΔＵを出力する。ファジィ制御における入出力Ｅ、ΔＥ、ΔＵの計算式を式１～３に記載する。

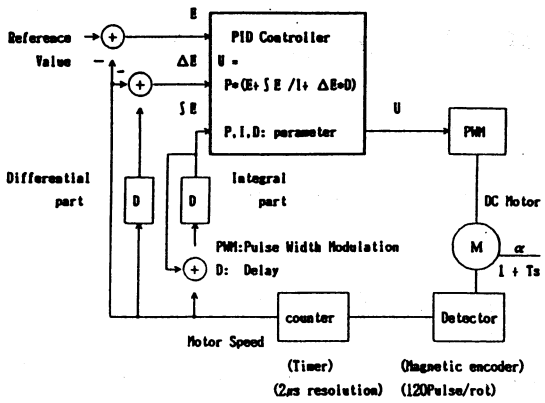


図1　ディジタルＰＩＤ制御ブロック図

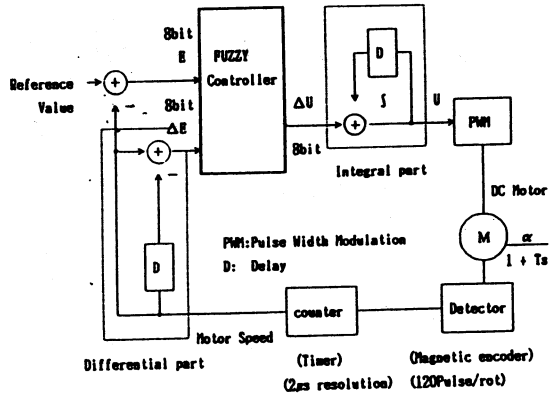


図2　ディジタルファジィ制御ブロック図

$$E = (R - S1) + 128 \quad (8bit) \quad \begin{cases} 25 \text{（上限値）} \\ 0 \text{（下限値）} \end{cases} \quad \cdots\cdots \text{（式１）}$$

$$\Delta E = (S2 - S1) * 32 + 128 \quad (8bit) \quad \begin{cases} 255 \\ 0 \end{cases} \quad \cdots\cdots \text{（式２）}$$

$$U = \int \Delta U \, dt \quad (8bit) \quad \begin{cases} 4096 \\ 0 \end{cases} \quad / 16 \quad \cdots\cdots \text{（式３）}$$

Ｅ：偏差　ΔＥ：偏差一階微分　ΔＵ：出力変位値
Ｓ１：旧モータ速度　Ｓ２：新モータ速度
Ｒ：設定速度　Ｕ：ＰＷＭ出力値

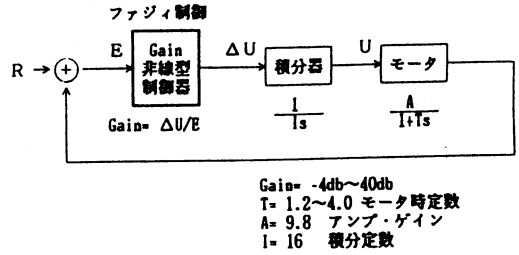


図3　本ファジィ制御等価ブロック図

3．ファジィ制御

今回用いたファジィ制御系はファジィＰＩ制御とよばれるもので、ファジィ推論法はＭＩＮ－ＭＡＸ－重心法を用いた。

3．1　安定性の検討について

制御系にとって最も大切なことは系の安定性、速応性を満足させるとともに定常偏差を少なくすることであり、ファジィ制御にとっても例外ではない。しかし、ファジィ制御のような非線型制御に対する安定判別法は現在無く、研究すべき一課題である。従って今回我々は、次のような手法で安定性を検討した。本ファジィ制御は図３のように考えることができる。すなわち、一定でないゲイン値を持つ２次遅れ系として、各々のゲイン値の変位にたいする周波数特性をボード線図で表すことで、各々のゲイン値における位相余裕、ゲイン余裕値から位相補償の必要性が考察できる。本ファジィ制御系で起こりうるゲイン値（Ｇａｉｎ＝ΔＵ／Ｅ）をファジィ推論結果ΔＵと偏差入力値Ｅから求めると、　－４ｄｂ～４０ｄｂの範囲で変位することになり、その時のボード線図をモータ時定数 1.2として図４に表す。線型部であるモータと積分器の伝達関数を式４に表す。因みに位相余裕値は10°～70°と変位し、安定性と速応性との兼ね合いを適宜選択する制御系にルール設定できる為に、速応性重視時の最悪の位相余裕値が10°となっているものの、特に位相補償を施す必要がないことが考察できる。

モータ＋積分器
の伝達関数

$$\frac{\dfrac{A}{16T}}{s^2 + s/T} = \frac{0.51}{s^2 + 0.83s} \quad \cdots\cdots \text{（式４）}$$

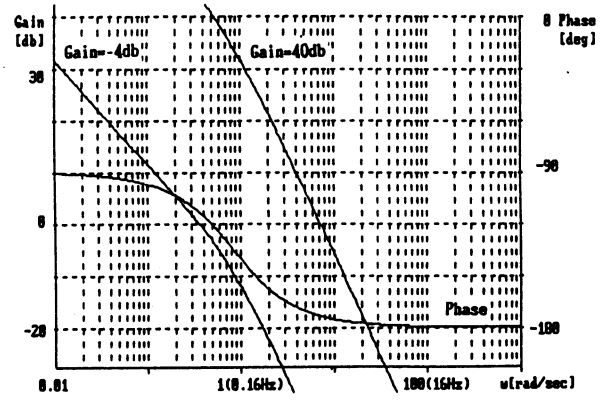


図4　ボード線図

3．2　メンバーシップ関数とルールおよびファジィ推論結果

本ファジィ制御におけるメンバーシップ関数およびルール表を図５ａ～５ｃ、表１に記す。ファジィ制御入出力要素はすべて８bit ディジタル値でメンバーシップ関数のグレード値も８bit で表す。偏差Ｅにたいするメンバーシップ関数は、式１からも分かるように設定速度にたいする±１２７Hzの変位内をあらわしている為、偏差Ｅが１２８Hz以上の時は最大値１２７が、偏差Ｅが－１２８Hz以下の時は最小値－１２７が選ばれる。　表１からも分かるように、偏差ＥがＰＢの時はΔＥに関係なく出力ΔＵはＰＢ、偏差ＥがＮＢの時はΔＥに関係なく出力ΔＵはＮＢとして速応性を高める。従って、特にモータ起動時に施されるキックオフ動作は不用となる。また図６はＥとΔＥのすべての入力状態における出力ΔＵの値を鳥瞰図で表したものであり、ファジィ制御の非線型性を理解できる。

IF (E = P1) AND (ΔE = P2) THEN (ΔU = P3)

P1＼P2	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
NM				NM			
NS	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PS	PB	PB	PM	PS	ZO	NS	NM
PM				PM	PS	ZO	NS
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

'1' NB=Nega_Big
'2' NM=Nega_Medium
'3' NS=Nega_Small
'4' ZO=Zero
'5' PS=Posi_Small
'6' PM=Posi_Medium
'7' PB=Posi_Big

表１　ルール表

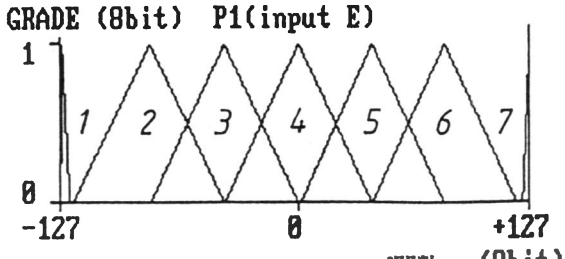


図５ａ　Ｅのメンバーシップ関数

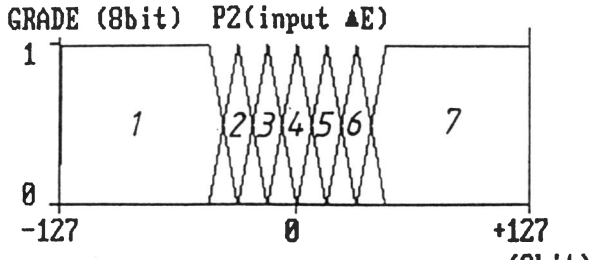


図５ｂ　ΔＥのメンバーシップ関数

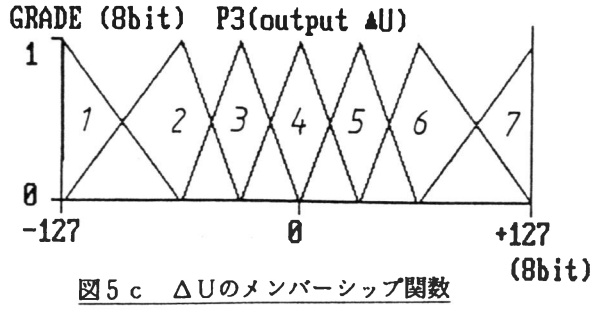


図５ｃ　ΔＵのメンバーシップ関数

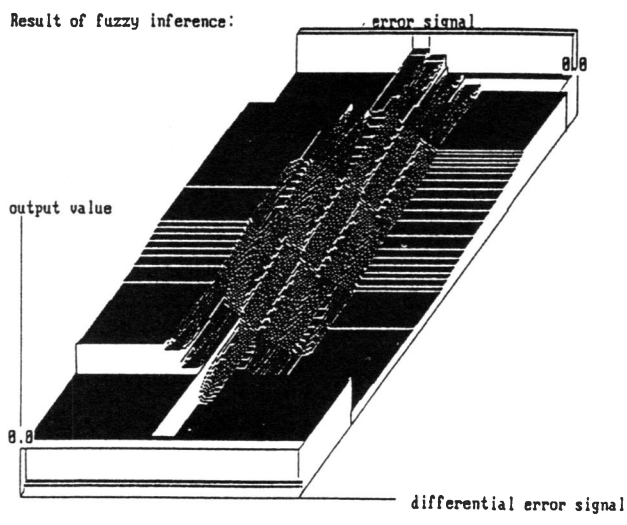


図６　ファジィ推論結果

4．ＰＩＤ制御とファジィ制御の比較結果

モータ時定数Ｔを 1.2から 4.0へと３倍強変化させた時のステップ応答と、設定速度値を 512Hz(≒4.26rps)と1024Hz(≒8.53rps)に変化させた時のステップ応答をＰＩＤ制御系とファジィ制御系を用いて測定した。それぞれの結果を図７～１２に記す。

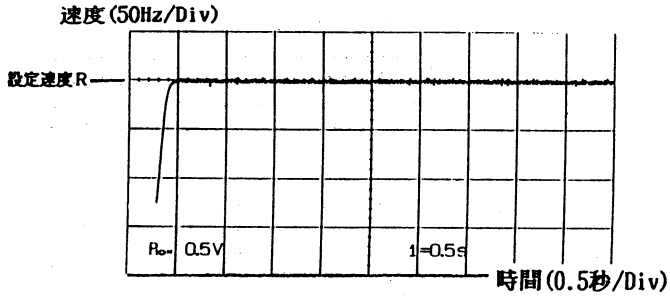


図7　ＰＩＤ制御

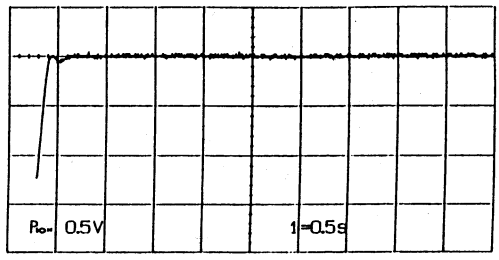


図8　ファジィ制御

モータ時定数Ｔ＝１．２　　設定速度Ｒ＝５１２Hz（≒4.26rps)

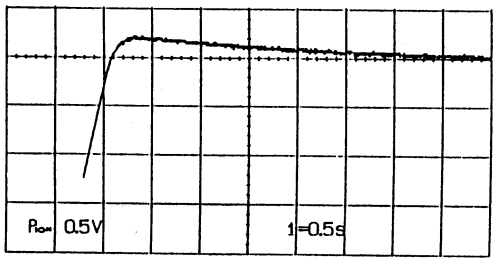


図9　ＰＩＤ制御

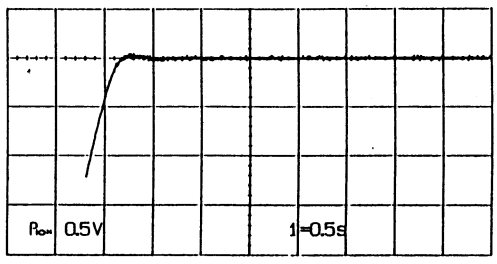


図１０　ファジィ制御

モータ時定数Ｔ＝４．０　　設定速度Ｒ＝５１２Hz（≒4.26rps)

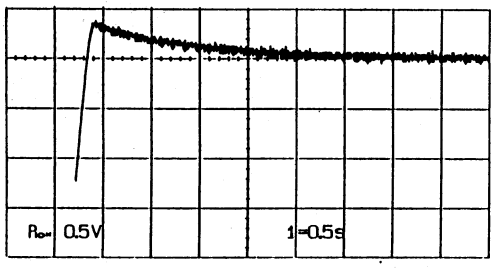


図１１　ＰＩＤ制御

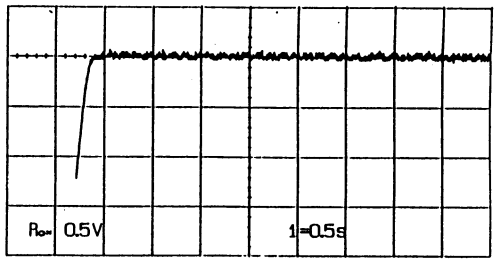


図１２　ファジィ制御

モータ時定数Ｔ＝１．２　　設定速度Ｒ＝１０２４Hz（≒8.53rps)

５．検討結果

ＰＩＤ制御を用いれば、図７のようにある一つの条件下においては最適化制御を実現できるが、条件が変化した時の対応には大変貧弱であることが分かる。しかし、ファジィ制御の特徴である非線型制御を利用すると、モータ時定数等の定数が変化した際も追従した制御が期待できる。今後はこのことを活かして、ＣＤ、ＭＯＤでのピックアップサーボ系でのファジィ制御の実験を行っていく予定である。現在の課題としては始めに述べたように、①安定性の解析手法の獲得、②制御ルール、メンバーシップ関数の設定法、③位相補償問題がある。

６．参考文献

(1) MICHIO SUGENO, "An Introductory Survey of Fuzzy Control" INFORMATION SCIENCES 36,59-83(1985)

(2) WITOLD PEDRYCZ, "Fuzzy Control and Fuzzy Systems" RESEARCH STUDIES PRESS LTD.,England

問い合わせ先：〒１０２　東京都千代田区麹町
５－７　ＴＢＲビル７０７号室
トムソンジャパン株式会社
東京研究室　　金尾　正三
Tel 03-234-4646　Fax 03-239-8052

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6〜8, 1990)

FB1-1

いわゆるマムダニの含意について

On Mamdani's Implication

中島　信之
Nobuyuki NAKAJIMA

富山大学　経済学部
Faculty of Economics, Toyama University

Abstract : In fuzzy control, we usually use a so-called Mamdani's implication, and get fine results, although it is not an implication in any sense of mathematics. We discuss, in this paper, why Mamdani's implication is effective for fuzzy control. We also discuss whether we can regard a so-called fuzzy inference rule as fuzzification of the rule of inference in logics.

1. はじめに

現在のファジィ理論の隆盛は，もっぱらファジィ制御に負っているといって過言ではない．そしてファジィ制御の成功の鍵がいわゆる『マムダニの含意』を採用したことにあることも事実である．

ところが，この点に関して奇妙な事実がある．まず第１に，マムダニの含意はいかなる意味でも含意には相当しない．また，ファジィ制御は『ファジィ推論規則』の応用であって（菅野[5]，水本[3]），それは論理学でいう『推論規則』のファジィ化であると一般には考えられている（塚本 [6-8]など）が，そうではない．そして最も奇妙なのは，それにもかかわらず，非常に有効である，という事実であろう．

本講演では，マムダニの含意が必然性について論じる．

2. 『ファジィ推論規則』と『マムダニの含意』

2.1. 『ファジィ推論規則』の問題点

最も典型的なファジィ推論規則は

$$\frac{\begin{array}{l}x \text{ is } A'\\ \text{IF } x \text{ is } A \text{ THEN } y \text{ is } B\end{array}}{y \text{ is } B'} \qquad (R)$$

と書き表される．ここで，ｘとｙは変数名で，Ａ，Ａ'，Ｂ，Ｂ'はファジィ集合で記述される述語である．

ファジィ集合Ｂ'のメンバーシップ関数Ｂ'(ｙ)は，合成規則

$$B'(y)=\bigvee [A'(x)\wedge R(x,y)] \qquad (1)$$

によって定められる．ここで，Ｒ(x,y) は含意Ａ→Ｂ（IF x is A THEN y is B）を表す関係である．

ファジィ推論規則の例として有名なザデーの

このトマトは非常に赤い
IF トマトが赤い THEN トマトは熟れている
∴このトマトは非常に熟れている

がある．これを一般化し，形式化に表したものが，前記のファジィ推論規則(Ｒ)である．

ファジィ推論規則の特徴はつぎの２点である．

(1) Ａ，Ａ'，Ｂ，Ｂ'がファジィ集合で記述されるファジィ述語であること，

(2) 規則の条件部のＡと入力のＡ'とが異なっていてもよい（したがって行動部のＢと出力のＢ'も当然異なってくる）．

以上がファジィ推論規則と呼ばれているものに対する一般的な理解である．

しかしわれわれは，その中に『推論の規則』と『計算の規則』という相異なる２つの概念がまじりあっていて，それが少なからぬ混乱をもたらしているのを見ることができる．

では，『推論の規則』とは何か――

論理学（論理体系）は普通いくつかの公理といくつかの推論規則とからなっている．代表的な推論規則に『代入規則』と『分離規則』がある．このうち前者は，公理系の表し方によっては不要となることも多いので，単に推論規則といった場合には，『分離規則』をさすことが多い．

分離規則modus ponensは

$$A,\ A\rightarrow B \vdash B$$

と書き表され，命題Ａと含意Ａ→Ｂがともに真のとき，Ｂもまた真である，とする規則である．

この規則の最も肝心な点は『計算の規則』ではないという事実であろう．言い換えると，『命題Ａの真理値(＝１)』と『含意Ａ→Ｂの真理値(＝１)』とから，計算によって『命題Ｂの真理値(＝１)』を導き出しているのではないのである．

別の言葉でいうと，

(1) Ａ∧(Ａ→Ｂ)の真理値は必ずしもＢの真理値と一致しないし（例１），

(2) Ａ∧(Ａ→Ｂ)がＢを含意しているのでもない（例２）．

例１．Ａ∧(Ａ→Ｂ)の真理値とＢの真理値は，古典論理学にあっても，必ずしも一致しない．（以下，命題とその真理値は同じ文字を用いて表す．）Ａ＝０，Ｂ＝１とすると，

$$A\wedge(A\rightarrow B)=0\wedge(0\rightarrow 1)=0\wedge 1=0$$

となり，Ｂ＝１と一致しない．

古典論理学にあっては，たまたまＡ∧(Ａ→Ｂ)がＢを含意している．しかし，一般に必ずしもそうだとい

うことではない.

例2. ルカシェヴィッツの多値論理学においては, A∧(A→B)はBを含意していない. A=½, B=0とすると,

$$[A \wedge (A \to B)] \to B = [\tfrac{1}{2} \wedge (\tfrac{1}{2} \to 0)] \to 0$$
$$= (\tfrac{1}{2} \wedge \tfrac{1}{2}) \to 0$$
$$= \tfrac{1}{2} \to 0 = \tfrac{1}{2}$$

で, A∧(A→B)がBを必ずしも含意していないことが分かる.

このように, AとA→BからBを導き出す計算の規則は存在しない. 推論の規則として分離規則が存在するのはこの故であるといってよい. 推論の規則だということは, 『Aの真理値＝1』と『A→Bの真理値＝1』という2つの条件がたまたまそろったときに, 分離規則を適用することによって『Bの真理値＝1』を導き出しているということである.

ということで, もう1度ファジィ推論規則を見てみよう. 上のザデーの例では, 今述べた分離規則を少なくとも形式的にはなぞっており, 『推論の規則』としてのファジィ推論規則の構築を試みているように思える. またファジィ推論は推論の規則である, というような説明がされることも多い.

ところが, B'のメンバーシップ関数B'(y)を(1)式で決めるという事実は, 結論B'の真理値がA'とA→Bの真理値の計算の結果として導き出されているということである. こう見ると, ファジィ推論規則は『計算の規則』であって『推論の規則』ではないということになる.

ファジィ推論規則が計算の規則であるならば, 上で見たとおり

$$A' = A \text{ のとき } B' = B$$

でなければならない必然性はない. ここに一種の混乱があると考えざるを得ない.

そこで, 名前は何であれ, ファジィ制御規則を最初から計算の規則として位置づけておくことが, 後にも触れるとおり, 大切であろうと思われる.

2.2. 『マムダニの含意』の問題点

ファジィ制御規則が計算の規則であるという前提で, 今度はマムダニの含意について考えてみる.

$$A \wedge B$$

で定義されるマムダニの含意(Mamdani [2])は, 数学(論理学)でいうところの含意ではない. というのは, いかなる論理体系にあっても, 含意A→Bは, AとBに関して非対称になるべきであるが, マムダニの含意はAとBは対称になっている. 少なくともこの1点だけからしてもマムダニの含意は含意ではありえない.

マムダニの含意の根拠としてあげられているのは,
(1) マムダニの含意を採用したときに実際に極めて有効である(応用上の理由),
(2) A'=AのときB'=Bであること, つまり分離規則を形式的に満たしている(理論上の理由)
の2点である.

(1)に関して, マムダニの含意を採用したときなぜ有効であるのか, という疑問がある. この疑問はこれまで明快に答えられていない.

(2) 上で述べたとおり, 計算の規則としてのファジィ制御規則が

$$A' = A \text{ のとき } B' = B$$

を満たしていなければならないとする理由は特にない. (満たしていて悪い理由はないが——)

本講演では, 別の立場からマムダニの含意が必然的に導き出されることを示す.

3. ファジィ制御規則

プロダクション・システムというのは

IF x is A THEN y is B

という形の複数個のプロダクション・ルールから成っており, 入力xがあったとき, これらのルールを照合していき, IF部(条件部)を満たしているものが見つかったとき, そのルールが起動(発火)して, THEN部(行動部)が実行される. 普通は, 1つの入力に対してルールのうちの1つが, しかもただ1つだけが発火(起動)するように設計される. もし複数個のルールが同時に発火し得るときには, ルールに優先順序を設けるなどの方法で競合を避ける.

言い換えると, プロダクション・システムとは, 1つの入力に対して常に1つのそしてただ1つの行動を出力するようなルールの集合

$$R = \{R_1, R_2, \cdots, R_n\}$$

のことである.

入力の空間Xは, 各ルール

R_i IF x is A_i THEN y is B_i, i=1,...,n

によって, ルールの数nだけの領域に分割される. ルールR_iに対応する領域を述語と同じ文字A_iを用いて表すと, 1つの入力に対して1つ, しかもただ1つだけのルールが発火するという仮定から, A_1, A_2, …, A_nはたがいに排反になる.

例として

IF 室温が28℃以上である THEN 冷房を入れよ
IF 室温が13℃以下である THEN 暖房を入れよ
IF それ以外である THEN 冷房も暖房も入れない

を考えてみよう. 入力空間Xは13℃以下, 28℃以上, その間の3つの領域に分割され, 入力x(室温)がこれらのどの領域に入るかによって, 暖房をON, 冷房をON, どちらもOFF という出力を得る.

さて, このシステムを起動させたとしよう. 室温センサによって“室温は28.5℃である”という入力が得られた. もちろん第1番目のルールが起動して, “冷房を入れよ”と出力する. 冷房が働きだして, しばらくすると室温は下がって, “室温は27.9℃である”となった. そうすると第2のルールが起動して, 冷房はOFF になる. 冷房がOFF になると, 室温は上昇して, 28℃を越える. 再び第1のルールが発火して冷房はON……を繰り返すことになる.

ところが, 短時間にONとOFF が繰り返されるのは, 人間にとって不快であると同時に, 機械にも当然よくない. 28℃を境に突然行動が変わるのは滑らかさに欠けて, “自然”とは言えない.

そこのところを改良したのが, ファジィ制御規則で

R_1 IF 室温が高い THEN 冷房を入れよ
R_2 IF 室温が低い THEN 暖房を入れよ
R_3 IF 適温である THEN 冷房も暖房も入れない
というように，条件部の述語A_iを一般にファジィ化する（さらに行動部の方も連続的に変化できるようにファジィ集合とすることが多い）．

室温28.5℃も27.9℃も“室温が高い”をある程度満たしているが，同時に，“適温である”をも部分的に満たしているといえる．この点をもう少し詳しく見てみよう．

いま室温が観測されて，“適温である”のグレードが.7であったとしよう．そうするとルールR_3が高さ.7だけ発火して，.7の高さで“冷房も暖房もOFF”という出力を出すことになる．

ところで，“適温である”のグレードが.7となるのは“低温”に近い14℃あたりと“高温”に近い27℃あたりの2カ所にある．14℃あたりだと暖房がほしい感じであり，27℃あたりだと逆に冷房がほしい感じである．しかし，ルールR_3からは，14℃であろうと27℃であろうと，“冷房も暖房もOFF”を.7の高さで出力するだけで，暖房がほしいの感じか冷房がほしい感じなのか不明である．

つまり，ルールR_3をファジィ表現するだけではダメなのである．他のルールが同時に起動することが非常に大切なのである．

例えば，“低温”に近い場合だと，ルールR_2も同時に部分的に発火することで，合わせて弱暖房のスイッチONという出力になろうし，“高温”に近ければR_1が同時に部分的に発火することで，弱冷房のスイッチONという出力を得ることになる．

すなわち，このように，1つの入力に対して2つ以上のルールが同時にしかも部分的に起動することによって，ファジィ制御ルールは初めて有効に機能するのである．

以上をまとめれば，1つの入力xに対して全てのルールの条件部が（高さ0を含めて）“部分的に”満たされ，すなわち

$$x \in A_i$$

が部分的に真となり，したがってこれらのルールが同時に部分的に発火する．

通常のように“IF—THEN—”ルールを含意として解釈する．ルール

R_i IF x is A_i THEN y is B_i

は，発火の高さまで考慮すると，

$$A_i(x) \wedge [A_i(x) \rightarrow B_i(y)]$$

と等しいとみなすことができる．

定理．$A \wedge [A \rightarrow B] = A \wedge B$となるための必要十分条件は，含意が

$$A \rightarrow B \quad \begin{cases} \geq A & A \leq B \\ = B & A > B \end{cases}$$

を満たしていることである．

系．直観論理学では$A \wedge [A \rightarrow B] = A \wedge B$は成立するが，Lukasiewicsの多値論理学では成立しない．

4．ファジィ推論規則について

この節ではファジィ推論規則を『推論の規則』として構築することを試みる．

そのために，もう一度推論の規則としての分離規則について考察してみる．

分離規則を多値論理化する方法には，例えば，命題が真であることの定義を，その真理値がs以上のときであるというようなやり方が考えられる（Postの多値論理学，例えば井関［1］）．すなわち『$A \geq s$』かつ『$A \rightarrow B \geq s$』のとき『$B \geq s$』と推論するやり方である．しかし，こういうやり方では，命題が真であることの定義を拡張しただけに過ぎず，分離規則そのものがファジィ化されるわけではないことに注意しておく．

分離規則

(R) $\quad A,\ A \rightarrow B \vdash B$

における，AやBは命題あるいは論理式であるが，ここでは命題，それも“a is A”という形をしている命題に限って考えることにする．このとき分離規則は

$$\frac{\begin{array}{l}a \text{ is } A \\ \text{IF } a \text{ is } A \text{ THEN } b \text{ is } B\end{array}}{b \text{ is } B}$$

と表される．

$$\frac{\begin{array}{l}a \text{ は4の倍数である} \\ \text{IF (aが)4の倍数 THEN (aは)偶数である}\end{array}}{a \text{ は偶数である}}$$

はその1例である．

2値の場合はその区別がはっきりしないが，分離規則では，問題の重みは主語の方にあるのである．例えば，a＝12のときは“aは4の倍数である”という命題は真となる．したがって，分離規則が働いて，“aは偶数である”が結論される．

ところが通常ファジィ推論規則と呼ばれているものは

$$\frac{\begin{array}{ll}x \text{ is } A' & \text{(入力)} \\ \text{IF } x \text{ is } A \text{ THEN } y \text{ is } B & \text{(規則)}\end{array}}{y \text{ is } B' \quad \text{(出力)}}$$

と表されている．これを上の分離規則の場合と同様に，主語x＝aに注目して，$A' \wedge (A \rightarrow B)$を計算すると，

$$B_{x=a}(y) = A'(a) \wedge R(a,y)$$

となる．ところが，ファジィ集合B'のメンバーシップ関数は

$$B'(y) = \vee\ [A'(x) \wedge R(x,y)]$$

によって定められている．xについて$\vee$を取っているということは，変数yにおけるグレードがB'(y)になるようなxが（述語A'を満たすものの中に）存在していることを意味している．

言い換えると，ファジィ推論での重みは，述語の側にあるということである．

このように，分離規則（推論規則）は対象（自由変数）a，b間の関係の記述しているものであり，ファジィ推論規則は述語A，A'，B，B'間の関係の記述するものである，といってよい．

そこで，推論の規則としてのファジィ推論規則を作るためには，

(1) 述語間に記述でなく，主語（対象）間の関係の記

述するものであり,
(2) 計算の規則ではなく，推論の規則である,
の２点を満足することが必要かと思われる.

また，ザデーのトマトの例では含意の部分で，ｘ＝ｙとなっており，このため問題の核心が見えにくくなっているきらいがある.

そこでこれらの諸点を考慮して，次のような例を考える.

太郎は非常に背が高い　　（Ａ'）
IF ある男が背が高い
　　THEN 彼の息子も背が高い　（Ａ→Ｂ）

∴太郎の息子は背が……?　　（Ｂ'）

まず，Ａ'＝Ａであるときを考える．今，前提『太郎は背が高いの真理値が１である』ことの意味が確定し，かつ『IF ある男が背が高い THEN彼の息子も背が高いの真理値が１である』ことの意味が確定したと仮定する．このとき，これらの事実から，真理値の計算によらないで，結論『太郎の息子も背が高い』が導き出されるべきであろう．すなわち,
(1) ファジィ命題『太郎は背が高い』の真理値をどう定めるかが問題となる．（太郎の身長ｘcmの『背が高い』のグレードが１であることとは違うように思われる．ご教示を乞う）
(2) また，含意における主語が異なっているので，ｘとｙとの内的関係が問題となってくる．今の例ではｘは父親でｙはその息子というように親子関係があるので，遺伝の知識から含意『父親が背が高ければ息子も背が高い』が真となるのである．もしｘとｙの間に内的関係がなければ，いかなる含意も真とも偽とも決められないであろうことは想像に難くない.

さてそこで，Ａ'とＡが一致していない上の例を考えてみる．この場合にどういう結論が得られるかを形式的に論じることはほとんど不可能であるといってよい.

事実が条件Ａ＝『背が高い』からＡ'＝『非常に背が高い』へと変化したとき，結論Ｂ'がＢからどちらの方向へ変化するかが分からない限り推論することは不可能である．言い換えると，この種の推論をするためには背の高さについての遺伝の知識が不可欠なのである.

父親の身長が『背が高い』から『非常に背が高い』へと変化するときには，その息子の身長もまた『背が高い』から『非常に背が高い』へと変化するという知識があればわれわれは,

太郎は非常に背が高い　　（Ａ'）
IF ある男が背が高い
　　THEN 彼の息子も背が高い　（Ａ→Ｂ）

∴太郎の息子は相当背が高い　　（Ｂ'）

というような結論を，やはり計算によらないで得ることができるに違いない.

『推論の規則』としてのファジィ推論規則を構築するためには，いわゆる『常識推論』の助けが必要であるように思われる.

推論の規則としてのファジィ推論規則とは

x is Ａ'
IF x is Ａ THEN y is Ｂ
---
y is Ｂ'

で表されるもので，述語の間に，例えば
Ａ'＝Ａ±ａ　ならば　Ｂ'＝Ｂ±ｂ
という関係が成り立つものである.

[参考文献]

[1] 井関清志，記号論理学（槇書店，東京，1968)
[2] E.H. Mamdani, Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic systems, IEEE Trans. Comput., **26**, 1182-1191, 1977
[3] 水本雅晴，ファジィ制御向きファジィ推論法，計測と制御，**28**, 959-963, 1989
[4] 中島信之，ファジィ集合代数の数学的構造，和歌山県立医大紀要，**19**, 23-38, 1989
[5] 菅野道夫，ファジィ制御（日刊工業新聞社，東京，1975)
[6] 塚本弥八郎，あいまい推論の一方法，計測制御学会論文集，**17**, 479-484, 1981
[7] 塚本弥八郎，あいまい推論，計測と制御，**22**,139-145, 1983
[8] 塚本弥八郎，ファジィ推論法，計測と制御，**28**, 946-952, 1989

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FB1-2

マムダニ推論と合成した自動ルール作成型ファジィ推論法

Fuzzy Reasoning to Make Rules Automatically Combined with Mamudani Reasoning

江端 智一　　八木 建史　　石原 好之　　戸高 敏之
Tomoichi EBATA, Tatehito YAGI, Yoshiyuki ISHIHARA and Toshiyuki TODAKA
同志社大学　工学部
Faculty of Engineering , Doshisha University

Abstract : This paper proposes Fuzzy Reasoning to make rules quickly and automatically by numerical functions and the centroid method in multivariable analysis. This Fuzzy Reasoning combined with a simple-type Mamdani Reasoning makes Fuzzy rules quickly, and this method is able to apply on various conditions. The effectiveness of this Reasoning is shown by simulations and experiments of driving a vehicle.

1．はじめに

人は日常生活において、自己の経験的な学習と、他者による教育的な学習を融合させることによって、多くの知識を獲得している。人が車のカーブ運転を学習するとき、人は全ての形状のカーブを実際に運転して学習する必要はない。いくつかのカーブの運転経験から、種々のカーブ運転に柔軟に対応できる。しかし、人命が危険になる状況を、経験による学習で補うことは不可能であり、教育による学習で補われることになる。

我々は、経験的学習を行う自己学習型ファジィ推論の一手法として、ＣＤＦ推論を提案した(1)。この推論法は、マムダニ推論のように言語レベルの命令を全ての場合について作成する必要はなく、学習データから数値解析的に特徴点を自動抽出するので、高速に同定が完了する。その反面、学習データの条件に表れない領域では、正しい推論の実行ができなくなる。そこで、この推論法に教育的な学習法との融合を行う手法を提案する。

本研究では、走行車をモデルに用いて①高速学習同定が可能であるが、環境の変化の対応に弱いＣＤＦ推論を『経験的学習』による推論、②環境の変化には強いが、ルール作成に時間のかかるマムダニ推論を『教育的学習』による推論と位置づけ、両者の合成を行うことによって、わずかな時間での同定が完了し、安定な推論が可能となることを確認した。

2．推論の同定法

2-1　ＣＤＦ推論の同定法

メンバーシップ関数に簡単な関数を用いることで、高速のシステム同定を実現する。同定法を以下に示す。

①入出力データ$(X_{i1},X_{i2},\cdots X_{in},Y_i)i=1,2,\cdots,N$を観測する。

②これらの中から同定用データとチェック用データを、それぞれ必要な個数選び出す。

③選び出した同定用データを、クラスタリング手法の重心法を用いて最初は２分割し、それぞれの群を$R^k,(k=1,2,\cdots m)$ $(m < N)$とする。

④前件部メンバーシップ関数をそれぞれの群ごとに、指数関数を利用したモデルより決定する。メンバーシップ関数は群のデータの重心点で最も値が大きくなり、重心点から遠くなるにつれて値が小さくなる。群ごとのメンバーシップ関数は、最も近い群の同定用データが存在した地点で十分小さい定数になるように決定する。入力変数$(X_1,X_2,\cdots X_n)$、第ｋ群のデータ数をC_k個とし、その群のデータの平均値を$(\bar{x}^k_1,\bar{x}^k_2,\cdots \bar{x}^k_n)$、第ｋ群に最も近い第ｋ'群の中の、最も第ｋ群に近い同定用データを、$(\bar{x}^{k'}_{q1},\bar{x}^{k'}_{q2},\cdots \bar{x}^{k'}_{qn})$とすると、$\mu^k$ は次式で与えられる。

$$\mu^k=\exp\{-\sum_{l=1}^{n}(X_l-\bar{x}^k_l)/\alpha_k\}\ (l=1,2,\cdots,N) \qquad (1)$$

$$\alpha_k=-\sum_{l=1}^{n}(X^{k'}_{ql}-\bar{x}^k_l)/\ln(\varepsilon) \qquad (2)$$

ここで、εは十分小さい定数とする。

後件部メンバーシップ関数は、それぞれの群ごとのデータより回帰分析を行い線形モデルを立てる。ｎ個の入力を持つモデルの場合ｎ次元の回帰平面を立てる。また入力変数が多いときは単なる群ごとのデータの平均を使用する。$\bar{y}^k$は次式で与えられる。

$$\bar{y}^k=\sum_{s=1}^{n}(A_sX_{ls})+A_{n+1} \qquad (3)$$

前件部、後件部をFig.3のように組み合わせ、システムの同定を終了する。なお、$\mu^k(k=1,2,..m)$は各データがそれぞれの群に属する度合、$\bar{y}^k(k=1,2,..,m)$は各群の入力に対する推定値である。Fig.1、Fig.2にメンバーシップ関数のイメージ図を示す。推論値は次の式より得られる。

$$y^*_l=\frac{\sum_{k=1}^{m}\mu^k\cdot\bar{y}^k}{\sum_{k=1}^{m}\mu^k} \qquad (4)$$

⑤推論結果とチェック用データを比較して、差が小さくなるうちは、分割数を１つ増して、④より再計算する。前回の推論結果と比較し、差が大きくなれば分割数を前回の値として、同定を終了する。

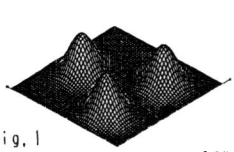


Fig.1
前件部メンバーシップ関数
イメージ図

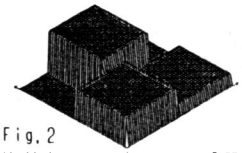


Fig.2
後件部メンバーシップ関数
イメージ図

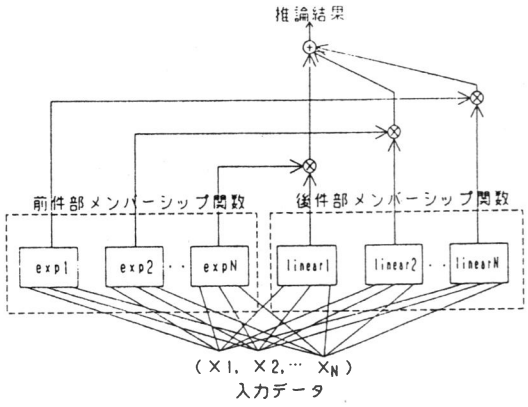


Fig.3　ＣＤＦ推論の構成

2-2　ＣＤＦ、マムダニ合成推論

ＣＤＦ推論は学習データより作成されるので、学習した条件から大きくかけ離れた条件では、推論結果が予期せぬものとなることがある。そこで推論領域の一部、又は全体で、簡易なルールによるマムダニ推論をＣＤＦ推論と並列に実行し、それぞれの推論結果を合成する。これは、推論領域がＣＤＦ推論の適する境域から外れそうになったときに、マムダニ推論によってこれを押し戻す働きを意味する。

合成推論法として下記の手法を提案する。ＣＤＦ推論法、マムダニ推論法、合成推論法の推論結果をそれぞれY_c^*、Y_m^*、Y^*とする。

2-2-1　ＭＡＸ方式

最大値を用いる方法で、推論結果は下記の通りである。

$$Y^* = \mathrm{Max}(Y_c^*, Y_m^*) \qquad (5)$$

2-2-2　ハイブリッド方式[2]

推論領域全体{U}は、ＣＤＦ推論が適する推論領域{U_c}とマムダニ推論が適する推論領域{U_m}とそれ以外の領域{U'}から成り立つと考える。推論結果はそれぞれの適する領域で結果に強く反映されるように組み合わせる。

$$\{U\} = \{U_c\} + \{U_m\} + \{U'\} \qquad (6)$$

領域U_c：　$Y^* = Y_c^*$

領域U_m：　$Y^* = Y_m^*$

領域U'：　領域Ucからの距離をa、領域Umからの距離をbとしたとき

$$Y^* = \alpha Y_c^* + (1-\alpha) Y_m^* \quad \text{ただし} \alpha = b/(a+b) \qquad (7)$$

3．シミュレーション環境・実験方法

実験は、シミュレーションと、実際の模型走行車の両方で行った。シミュレーションの学習用データはドライブシミュレータを使用し、オペレータが走行路を３次元表示させた画面を見ながら運転を行い、必要なデータを取り込む。

3-1　走行車の加減速運転シミュレーション

スピード(SP)、残差距離(D)、操作量(ACC)、経過時間(T)のデータをサンプリング時間50[ms]で取り込む。走行車は最大速度100[cm/s]、最大加速度±30[cm/s²]とし、1000[cm]の距離を直進走行させる。

3-2　走行車のカーブ運転シミュレーション

Fig.4に示すような形状の走行路を走行させ、左右45度の側壁までの距離(Dl,Dr)、前輪舵角量(S)、単位時間あたりの操舵量(dS)、経過時間(T)をサンプリング時間100[ms]で取り込む。走行車は100[cm/s]の定速運転を行い、カーブ走行時の横滑り等はないものとする。

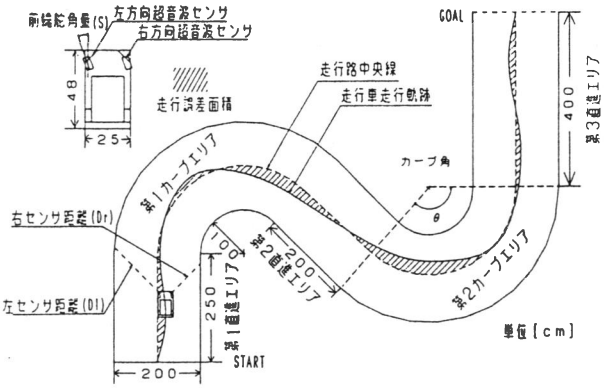


Fig.4　カーブ走行シミュレーション環境

3-3　走行車のカーブ運転実験

シミュレーションと同じ環境で、模型走行車を用いて実験を行った。模型走行車より超音波センサで取り込んだ距離データをコンピュータに送信し、操舵角を推論して送信する。Fig.5にシステム構成を示す。

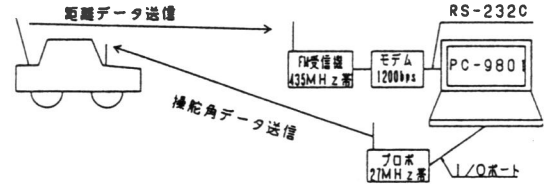


Fig.5 模型走行車によるカーブ運転実験システム

3-4　実験方法

次にシミュレーション運転及び実証運転の実験の手順を示す。

①走行データをドライブシミュレータ、模型走行車を用い作成する。オペレータは3-1の実験においては、短時間でゴールに到達し停止するように操作し、3-2及び3-3の実験では、走行路の中央を安定に走行させる。

②データからＣＤＦ推論の同定を行う。

③合成推論の同定を行い、学習時と異なった走行環境でそれぞれの推論による走行の特性を調べる。

4．走行車の加減速運転シミュレーション

Fig.6に学習時の走行データと、同じ環境でのＣＤＦ推論による走行結果を示す。学習時の初速度は0[cm/s]、残差距離は1000[cm]で、約300個の入出力データから約70個

の学習用データを選び出し同定を行った結果、最適な学習データの分割数は23となった。またFig.7には残差距離を900[cm]、初速度を70[cm/s]としたときのＣＤＦ推論による走行結果を示す。このように環境を若干変化させた場合でも、ほぼゴールで停止していることがわかる。
Fig.8に任意の残差距離と速度の時に、この推論により進められる方向を示した推論ベクトルの分布図を示す。円は前件部メンバーシップ関数の分布を示す。以上より、学習データと異なる条件では、最適な推論が困難となることが分かる。

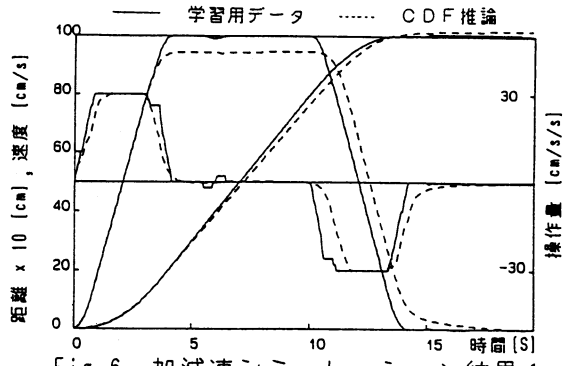


Fig.6 加減速シミュレーション結果１
(残差距離 1000[cm] , 初速度 0[cm/s])

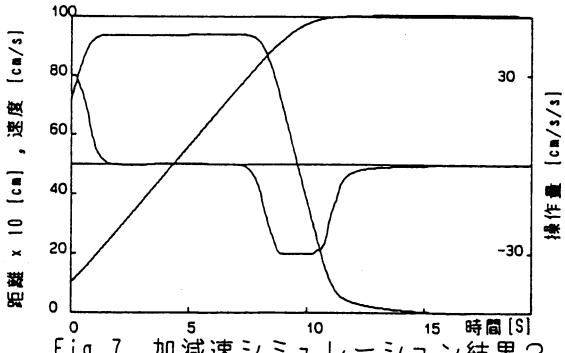


Fig.7 加減速シミュレーション結果２
(残差距離 900[cm] , 初速度 70[cm/s])

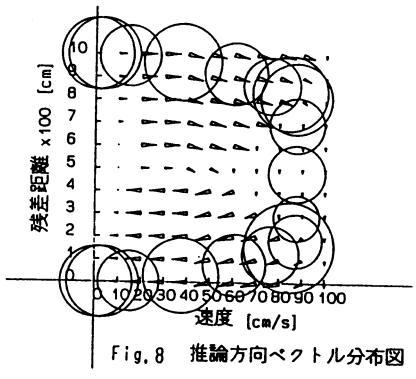


Fig.8 推論方向ベクトル分布図

５．走行車のカーブ運転シミュレーション

実験時の環境は、Fig.4で示した走行路形状のカーブ角を変化させて、側壁に接触及び衝突せずにゴールに到着できた時を成功とする。成功の度合いを確認するために、推論による走行車の軌跡とセンターラインに囲まれた面積を、走行路全体の面積で割った値を運転誤差率と呼ぶこととする。またＣＤＦ推論、及び合成推論との比較検討を行うため、マムダニ推論によるシミュレーションも行う。ここでは左センサ距離(Dl)、左センサ距離変化量(dDl)、右センサ距離(Dr)、右センサ距離変化量(dDr)、前輪舵角量(S)の５つの数値を入力し、単位時間あたりの操舵量(dS)を推論し出力する。学習データはカーブ角135度で作成した。Table 1にマムダニ推論によるカーブ走行用操舵量ルール表を示す。ルールはセンサ左右に同じものを用いるので、一方だけを示した。Table 2には、ＣＤＦ推論に合成する簡易なマムダニ推論のルール表を示す。なおマムダニ推論は、簡易ファジィ推論を用いた。

Table 1 カーブ走行操舵量ルール表

距離(d0)／距離変化(D)	ZO なし				PS やや大きい				PB 大きい				
	NB	NS	ZO	PS	PB	NB	NS	ZO	PS	PB	NB	NS	ZO	PS	PB	操舵角
NB 負に大きい																
NS 負	PB		PS			PS					ZO					
ZO なし				ZO												

Table 2 合成推論用ルール表

距離(d0)／距離変化(D)	ZO なし	PS やや大きい	PB 大きい
NB 負に大きい	PB	PS	
NS 負	PS	ZO	
ZO なし	ZO		

Fig.9にＣＤＦ推論と合成推論（ハイブリッド方式）、及びマムダニ推論による180度カーブ運転時の走行軌跡を示す。またFig.10にdSの変化を示し、第１、２カーブの開始と終了地点をA,B,C,Dと示す。走行結果より、いずれの推論でもうまく走行が行われている。しかしdSは走行軌跡の旋回半径の変化量を決定するので、走行車内に人が乗っている場合、一般的に変化量が大きいほど不快感が強くなり、乗り心地の点ではＣＤＦ推論、合成推論、マムダニ推論の順で優れていると言える。これは、マムダニ推論が距離の大小を確認してからdSの大きさを決定しているのに対して、ＣＤＦ推論では学習走行時に学んだ入力値全体の微妙な変化からdSを決定しているために、全体的にdSの変化が小さくなるものと考察される。

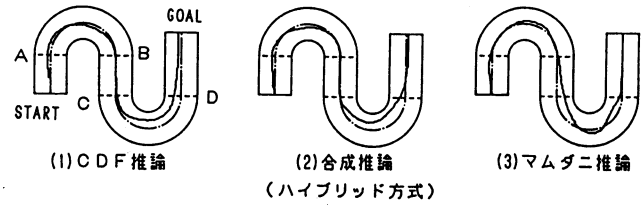


Fig.9 180度カーブ運転走行結果

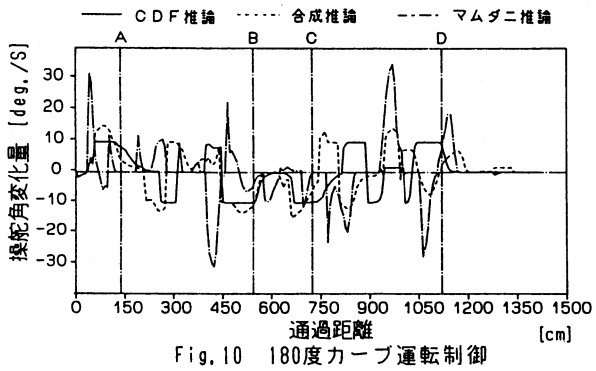


Fig.10 180度カーブ運転制御
操舵角変化量結果

Fig.11にＣＤＦ推論、合成推論のハイブリッド方式とＭＡＸ方式を用いたときの60度カーブ運転時の走行軌跡を、Fig.12に合成推論でのdSの変化を示す。ＣＤＦ推論では側壁に衝突して走行不能に陥っている。また、合成推論法のＭＡＸ方式とハイブリッド方式を比較すると、ＭＡＸ方式では、各推論値の最大値を取るため、全体的に大きな値を出す推論の影響が出やすく変化が急になるとがある。また、振動が生じやすいことが確認された。これは推論領域の境界部で推論結果を互いの領域に押し合うためと考えられる。

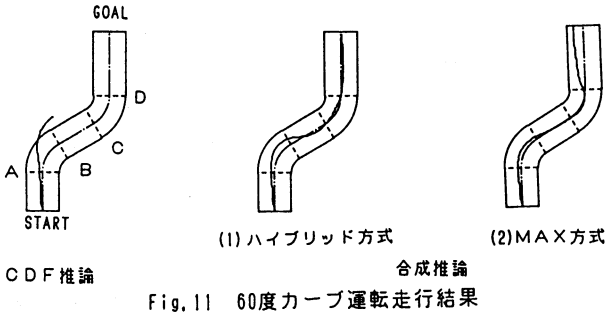


Fig.11 60度カーブ運転走行結果

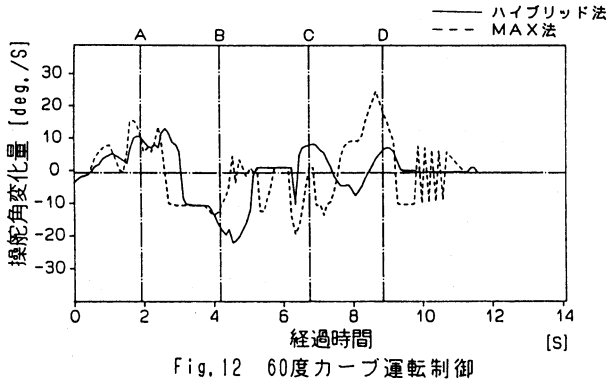


Fig.12 60度カーブ運転制御
操舵角変化量結果

Fig.13にカーブ角を-180度から180度まで10度づつ変化させたときの、ＣＤＦ推論による運転誤差率を示す。走行途中で側壁に接触した角度はプロットしなかった。合成推論による結果をFig.14に示す。ＭＡＸ方式、ハイブリッド方式ともに全ての角度で成功し、運転誤差率は全て12[％]以内で納まっていることが確認された。マムダニ推論では、操舵量を全体的に大きく推論させて全ての角度で成功させることができたが、dSの変化が大きく乗り心地の点で問題となることが確認された。

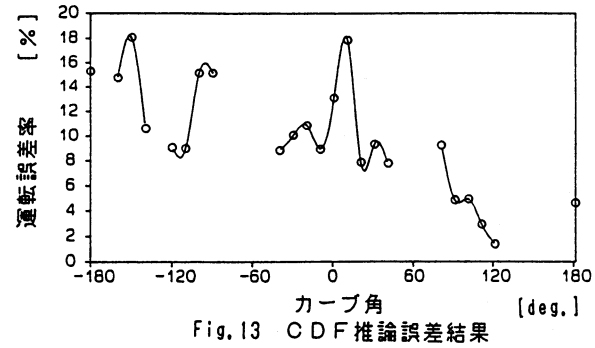


Fig.13 ＣＤＦ推論誤差結果

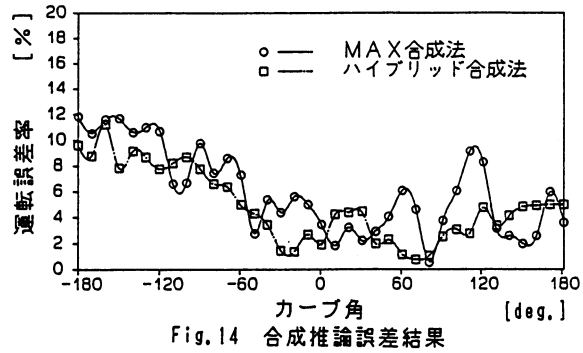


Fig.14 合成推論誤差結果

６．走行車のカーブ運転実験

模型自動車による実験を行った結果、超音波センサからのノイズが最大の問題となり、学習データ作成の際、変化量が非常に大きいデータを同定用データから削除し、距離変化量の影響を小さくしてＣＤＦ推論の同定を行った。結果は、マムダニ推論と比べ、合成推論法は蛇行運転が軽減され、比較的安定した走行が可能となった。

７．まとめ

学習データより自動的に高速にファジィ推論の同定を行うＣＤＦ推論を提案し、この推論に簡易なマムダニ推論を合成することにより、環境が変化しても安定な推論が可能となることを、走行車を用いて確認した。また、合成推論はそれぞれの推論領域を移行する際、なめらかに変化させるようなハイブリッド方式を用いることで、振動を押さえられることを確認した。今後、空間分割数の即時決定法、追加学習が可能となるＣＤＦ推論の同定法について検討を行う予定である。

最後に模型走行車のラジオコントロール装置と設計資料を提供していただいた、三和電子機器（株）の関係各位に感謝の意を表します。

(1) 江端、他：重心法分割型ファジィ推論を用いた走行車の学習制御；平成元年電気関係学会関支連,G2-27
(2) 松永、他：ファジィハイブリッド制御方式；平成元年電気関係学会関支連,G2-29

問い合わせ先：〒602 京都市上京区今出川烏丸東入
同志社大学工学部電気工学科 石原 好之
TEL 075-251-3764 FAX 075-251-3737

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FB1-3

近似推論方式を用いたファジィ推論基本処理のシステム化

A FUZZY INFERENCE SYSTEM USING APPROXIMATE REASONING METHOD

小木 元, 横山 一也, 中村 和男
Hajime OGI, Kazuya YOKOYAMA, Kazuo NAKAMURA
製品科学研究所
Industrial Products Research Institute

Abstract: Fuzzy relation approaches to knowledge based inference such as approximate reasoning proposed by L.A.Zadeh have many benefits such that they do not require multiple sequential inference stages in their nature. However, they contain another problems such as the amount of the fuzzy relation computations. In this paper, a prototype system of approximate reasoning is proposed and these problems on fuzzy relation approaches are solved by introducing UNIVERSE RULES and RULE BLOCKS under the sequential inference approach.

1. 目的

居住空間における危急時対応システム技術の一つとして，種々の計測，観測データから何らかの異状を検知し，事態の重大性を診断し，望ましい対応策の候補を呈示しうるような知的情報処理システム技術の確立は重要である．特に，あいまいさを許容するファジィ推論を導入することによって定性的な情報も有効に活かした診断システムを構築することは実現性・必要性が高い．本研究の概括的目標は，要素間の定性的関係として対象の特性表現を行ったとき，一部の定性的要素状態の設定によって他の要素の状態が対象特性に従ってどのように決まるかについての情報を引き出すような機能の実現である．

このような機能は図1に示すような3つのサブ機能，すなわち
(1) 知識ベースの構成によって対象の定性的特性記述を行う機能
(2) 利用者の操作によって定性的要素状態の設定を行う機能
(3) ファジィ推論処理によって他の要素状態の導出を行う機能
とその連携によって構成されると考えられる．

本稿では，第3番目のサブ機能「ファジィ推論処理機能」の実現に関して，従来の近似推論方式[1)]を基本としつつ，ルールや観測データの信憑性等の扱いを取り込み，また，逐次型推論機構を導入して柔軟に推論過程を制御・操作できるようなファジィ推論基本処理方式の提案を行う．

2. システム化の概要

ファジィ推論処理機能の基本処理は，そのメカニズムとして，作業記憶上の証拠・事実とゴールに関する記述，知識ベース上のルールおよびユニバース，ファジィ集合の定義を参照して，一連の推論処理を行い結論を生成，実行するものである．事実・証拠および推論結果の知識表現がファジィ集合であることを基本とし，
(1) ユニバースとファジィ集合の処理：基本データベースの参照
(2) ルールの処理：ルールベースへの参照とファジィ関係の合成
(3) 事実等の管理：事実・証拠・推論結果ベースの参照
(4) 推論処理：ゴール等推論方式による推論ルートの生成と実行
(5) 推論結果の処理：事実・証拠・推論結果ベースの再構成
を行う．また，これにともなって以下の処理を行う．

○推論機能
- 事実・証拠と前件部との適合度評価
- 一括処理ルール群の選択
- ルール前件部・後件部での論理結合，関係合成，関数算出
- 推論の実行による推論結果のファジィ集合の算出
- 結論ユニバースに関する既存推論状態と推論結果の統合
- 異常検知（適合ルール無し，結論が空・信憑性がない）

○推論過程統御機能
- ゴールからの逆向き推論ルートの探索
- 前件部充足ルールからの前向き推論ルートの探索

○推論過程説明機能
- 推論ルートおよび中間の推論結果の保持

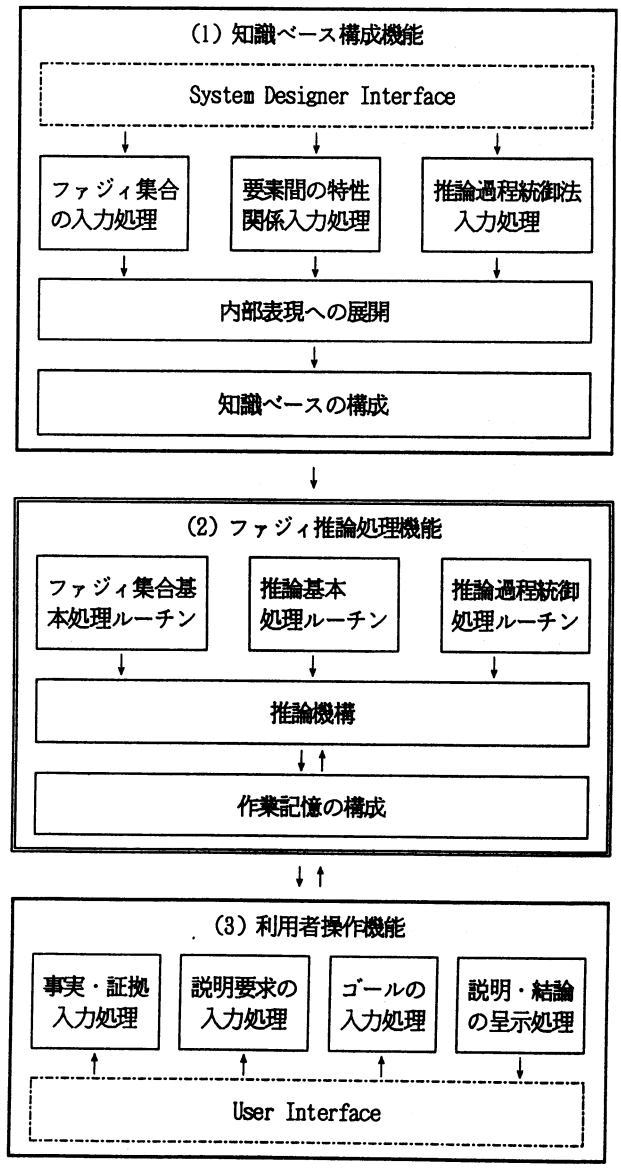


図1．診断システムの目標機能の全体的枠組み

3．前提となる知識ベースの概要

(1) 基本データベース（知識の枠組み）

基本データベースは，対象の基本属性としてユニバースとそのファジィ集合（ラベル付き），関数，ファジィ関係等の枠組みを記述する知識ベースである．

ユニバースは対象の属性を表す空間であり，3タイプの表現形式がある．すなわち，有限離散数値タイプおよび有限シンボルタイプでは，その全素要素の列挙による表現を行う．さらに，複数のユニバースの直積空間を直積タイプとし，直積されるユニバース名の列挙による表現を行う（表1）．

ファジィ集合は，その帰属ユニバース名とメンバシップ関数によって表現される．メンバシップ関数は，全素要素にメンバシップ値を割り付けるほか，用意された関数とそのパラメータ値による割り付け，代表素要素に割り付けたメンバシップ値による補間割り付けにより表現される（表2）．

(2) 事実・証拠・推論結果ベース

事実・証拠・推論結果は，対象とその属性の可能性分布を示すラベルの無いファジィ集合によって表現される（表3）．

(3) ルールベース

ルールベースは対象の特性関係と，推論過程の統御機構を記述する知識ベースであり，素ルール，ユニバースルール，ルールブロックから構成される．

素ルールは対象属性間の定性的関係に関する基本情報であり，ファジィ推論のためのプロダクション形式［ 前件部 → 後件部 ］で記述される．ここに前件部は，（対象，属性，値）の三項表現の集合であり，推論条件を積結合により限定する．後件部は（対象，属性，値，信憑性）の四項表現の集合であり，推論結果を和結合と解して直積空間での可能性分布を表現する（表4）．

素ルールは標準的に Zadeh流の近似推論で処理される．このとき，同一のユニバースを前件部・後件部に持つルール群は一括して，ファジィ関係の合成処理をするのが原則である[2]．この原則を表す概念がユニバースルール（表5）である．

ユニバースルールは一括処理を行う前件部ユニバース，後件部ユニバースを指定し，素ルール群の統合化を指示するとともに，素ルール群の前件部に合わない条件での推論をｅｌｓｅルールによって指定する．

ファジィ関係の合成により，近似推論では，基本的に，所与の事実・証拠からゴールまで一括した，一段推論演算が可能である．しかし多数のユニバースルールを一括して合成することは計算規模上の実現性から難しい．また，ファジィ推論の結果だけでなく推論過程を明示するためには合理的な範囲で中間の推論結果が必要である．これらの要請を表す概念がルールブロックである．

ルールブロック（表6）は，中間結果が要請される推論の小節をその範囲とし，必要なユニバースルール群の逐次処理を行う．ルールブロックには前件部と後件部が指定されており，ルールブロック内部での推論の前提や目標となると同時に，推論の中間結果として次のルールブロックへ渡される．

なお，素ルールのファジィ関係への展開に用いる演算子タイプ（表7）は素ルール毎に指定されるほか，default としてユニバースルール，ルールブロックで指定される．

表1　ユニバースの表現

表題項目	内　　容
ユニバース名	ラベル（固有のもの）
タイプ名	ユニバースのタイプを示す
素要素	ユニバースに属するすべての要素の指定 有限離散数値タイプ：全素要素の列挙 有限シンボルタイプ：　〃 直積タイプ：直積されるユニバース名列挙

表2　ファジィ集合（ラベル付き）の表現

表題項目	内　　容
ファジィ集合名	ラベル（固有のもの）
帰属ユニバース名	ラベル（帰属ユニバースのもの）
メンバーシップ関数	各素要素ごとにグレードを指定する

表3　事実・証拠・推論結果の表現

表題項目	内　　容
対象	ラベル（対象のもの）
タイプ	事実・証拠，推論結果の別
帰属ユニバース名	ラベル（帰属ユニバースのもの）
メンバーシップ関数	各素要素ごとにグレードを指定する

表4　素ルールの表現

表題項目		内　　容
素ルール名		ラベル（固有のもの）
前件部	対象	ラベル（対象のもの）
	属性名	ラベル（属性のユニバースのもの）
	属性値	ラベル（属性ユニバースのファジィ集合）
	・・・	・・・
後件部	対象	ラベル（対象のもの）
	属性名	ラベル（属性のユニバースのもの）
	属性値	ラベル（属性ユニバースのファジィ集合）
	信憑性	信憑性のグレードを指定する
	・・・	・・・
演算子タイプ		ファジィ関係の展開に用いる演算子タイプ

表5　ユニバースルールの表現

表題項目		内　　容
ユニバースルール名		ラベル（固有のもの）
前件部	対象	ラベル（対象のもの）
	属性名	ラベル（属性のユニバースのもの）
	・・・	・・・
後件部	対象	ラベル（対象のもの）
	属性名	ラベル（属性のユニバースのもの）
	・・・	・・・
else	対象	ラベル（対象のもの）
	属性名	ラベル（属性のユニバースのもの）
	属性値	ラベル（ユニバースのファジィ集合）
	信憑性	信憑性のグレードを指定する
	・・・	・・・
統合の範囲		ラベル（範囲内の素ルール）の列挙
演算子タイプ		defaultの演算子タイプ

表6　ルールブロックの表現

表題項目		内　　容
ルールブロック名		ラベル（固有のもの）
前件部	対象	ラベル（対象のもの）
	属性名	ラベル（属性のユニバースのもの）
	・・・	・・・
後件部	対象	ラベル（対象のもの）
	属性名	ラベル（属性のユニバースのもの）
	・・・	・・・
推論の小節		ラベル（範囲内のユニバースルール）の列挙
演算子タイプ		defaultの演算子タイプ

表7　演算子タイプ

∧ t-norm		∨ t-conorm	
論理積	min(a , b)	論理和	max(a , b)
代数積	a・b	代数和	a + b - a・b
限界積	max(a + b - 1, 0)	限界和	min(a + b , 1)

4．ファジィ推論基本処理方式の概要

(1) 素ルールのファジィ関係への展開

素ルールを近似推論方式によって以下のようなファジィ関係に展開する（以下の例では，対象を X,Y,･･･，属性ユニバースを A,B,･･･，属性値ファジィ集合を a,b,･･･で表す）．

(1-1) 前件部1・後件部1の場合（例1）

(1-2) 前件部・後件部での論理結合の展開

前件部の論理結合は積結合であり，素ルールの適用条件を限定する（例2）．後件部の論理結合は，和結合であり直積空間での可能性分布を表現する（例3）．これらの展開は，素ルールの前件部・後件部自体を分解して記述した素ルール群とは意味が異なるので注意を要する．

(1-3) 信憑性演算

信憑性 p は，事実・証拠を表すファジィ集合，素ルール後件部・ｅｌｓｅルールのファジィ集合を（例4）のように限定する．

(2)ユニバースルールとルールブロックの展開

近似推論方式では，ファジィ関係の合成によりさまざまな推論ルールを統合し，並列・多段推論処理を一括・一段推論に置き換えることが可能である[2]．しかし，推論処理の規模の制約や，推論結果の解釈の目的から，統合の範囲を限定し，推論処理の規模を制約したり，適切な中間結果を得たい場合がある．本稿では，ユニバースルールとルールブロックにより，これらの任意設定が可能な推論方式を提案する．

(2-1) ユニバースルール

ユニバースルールは一括推論を行う範囲を明確に指定する．

一括推論の原則として，同一の属性ユニバースを前件部，後件部に持つ素ルール群は一括し，ファジィ関係を合成して処理を行う．ｅｌｓｅルールは一括処理されるルール群の前件部すべての否定に対するルールとして処理を行う（例5）．

一方，（例6）のように多様な前件部・後件部をもつ素ルールや逐次推論となる素ルールは，原則として，別々のユニバースルールとする．ただし，ユニバースルールの［統合の範囲］において明示された素ルールは，これを一括処理する．（例5）と同様に，それぞれの素ルールをファジィ関係で表したのち，内包するユニバース全体の直積に対して円筒状拡張し，積結合によって統合する．ただし，ユニバースルールの前件部・後件部は，ユニバースルールの指定（表5）に従うものとして処理を行う．

(2-2) ルールブロック

ルールブロックは，推論において中間結果が要求されない範囲を示す．複数のユニバースルールを含むルールブロックでは，これらの間の推論ルートを解析し，逐次推論を行う．但し，ルールブロックに指定（表6）されたもののほか，ブロック内で生成された推論の中間結果はブロック外では保持されない．

(3) 逐次推論のルート解析

ファジィ推論基本処理では，事実・証拠ベースから可能な全ての推論結果に至る前向き推論ルート，または，ゴール（対象と属性ユニバース）から事実・証拠ベースへ至る見かけ上の逆向き探索ルート，のどちらかのルートに従って推論が行われる．

推論ルートは，ルールブロックやユニバースルールの前件部・後件部と事実・証拠集合（およびゴール）の適合度評価によって決定される．事実・証拠としては，事実・証拠ベースにない対象・属性はユニバース全体を可能性分布として持つ無知の状態を指すと解釈でき，近似推論の実行上はユニバース全体を投入する．ただし，推論ルート解析では，無知の状態を除く事実・証拠の存在状態と，ルールの前件部・後件部が要求する事実・証拠との適合度の評価を行う．ルート決定はまずルールブロック間について行い，次にルールブロック内のユニバースルール間について行う．

(4) 異なるルートからの同一対象・同一属性ユニバース上への推論結果は，Ⓐによって統合する．

(5) 説明機能

ファジィ推論基本処理の推論過程説明機能として，ルールブロック間の推論ルートと中間推論結果の状態，ルールブロック内のユニバースルール間の推論ルートが保持され，説明要求に応える．

(例1) if A of X is a on A then B of Y is b on B
A of X is a' on A

B of Y is b' on B

R(a on A; b on B) = (1 on A - a on A) Ⓥ b on B

b' on B = a' on A ∘ R(a on A; b on B)

(例2) if A of X is a on A and B of Y is b on B
then C of Z is c on C
A of X is a' on A and B of Y is b' on B

C of Z is c' on C

R(a on A, b on B; c on C)
= (1 on A - a on A)Ⓥ(1 on B - b on B)Ⓥ c on C
c' on C
= (a' on A Ⓐ b' on B) ∘ R(a on A, b on B; c on C)

(例3) if A of X is a on A
then B of Y is b on B or C of Z is c on C
A of X is a' on A

(B of Y is b' on B)Ⓥ(C of Z is c' on C)

R(a on A; b on B) = (1 on A - a on A) Ⓥ b on B

b' on B = a' on A ∘ R(a on A; b on B)

R(a on A; c on C) = (1 on A - a on A) Ⓥ c on C

c' on B = a' on A ∘ R(a on A; c on C)

(例4) a on A with p = a on A Ⓥ (1 - p)

(例5) if A of X is a_1 on A then B of Y is b_1 on B
if A of X is a_2 on A then B of Y is b_2 on B
else B of Y is b_3 on B
A of X is a' on A

B of Y is b' on B

R_1(a_1 on A; b_1 on B) = (1 on A - a_1 on A)Ⓥb_1 on B

R_2(a_2 on A; b_2 on B) = (1 on A - a_2 on A)Ⓥb_2 on B

R_3(～a_1 on A; b_3 on B) = a_1 on A Ⓥ a_2 on A Ⓥb_3 on B

R(A;B) = R_1(a_1 on A; b_1 on B)ⒶR_2(a_2 on A; b_2 on B)
ⒶR_3(a_1 on A; b_3 on B)

b' on B = a' on A ∘ R(A;B)

(例6) if A of X is a_1 on A then C of Z is c_1 on B
if A of X is a_2 on A and B of Y is b_1 on B
then C of Z is c_2 on C
if A of X is a_3 on A
then B of Y is b_2 on B or C of Z is c_3 on C
if A of X is a_4 on A then B of Y is b_3 on B
if B of Y is b_4 on B then C of Z is c_4 on C

5．プロトタイプシステムによるファジィ推論基本処理の応用例

以上提案したファジィ推論基本処理方式の実現を μ-LISP 上で図っている[3)4)]．

応用例として，図２の推論ダイアグラムのもとでルールブロック・ユニバースルールを設定し，一括推論と逐次推論の組合せによる推論能力の向上と説明能力の確保を両立させることができることを以下に示す．原則的なユニバースルール・ルールブロックの構成（例７），前件部での一部条件の欠落（例８ UR#2），ルールの信憑性（例８UR#2），ｅｌｓｅルール（例９ UR#2），ルールブロック内の推論ルート（例１０）等が示されている．なお，ここではファジィ集合の帰属ユニバースの記述を省略した．

末尾ながら，本方式の提案に当たり(株)数理計画の上村 定 氏，石川博久氏に多大な支援を賜ったことを記して感謝する．

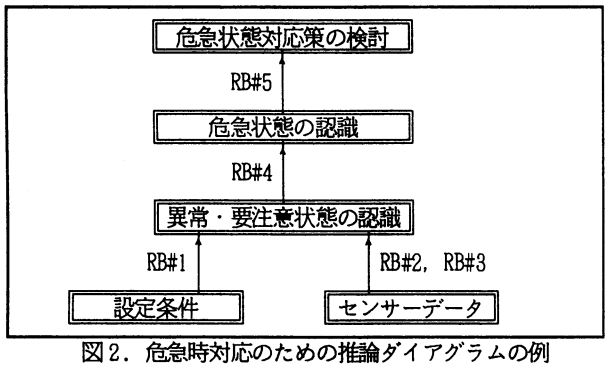


図２．危急時対応のための推論ダイアグラムの例

```
(例７) RB#1 ＜設定条件→可燃性＞
UR#1
    if   材料 of 住宅躯体 is CONCRETE
    then 可燃性 of 住宅躯体 is LOW
              ・・・
UR#2
    if   材料 of 調理場壁面内装 is SOIL
    then 可燃性 of 調理場壁面内装 is LOW
              ・・・
UR#3
    if   火災荷重 of 調理場収納物 is LOW
    then 可燃性 of 調理場収納物 is LOW
              ・・・
```

```
(例８) RB#2 ＜センサーデータ→調理状態＞
UR#1
    if   ガス流量 of 調理場 is NOT LOW
    then 調理活動 in 調理場 is ACTIVE
              ・・・
UR#2
    if   温度 of 調理部位 is MODERATELY HIGH
    and  温度持続時間 of 調理部位 is MIDDLE
    and  油蒸気 of 調理場 is NOT LOW
    then 加熱異常 of 調理油 is MIDDLE with 0.8

    if   温度 of 調理部位 is HIGH
    and  温度持続時間 of 調理部位 is NOT SHORT
    and  油蒸気 of 調理場 is NOT LOW
    then 加熱異常 of 調理油 is HIGH with 0.9

    if   温度 of 調理部位 is VERY HIGH
    and  油蒸気 of 調理場 is HIGH
    then 加熱異常 of 調理油 is VERY HIGH with 0.9
              ・・・
```

```
(例９) RB#3 ＜センサーデータ→在宅者状態＞
UR#1
    if   人数 of 調理場 is ZERO
    then 無人状態 of 調理場 is VERY HIGH
              ・・・
UR#2
    if   人数 of 居間 is ZERO
    then 支援者状態 of 調理場 is IMPOSSIBLE

    if   人数 of 寝室 is ZERO
    then 支援者状態 of 調理場 is IMPOSSIBLE
              ・・・
    else 支援者状態 of 調理場 is POSSIBLE
```

```
(例１０) RB#4 ＜状態認識→調理油火災可能性＞
UR#1
    if   加熱異常 of 調理油 is MIDDLE
    and  調理活動 of 調理場 is ACTIVE
    and  無人状態 of 調理場 is VERY HIGH
    then 火災可能性 of 調理油 is POSSIBLE

    if   加熱異常 of 調理油 is MIDDLE
    and  調理活動 of 調理場 is ACTIVE
    and  無人状態 of 調理場 is VERY HIGH
    then 火災時間進行性 of 調理油 is RAPID

    if   加熱異常 of 調理油 is MIDDLE
    and  調理活動 of 調理場 is ACTIVE
    and  無人状態 of 調理場 is VERY HIGH
    then 火災空間拡大性 of 調理油 is WIDE

UR#2
    if   火災可能性 of 調理油 is POSSIBLE
    and  可燃性 of 住宅躯体 is LOW
    and  可燃性 of 調理場壁面内装 is LOW
    and  可燃性 of 調理場収納物 is LOW
    then 火災物的被害度 of 調理油 is LOW
              ・・・
```

```
(例１１) RB#5 ＜危急認識→報知必要性＞
UR#1
    if   火災可能性 of 調理油 is POSSIBLE
    and  無人状態 of 調理場 is VERY HIGH
    and  支援者状態 of 調理場 is POSSIBLE
    then 報知必要性 of 支援者 is VERY HIGH

    if   火災可能性 of 調理油 is POSSIBLE
    and  無人状態 of 調理場 is VERY HIGH
    and  支援者状態 of 調理場 is IMPOSSIBLE
    then 報知必要性 of 外部 is VERY HIGH
              ・・・
```

1) L.A.Zadeh： Fuzzy Logic and Approximate Reasoning, Synthese, 30, 407/428, 1975.
2) 水本雅晴：ファジィ集合とファジィ推論，第３回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，37/48，1987.
3) 中村和男他：居住空間における危急事態に関するシステムアプローチ(6)，日本建築学会大会学術講演梗概集，1990.
4) 横山一也他：同上(7)，同上.

＜問い合わせ先＞：〒305 つくば市東1-1-4
製品科学研究所 小木 元
Tel.0298-54-6654 Fax.0298-54-6608

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FB2-1

ファジィ・フレーム・システムについて
— ファジィ・プロダクション・システムとの結合 —
Fuzzy Frame System
— Integration of Fuzzy Frame System and Fuzzy Production System —

角井 将史* 馬野 元秀** 宮原 秀夫*
Masashi Kakui Motohide Umano Hideo Miyahara

*大阪大学 基礎工学部
Faculty of Engneering Science, Osaka University

**大阪大学 大型計算機センター
Computation Center, Osaka University

Abstract

Frame is a method of knowledge representation, which is proposed by M.Minsky in 1975 for comprehension of human inference and memory. Many researchers have applied it to various fields and some software systems were developed. Human inference, thinking and judgement are, however, based on fuzzy knowledge. It is difficult for conventional frame systems to represent such fuzzy knowledge.

We have developed a fuzzy frame system, which has ability to represent fuzzy value, fuzzy certainty factor and fuzzy inheritance. In this paper, we describe a mechanism of attached procedure in this system, where fuzzy production system are invoked to execute a rule type of fuzzy inference. We illustrate the mechanism using several examples.

1 はじめに

知識の表現手法の1つにフレームがある。これは、人間の記憶構造や推論を理解するための基礎として、1975年にM.Minskyによって提案された[1]。その後、フレーム理論は多くの研究者によって利用され、フレームをベースにしたソフトウェアもいくつか作成されている。

ところが、現実の世界においては多くの知識はあいまいである。人間はこのようなあいまいな知識をもとにして推論、思考、判断を行っているが、従来のフレームでこのようなあいまいな知識を表現することは困難である。そこで、あいまいさをファジィ集合で表現することが可能なファジィ・フレーム・システムを作成した[2]。今回はこのシステムの付加手続き機能と、この機能を利用してファジィ・プロダクション・システムを起動しファジィ推論を行なわせる方法について述べる。

2 ファジィ・フレーム・システム

ファジィ・フレーム・システムは、フレーム・システムに次のような拡張を行なったシステムである[2]。

1. スロットの値のファジィ集合化
2. スロット値に対する確信度の設定とそのファジィ集合化
3. 継承の度合いの設定とそのファジィ集合化
4. スロットの重要度の設定とそのファジィ集合化

2.1 ファジィ・フレーム・システムの機能

ファジィ・フレーム・システム(以下FFSと略す)では、スロット値として"大きい"、"小さい"のようなファジィなデータを記述することができる。また、それぞれのスロットにスロット値の確信度を設定することができ、それをファジィ真理値で記述することも可能である。例えば、

「トラック」の「大きさ」が"大きい"という確信度が"まあ正しい"
をFFSで記述すると、

```
(%def-class トラック
      (大きさ  (%value (大きい  まあ正しい))))
```

となる。ここで"大きい"は区間[1, 10]上の、"まあ正しい"は区間[0, 1]上のファジィ集合で、例えば、次のようにして設定される。

```
(setq 大きい  {0.1/6, 0.2/7, 0.7/8, 1/9, 1/10})
(setq まあ正しい  {0.2/0.6, 0.5/0.7, 0.7/0.8, 1/0.9, 1/1})
```

また、継承の度合いを設定することによりファジィな継承を記述することもできるが、これについては文献[2]を参照されたい。

2.2 付加手続き

フレーム・システムの特徴の1つとして付加手続きがある。これはスロットに関数を記述し、そのスロットの値が検索、追加、

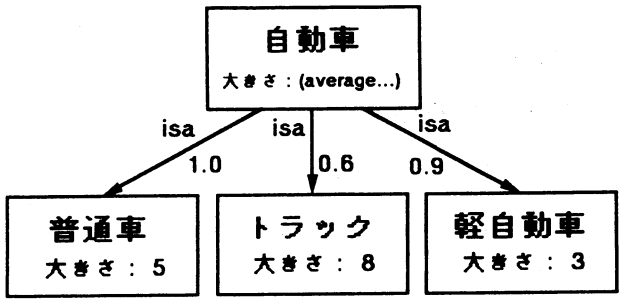


図 1: 自動車を頂点とした簡単な世界を表現したフレーム

更新、削除された場合に、その関数を起動する機能である。検索が行なわれる場合には、その関数の結果の値がスロットの値とみなされる。知識表現言語としてのフレームにおいては、付加手続きを起動することが推論にあたる。次に付加手続きを利用した簡単な例を示す。

[例 1] 図 1のような世界があるとする。ここでは、自動車を頂点とした階層構造が表現されている。クラス「自動車」がその下位概念として「普通車」、「トラック」、「軽自動車」を持っている。フレーム・システムでは下位概念をサブクラス、上位概念をスーパークラスと呼ぶ。本システムではこれを示すスロットをそれぞれ super と sub としている。

ここで、クラス「自動車」の「大きさ」をそのサブクラス群のスロット「大きさ」の重みつき平均として求めたいとする。

図 1は本システムでは次のように記述される。

```
(%def-class 自動車
      (sub (%value (普通車 1.0) (トラック 0.6) (軽自動車 0.9)))
      (大きさ (%if-needed (average (%get-sub-class '自動車)))))
(%def-class 普通車
      (super (%value 自動車))
      (大きさ (%value 5)))
(%def-class トラック
      (super (%value 自動車))
      (大きさ (%value 8)))
(%def-class 軽自動車
      (super (%value 自動車))
      (大きさ (%value 3)))
```

ここで、「大きさ」は区間[1, 10]の値で表現されている。(%get-sub-class クラス名)は継承の度合いつきのサブクラスリストを返す FFS の関数で、今はこの結果は((普通車 1.0) (トラック 0.6)(軽自動車 0.9))となる。関数(average サブクラス名リスト)は、サブクラス名リストのクラスのスロット「大きさ」のスロット値とそのクラスの確信度から、平均の「大きさ」を計算し、その結果を返す。

そして、「自動車」のスロット「大きさ」を検索すると、

```
>(%get-slot-val '自動車 '大きさ)
(5.0 1)
```

となる。(%get-slot-val)は本システムのスロット値検索関数である。このようにクラス「自動車」のスロット「大きさ」が検索されると、%if-needed がこのスロット値が検索された時の付加手続きを表しているので関数 average が起動され、その結果 5.0 とスロット値の確信度 1 がスロットの値として得られることになる。

3 フレームとプロダクション・システムとの結合

3.1 ファジィ・プロダクション・システム

ファジィ・プロダクション・システムとは、ファジィ理論を応用し、あいまいな知識の表現を可能にしたプロダクション・システムである。

ルールの条件部が持つあいまいさと、データが持つあいまいさとその確信度のあいまいさを表現することが可能で、ファジィ・パターン・マッチングにより条件部のマッチングを行ないながら推論を進めていくシステムである[3]。

ファジィ・プロダクション・システムは

if 条件部 then アクション列

のような形式のルールの集まりであるルールベース(以下 RB と略す)と、ワーキングメモリ(以下 WM と略す)を持っている。この WM と RB の条件部とのマッチングを行い、マッチ度が一番高いルールのアクション列を実行するシステムである。システムは、RB のアクション列で停止の命令が出るか、WM が RB の条件部とまったくマッチしなくなると停止する。

3.2 フレームとプロダクション・システムの結合

付加手続き機能を利用して FFS からファジィ・プロダクション・システム(以下 FPS と略す)を起動する関数を作成し、階層構造を持ったルール群の管理を可能にした。

実際には関数$fps 等を使用して FPS を FFS 内から呼び出している。

[例 1] まず、図 2のような自動車を頂点とする 1つの世界を考える。ここでは自動車とその構成部品が part of と whole of の関係で結ばれている。これは、下位概念が上位概念の一部分を構成している関係を表している。すなわち、この世界では「自動車」は「エンジン」、「バッテリー」、「トランスミッション」などから構成されているわけである。

これは FFS では、次のように表現される。

```
(%def-class 自動車
      (part-of ( エンジン トランスミッション バッテリー ...))
      (トラブル (%if-needed ($fps (rules 自動車 ... )
            (working-memeory 自動車-トラブル ... ))))
(%def-class エンジン
      (whole-of (自動車))
      (トラブル (%if-needed ($fps (rules エンジン ... ))))
(%def-class バッテリー
      (whole-of (自動車))
      (トラブル (%if-needed ($fps (rules バッテリー ... )))
      (状態 (%value 9))
      (蒸留水 (%value 10)))
        ......
```

ここで、($fps WM や RB 等の記述)は WM や RB の記述の解釈を行ない、その WM と RB を使用して推論を行なう関数である。そして、FFS に「自動車のトラブルの原因は何か？」という意味の次のような質問をする。

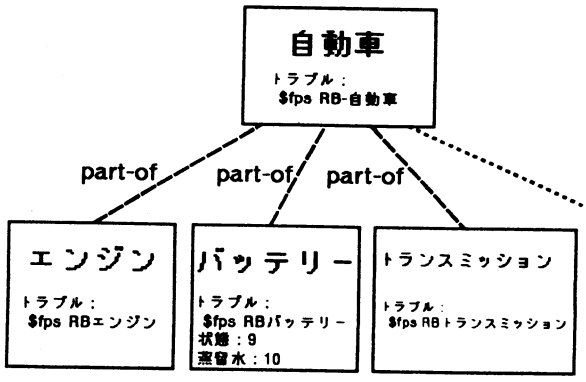


図 2: 自動車の故障診断を行なうフレーム

>(%get-slot-val 'automobile 'trouble)

FFS はその質問に従いクラス「自動車」のスロット「トラブル」を検索する。これにより RB が「自動車」で WM が「自動車-トラブル」という状態で、ファジィ・プロダクション・システムを起動する。

ここで使用される非常に簡単な RB「自動車」が、例えば次のようなものであるとする。

1. もしエンジンがスタートしないが、セルモーターの音がしているなら、エンジンの故障診断を行う。
2. もしエンジンがスタートせず、セルモーターの音もせず、ライトもつかないなら、バッテリーの故障診断を行う。
3. もしエンジンはスタートするが、異常音が下方から聞こえるなら、トランスミッションの故障診断を行う。

これを FPS で記述すると次のようになる。

```
(rules 自動車
(r1 if (エンジン スタートしない)(セルモーターの音 聞こえる)
      (*get-cf @(%get-slot-val 'エンジン 'トラブル))
    then
      (*set 自動車-結論 (*tofset ((=match (エンジン 異常)))))
      (fps-return @(combine-cf 自動車-結論 エンジン-結論)))
(r2 if (エンジン スタートしない)(セルモーターの音 聞こえない)
      (ライト 点灯しない)
      (*get-cf @(%get-slot-val 'バッテリー 'トラブル))
    then
      (*set 自動車-結論 (*tofset ((=match (バッテリー 異常)))))
      (fps-return @(combine-cf 自動車-結論 バッテリー-結論)))
(r3 if (エンジン スタートしない)(異常音 (下方 聞こえる))
      (*get-cf @(%get-slot-val 'トランスミッション 'トラブル))
    then
      (*set 自動車-結論
      (*tofset ((=match (トランスミッション 異常)))))
      (fps-return
        @(combine-cf 自動車-結論 トランスミッション-結論))))
```

ここで、(get-cf 結論)は引数の結論の確信度を取り出す関数である。そして、(combine-cf 結論 1 結論 2 [引数 3])は結論 1 に結論 2 を付け加え、結論全体の確信度を計算してその結果を引数 3(省略した場合は結論 1)に格納する関数である。(tofset ((確信度 結論)))は { 確信度/結論 } というファジィ集合を作成するファジィ集合処理システム[4]の関数である。(fps-return 引数)は FPS を停止させ、その返り値として引数を返す関数である。また、自動車-結論、エンジン-結論、バッテリー-結論にはそれぞれのクラスの RB による結論が格納されている。

いま自動車の状態が

「エンジンがかからなくて、ライトが点灯しなくて、セルモーターの音がせず、異常音は聞こえない」

であるとする。これは次のように記述される。

```
(working-memory 自動車-トラブル
    {(エンジン スタートしない)(ライト 点灯しない)
     (セルモーターの音 聞こえない)(異常音 聞こえない)})
```

推論が開始されると WM を参照して、RB の条件部のマッチ度が最高のルールを探す。まず、r1 の条件部の(エンジン スタートしない)のマッチングが行なわれマッチ度が 1 となる。そして次の(セルモーターの音 聞こえる)はマッチ度 0 で、FPS では、通常、論理積(and)の演算に *min* を使用するため、結局ここまでのマッチ度は $1 \wedge 0 = 0$ となり、次のルールを調べる。r2 の条件部も同様に調べると、(エンジン スタートしない)(セルモーターの音 聞こえない)(ライト 点灯しない)が全てマッチして $1 \wedge 1 \wedge 1 = 1$ となる。FPS では RB の条件部の通常のアトムとリストは WM とのマッチングを行なうが、前に*がある場合はそれを関数として評価し、@がある場合はそれを Lisp として評価するようになっている。そのために次の(*get-cf @(%get-slot-val 'バッテリー 'トラブル)) では、FFS のスロット値を求める関数%get-slot-val が起動され、クラス「バッテリー」のスロット「トラブル」を検索する。このスロットにも FPS を起動する関数$fps があるので、FPS が新しい RB について起動される。その RB は、例えば次のようなものである。

1. もしバッテリーの蒸留水が古いならば、蒸留水が不足していると判断する。
2. もし以前の検査などでバッテリーの状態が悪いことがわかっていたならば、バッテリーアップと判断する。
3. もしそうでなければ、バッテリー本体が故障していると判断する。

これを FPS で記述すると次のようになる。

```
(rules RB-バッテリー
(r1 if @(old (car (%get-slot-val 'バッテリー '蒸留水))) then
    (fps-return (*set バッテリー-結論
    (*tofset (=match (蒸留水不足))))))
(r2 if @(good (car ((get-slot-val 'バッテリー '状態)))) then
    (fps-return (*set バッテリー-結論
    (*tofset (=match (バッテリーアップ))))))
(r3 if @(nogood (car (get-slot-val 'バッテリー '状態))) then
    (fps-return (*set バッテリー-結論
    (*tofset (=match (本体 故障)))))))
```

ここで、(old 引数)(good 引数)(nogood 引数)はそれぞれ引数の old 、good 、nogood の度合いを求める関数である。

この RB で結果的に r2 が最大のマッチ度を持ち、マッチ度 0.9 で起動したとするとバッテリー-結論に

{ 0.9/(バッテリーアップ) }

が書き込まれ、fps-returnによりこの値が返され、このRBの推論は停止する。そして上位クラス「自動車」のRBの推論に制御が戻る。

r2の今までの条件のマッチ度が1であったので、この確信度0.9とのminがとられルールr2のマッチ度は0.9となる。そして、残りのr3が調べられ、これのマッチ度は0となるので、その結果RB-自動車において実行されるルールはr2となる。そのアクション列が実行され、combine-cfにより自動車-結論にバッテリー-結論が加えられ、

({1/(バッテリー　異常)　0.9/(バッテリーアップ)}　0.9)

が値として返される。ここで各RBにおいて得られた結論の確信度1と0.9から結論全体の確信度0.9を求めている。その計算にはminを用いている。この意味は

「バッテリーに異常がある確信度は1で、バッテリーがバッテリーアップを起こしている確信度が0.9であり、総合してこの推論の確信度は0.9である。」

といったものである。

このようにFFSとFPSを組み合わせることにより、階層的なルールの記述が可能となる。これによりクラス単位でルールの変更を行なうことが可能であり、保守性も向上する。

またスロットの継承の機能を利用して、あるサブクラスについての推論をその上位クラスのRBを使用して行なうこともできる。その場合、最初にRBを起動したクラスの固有情報と、その一般化された概念である上位クラスのRBの両方の知識を利用することが可能である。

例えば、図3のような世界で、自動車のサブクラス「1989年型自動車」において、「トラブルの原因は何か？」といった質問、すなわち、スロット「トラブル」が検索されたとする。このクラスにはスロット「トラブル」が存在しないので、そのスーパークラス「自動車」のスロット「トラブル」が検索される。それにより、「自動車」のRBの推論が開始される。そのRBの条件部に、このルールが呼ばれたクラスの固有情報を調べる関数を記述することにより、一般的法則と固有情報による判断の結合を自然に表現することができる。この場合では、例えば「1989年型自動車」に搭載されている「A型エンジン」のスロット「欠陥」を検索して調べてみるといったことが考えられる。

また、ここでは述べなかったが、下位クラスのRBを呼ぶ関数群をアクション列に記述し、FPSのいくつかの機能を使用することによって、負荷が大きいサブクラスのRBの推論を起動する回数を減らし、実行速度を向上させることも可能である。

4　結論

本報告では主にファジィ理論を利用したフレーム・システムにおける付加手続きの機能とそれを利用してファジィ・プロダクション・システムとファジィ・フレーム・システムとの結合を行なう手法について述べた。フレームにファジィ理論を応用することにより、今までは表現できなかったあいまいな情報を表現できるようになり、また、ファジィ・プロダクション・システムを利用することにより、フレームのスロットデータとしてルールを記述し、フレーム中からファジィ推論を行なわせることが可能になった。

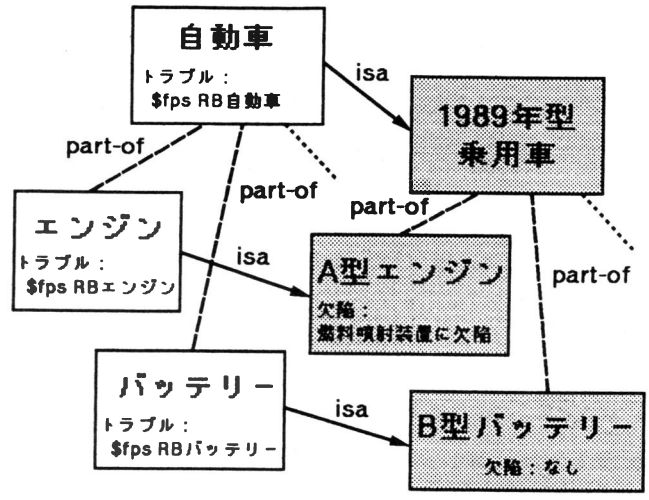


図3: 自動車を頂点とした階層構造を表現したフレーム

本システムはUNIX 4.3 BSD上のSun Common Lispを用いて作成した。ただし、ファジィ集合の表現と処理についてはファジィ集合処理システム[4]を利用している。

[謝辞]
本研究を行なうにあたり、ファジィ・プロダクション・システムの部分については、関西大学大学院工学研究科の中嶋直紀君に協力して頂いた。深く感謝致します。

References

[1] Minsky, M.: "A Framework for Representing Knowledge", in The Psychology of Computer Vision, edited by P.H.Winston, McGraw-Hill Book Company (New York, USA), 1975. (白井、杉原訳:コンピュータービジョンの心理、産業図書、1979)

[2] 角井、馬野、宮原:「ファジィ理論に基づくフレーム・システムの実現」、情報処理学会第39回(平成元年後期)全国大会、pp.359-360 (1989)。

[3] 馬野、江澤、中嶋:「ファジィ・プロダクション・システムの拡張－作業記憶の分割と複数ルールの実行－」、情報処理学会第39回(平成元年後期)全国大会、pp.363-364 (1989)。

[4] 馬野、久米:「Lispによるファジィ集合処理システムの概要」、情報処理学会第35回(昭和62年後期)全国大会、pp.791-792、No.7Q-1、1987。

[問い合わせ先]
〒567 大阪府茨木市美穂ヶ丘5-1
大阪大学 大型計算機センター
馬野 元秀
TEL　: 06-877-5111　(ext. 2834)
JUNET : umano@center.osaka-u.ac.jp

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FB2-2

ファジィ・プロダクション・システムにおけるファジィ・パターン・マッチングについて

Fuzzy Pattern Matching in Fuzzy Production System

馬野 元秀
Motohide UMANO
大阪大学 大型計算機センター
Computation Center, Osaka University

Abstract : We have proposed Fuzzy Production System which can represent fuzzy data and fuzzy rules using fuzzy predicates (fuzzy sets) and possibility distributions. The system matches fuzzy predicates in rules and possibility distributions in data, selects the best matched rule and executes the associated action part. In this paper, we describe several useful features on fuzzy pattern matching to change functions for computing the degree of matching, use 3 level of threshold values and put Lisp function in condition part in rules.

1. はじめに

エキスパート・システムなどの知的システムを作成するために、プロダクション・システムがよく用いられている。しかし、人間の有用な知識の多くは不正確であいまいであり、普通のプロダクション・システムでは、うまく表現し、利用することができない。

そこで、我々は、ファジィ述語(ファジィ集合[1])と可能性分布[2]を用いて、このようなあいまいな知識を表現・利用できるようにプロダクション・システムを拡張し、「ファジィ・プロダクション・システム」を作成した[3),4)]。このファジィ・プロダクション・システムでは、データやルールの条件部と動作部にファジィ述語(ファジィ集合)や可能性分布を書くことができ、ファジィ・パターン・マッチングにより条件部が最もよくマッチしたルールの動作部を実行するという形で前向きに推論を進めていく。

文献[3),4)]では、パターン・マッチングとシステムの機能の概要を述べた。本論文では、より柔軟なファジィ・パターン・マッチングの機能について述べる。

2. ファジィ・プロダクション・システムの概要

ファジィ・プロダクション・システムでは、ファジィ述語(ファジィ集合[1])と可能性分布[2]を用いて、あいまいなデータとあいまいなルールを記述することができる[3)]。データの集まりを作業記憶と呼び、ルールの集まりをルールベースと呼ぶ。そして、作業記憶中のファジィ・データと各ルールの条件部とのマッチングの度合いを調べて、最も良く一致するルールを選びだし（複数個でもよい)、そのルールの動作部を実行する。

[例1]

```
(predicates
  (small  (u) (getgrade {1/1, 0.8/2, 0.3/3} u))
  (middle (u) (getgrade {0.6/2, 1/3, 0.5/4} u))
  (large  (u) (getgrade {1/5, 0.8/4, 0.3/3} u)) )
(terms
  (true   {1/1, 0.7/0.9, 0.3/0.8})
  (about3 {0.4/2, 1/3, 0.4/4}) )

(working-memory
  {0.7/(d1 3), true/(d2 about3)})
(rules
  (r1
    if (d1 small(=x1)) (d2 large(=x2))
    then (write
           (r1 -- (d1 =x1) (d2 =x2) with =match))
         (stop) )
  (r2
    if (d1 middle(=x1)) (d2 middle(=x2))
    then (write
           (r2 -- (d1 =x1) (d2 =x2) with =match))
         (stop) )
  (r3
    if (d1 large(=x1)) (d2 small(=x2))
    then (write
           (r3 -- (d1 =x1) (d2 =x2) with =match))
         (stop) ))
```

〈実行結果〉

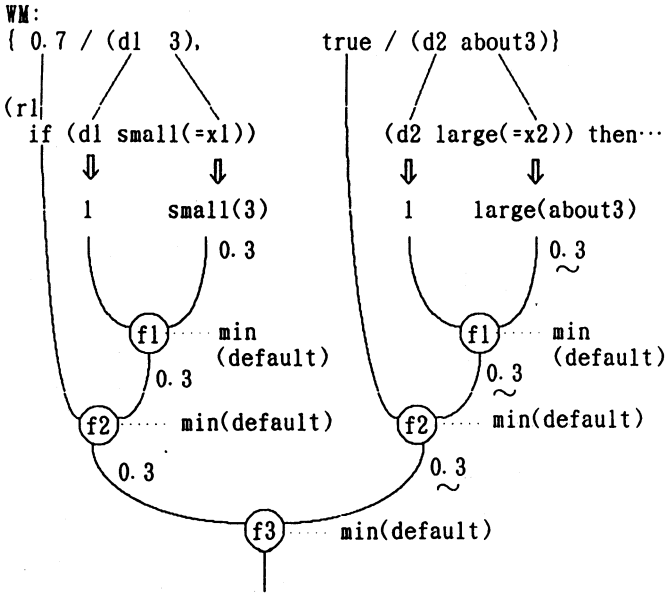
```
(r2 -- (d1 3) (d2 about3)
 with {0.4/0.5, 0.4/0.6, 1/0.7})
```

ファジィ・プロダクション・システムは、基本的には、ファジィ・データの 集まりである作業記憶を 定義する working-memory と ファジィなルールを定義する rules の２つからなっている。いまは、作業記憶には可能性分布 true と about3 が含まれている。そして、その可能性分布を定義するのが、terms である。terms で定義した可能性分布はルールの動作部でも使うことができる。

ルールの条件部の small、middle、large をファジィ述語(fuzzy predicate)と呼び、predicates で定義する。predicates では、 ファジィ述語を Lisp の関数の形で定義する。いまは、ファジィ集合に要素を与えて、そのグレードを取り出す関数 getgrade を用いて定義している。

記号 = が付いたものが 変数で、どのようなものとも完全にマッチし、そのときマッチしたものを変数へ代入する。変数 =match は、ルールの条件部がマッチした度合いを表わす特別の変数である。

これを実行させると、例えば、ルール r1 のパターン・マッチングの実行過程は図１のようになる。ここで、可能性分布 about3 に対する 関数 small の値を計算する必要がある。これは「すべての要素に関数を適用し、結果の可能性はもとの要素の可能性を採用する」という



ルール r1 に対するマッチの度合い

図１．ファジィ・パターン・マッチング

1 変数関数に対する拡張原理[5]で計算する。いまは、

small(about3) = small({0.4/2, 1/3, 0.4/4})
= {0.4/small(2), 1/small(3), 0.4/small(4)}
= {0.4/0.8, 1/0.3, 0.4/0}

となる。 次に、1 とこの一致度に関数 f1（デフォールトは min）を適用して、条件全体のマッチ度 d_c を計算し、データの正しさ true とこれとに 関数 f2（デフォールトは min）を適用して、データの正しさを考慮したマッチ度 δ_c を計算する必要がある。これには、「各可能性分布の要素のすべての組み合わせに関数を適用し、結果の可能性は各要素の可能性の min をとる。ただし、結果の要素で同じものが 複数個あるときは、 可能性の max をとり、１つにまとめる」という 2 変数関数に対する拡張原理[5]を用いる。いまは、

d_c = min(1, {0.4/0.8, 1/0.3, 0.4/0})
= min({1/1}, {0.4/0.8, 1/0.3, 0.4/0})
= {1∧0.4/min(1,0.8), 1∧1/min(1,0.3),
1∧0.4/min(1,0)}
= {0.4/0.8, 1/0.3, 0.4/0}

となり、さらに、

δ_c = min({1/1, 0.7/0.9, 0.3/0.8},
{0.4/0.8, 1/0.3, 0.4/0})
= {1∧0.4/min(1,0.8), 1∧1/min(1,0.3),
1∧0.4/min(1,0), 0.7∧0.4/min(0.9,0.8),
0.7∧1/min(0.9,0.3), 0.7∧0.4/min(0.9,0),
0.3∧0.4/min(0.8,0.8),
0.3∧1/min(0.8,0.3), 0.3∧0.4/min(0.8,0)}
= {0.4/0.8, 1/0.3, 0.4/0, 0.4/0.8, 0.7/0.3,
0.4/0, 0.3/0.8, 0.3/0.3, 0.3/0}
= {0.4/0.8, 1/0.3, 0.4/0}

となる。 そして、条件 (d1 small(=x1)) のマッチ度 0.3 と (d2 large(=x2) の マッチ度 {0.4/0.8, 1/0.3, 0.4/0} に関数 f3（これもデフォールトは min）を適用して、条件部全体としてのマッチ度、

min(0.3, {0.4/0.8, 1/0.3, 0.4/0})
= {1/0.3, 0.4/0}

を得る。同様に、ルール r2 とルール r3 に対しては、

r2: {0.4/0.5, 0.4/0.6, 1/0.7}

r3: {1/0.3, 0.4/0}

が得られる。

このようにして得られたマッチングの度合いは、すべて可能性分布である。可能性分布(ファジィ数)の順序関係は、一般的には、半順序関係になり、順序が付かないこともある。本システムでは、順序付けの方法もユーザが定義できるようになっているが、デフォールトでは、重心の値による全順序を利用している。いまは、

r1: (1*0.3 + 0.4*0)÷(1 + 0.4)
= 0.3÷1.4 = 0.2142857

r2: (0.4*0.5 + 0.4*0.6 + 1*0.7)
÷(0.4 + 0.4 + 1) = 0.6333333

r3: (1*0.3 + 0.4*0)÷(1 + 0.4)
= 0.3÷1.4 = 0.2142857

となり、ルール r2 が選ばれる。なお、変数 =match には重心をとる前の可能性分布のマッチ度が入れられる。

3. ファジィ・パターン・マッチング

ユーザは、ファジィ・パターン・マッチングにおける様々な関数やパラメータを自分の目的合わせて変更することができる。

(1)マッチ度を計算する関数の変更

図1を見ても分かるように、マッチングの度合いを計算する関数 f1 ～ f3 は デフォールトとして min を採用しているだけで、ユーザはこれらの関数を簡単に変更することができる。

[例2] 図1の関数 f2 を掛け算に変更するには、

```
(func2 '*)
```

とすればよい。すると、各ルールの条件とのマッチ度は

r1：{0.4/0, 1/0.21} -〉 0.15

r2：{0.3/0.4, 0.4/0.45, 0.3/0.48, 0.4/0.5,
0.4/0.54, 0.4/0.6, 1/0.7} -〉 0.5625

r3：{0.4/0, 1/0.21} -〉 0.15

となる。さらに、f3 を限界積にするには、Lisp により

```
(defun bp (x y)
  (max 0 (+ x y -1)) )
```

のように限界積の関数を定義して、

```
(func3 'bp)
```

とすればよい。すると、各ルールの条件とのマッチ度は

r1：{1/0, 0.4/0.01} -〉 0.0028571

r2：{0.3/0.1, 0.4/0.15, 0.3/0.18, 0.4/0.2,
0.4/0.24, 0.4/0.3, 0.3/0.5, 0.7/0.6,
1/0.7} -〉 0.4071428

r3：{1/0, 0.4/0.01} -〉 0.0028571

となる。

この変更自身をルールの結論部に書くこともできるので、あるルールが動いた場合にはある関数に設定し、別のルールが動いた場合には別の関数に設定することも可能である。

(2)しきい値の設定

通常のプロダクション・システムの拡張として考えると、関数 f1 ～ f3 は and 演算を拡張した t-ノルムであると考えるのが自然である。すると、ルールの条件の数が増えるにつれて条件部全体のマッチ度は減少していくことになる(厳密には、増加しない)。したがって、条件部全体として満たす必要があるマッチ度のしきい値を設定して置くと、条件全体を調べなくても、途中までのマッチ度がしきい値より小さくなれば、全体として、しきい値より大きくなることはないので、残りの条件を調べなくても、処理を中断することができる。そして、しきい値以下のルールは作業記憶のデータとはまったくマッチしなかったと考えるので、バックトラックの対象にもしない。

同じことが、関数 f1 ～ f3 でまとめる所で考えられるので、レベル 1 から 3 まで考えられる。これらは、threshold1 ～ threshold3 という関数で設定する。 マッチ度が可能性分布の場合には、しきい値を越える値の最大グレードにより判断する。

関数 f1 ～ f3 が t-ノルムでない場合や 副作用を利用する場合には、すべての条件を調べる必要があるので、その場合には、しきい値を負にしておくとよい。

(3) Lisp 関数を条件に書く

普通の条件は、作業記憶とのマッチングを行なうが、(*f …) のように 条件のリストの最初の要素が * で始まっている場合には、これを区間[0,1] の数値または可能性分布を値として返す Lisp 関数とみなす。ただし、引数の表記は通常のルールと同じになるので、条件 (*f =x a) は、これより前の条件ですでに代入された変数 =x の値とアトム a を引数として Lisp の関数が呼ばれる。

また、Lisp の変数を使ったり、 表記を Lisp と同じにする記号として @ がある。これを使うと、(*f @x @y) と書いて Lisp の変数 x と y を引数として 関数 f を呼んだり、@(f x 'a) と書いて、Lisp の変数 x とアトム a を引数として、関数 f を呼んだりできる。

これを利用すると、柔軟なパターン・マッチングが可能となる。いくつか例を示そう。

[例3]

① (r1 if (d1 =x) (*f1 =x) then …)

作業記憶とマッチした変数 =x の値が、 f1 という条件を満たしているかどうかを調べる。普通、f1 は Lisp の関数で、=x がある条件を満たしているかどうか などをチェックする。 しかし、f1 はそのようなものに限定する必要はまったくなく、例えば、ニューラル・ネットワークをシミュレートする関数にすれば、ニューラル・ネットワークとのある種の融合を行なうことも可能である。

② (r2 if (d1 =x) (d2 =y) (*ae =x =y) then …)

変数 =x の値が =y の値とほぼ等しいかを調べる。これは①と同類である。関数 ae の定義は、いろいろと考

えられるが、例えば、

```
(defun ae (x y)
  (#&pi (#&abs (#&- x y)) -2 0 0 2))
```

と書ける。ここで、pi はいわゆる π 関数であり、記号 #& は ファジィ集合処理システム[6]の表記法で、Lispの関数をファジィ集合に適用できるようにするためのものである。

③ (r3 if (d1 =x) (d2 =y) (*ge =x =y) then …)

変数 =x の値が =y の値以上かどうかを調べる。関数 ge の定義もいろいろと考えられるが、例えば、

```
(defun ge (x y)
  (let ((mxy (#&max x y)))
    (!(fequal mxy x)/1. !(fequal mxy y)/0)) )
(defun fequal (x y)
  (unless (fsetp x) (setq x (!x)))
  (unless (fsetp y) (setq y (!y)))
  (/ (cardinal (intersection x y))
     (cardinal (union x y))) )
```

と書ける。これは、x が y 以上である度合いを 1 のグレードとして、未満である度合いを 0 のグレードとして返す。関数の定義のなかで、! はファジィ集合の中で評価することを表わすファジィ集合処理システムの表記法である。また、fsetp、cardinal、intersection、union はファジィ集合処理システムの関数で、それぞれ、ファジィ集合かどうかを調べる関数、引数のファジィ集合のグレードの和を計算する関数、共通集合を求める関数、和集合を求める関数である。

④ (r4 if @(init md)
(d1 =x1) @(push grade$1 md)
(d2 =x2) @(push grade$1 md)
(d3 =x3) @(f md)
then …)

条件 (d_1 =x_1) の各マッチ度を Lisp の変数 md に入れておいて、最後に、f で処理を行なう。変数 grade$1 には、直前の条件のマッチ度が入っている。f で各条件のマッチ度の平均を求めるのであれば、関数 init でパターン・マッチングの各レベルのしきい値を負にしておく必要がある。

⑤ (r5 if (*simulate 1 r5)
(r5 x A(=)) (r5 y B(=))
then (select 1) …)

Lisp の関数 simulate は引数 1 を用いてシミュレーションを行ない、その結果を r5 の印を付けて作業記憶に書き出す。それを残りの条件でチェックする。A と B はファジィ述語である。変数に代入する必要ないときは、このように = だけを書いておく。これにより、予見ファジィ制御[7]をシミュレートできる（対象によっては、関数 simulate はかなり大きなプログラムになる）。

4．おわりに

あいまいな概念を可能性分布とファジィ述語（ファジィ集合）で表現し、これらを用いてあいまいなデータとルールを記述できるファジィ・プロダクション・システムにおけるファジィ・パターン・マッチングについて述べた。本システムは、ワークステーション NEWS (SONY 社製) の UNIX 4.3BSD 上の Franz Lisp と KCL (Kyoto Common Lisp)でインプリメントした。ただし、ファジィ集合の処理に関する部分は「Lisp によるファジィ集合処理システム」[6]を使用している。

本システムでは、さまざまなファジィ推論法をサポートしているが、実際の利用に際しては、かなり細かいレベルでの使い勝手が重要である。今後とも、改良を加えていきたい。

[参考文献]

1) L. A. Zadeh (1965) : "Fuzzy Sets," Information and Control, Vol. 8, pp. 338-353.
2) L. A. Zadeh (1978) : "Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility," Fuzzy Sets and Systems, Vol. 1, pp. 3-28.
3) 馬野 (1988) : 「ファジィ・プロダクション・システムとその実現」、計測自動制御学会 関西支部シンポジウム「あいまい情報処理と 知的システム制御」(1988 年 9 月 21 - 22 日)、pp. 75-80。
4) 馬野、江澤、中嶋 (1989) : 「ファジィ・プロダクション・システムの拡張 － 作業記憶の分割と複数ルールの実行 －」、情報処理学会 第 39 回(平成元年後期)全国大会、pp. 363-364、No. 7C-5。
5) L. A. Zadeh (1975) : "The Concept of Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning," Information Sciences, Vol. 8, pp. 199-248; Vol. 8, pp. 301-357; Vol. 9, pp. 43-80.
6) 馬野 (1987) :「Lisp によるファジィ集合処理システム」、第 3 回ファジィ・システム・シンポジウム (1987 年 6 月 1 - 3 日)、pp. 167-172。
7) 安信、宮本、井原 (1984) :「予見 Fuzzy 制御方式による列車自動運転」、システムと制御、Vol. 28、pp. 605-613。

問い合わせ先：567 茨木市美穂ヶ丘５－１
大阪大学 大型計算機センター
馬野 元秀
TEL：06-877-5111 内線 2834
FAX：06-876-3542
JUNET：umano@center.osaka-u.ac.jp

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FB2-3

ファジィ・プロダクション・システムにおける後向き推論の実現

Implementation of Backward Chaining in Fuzzy Production System

馬野 元秀* 江澤 義典** 中嶋 直紀***
Motohide Umano Yoshinori Ezawa Naoki Nakajima

* 大阪大学 大型計算機センター
Computation Center, Osaka University

** 関西大学 工学部
Faculty of Engineering, Kansai University

*** 関西大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engneering, Kansai University

ABSTRACT

A conventional production system can hardly deal with fuzziness of information and knowledge in the real world. Fuzzy Production System based on fuzzy sets have been already implemented which has forward chaining mechanism. Backward chaining, however, is more efficient than forward one when goals are known. In this paper, we describe backward chaining mechanism in Fuzzy Production System, where goals match fuzzy data and fuzzy rules and fuzzy truth values are returned. This system is implemented in Common Lisp and running on SONY NEWS and Sun 4 workstations.

1. はじめに

人工知能の分野では、エキスパート・システムの作成手法としてプロダクション・システムがよく用いられているが、これにより現実世界のあいまいな情報や知識を表現することは非常に難しい。そこで、ファジィ集合の概念を通常のプロダクション・システムに取り入れて、あいまいなデータやルールにより前向き推論を行なうことができるファジィ・プロダクション・システムをすでに作成した[1,2,3]。しかし、ある結果が導かれるかどうかを知りたいときには、前向き推論よりも後向き推論を使用する方が効率的である。そこで、本報告では、このファジィ・プロダクション・システムに新たに追加した後向き推論を行なう機能について述べる。この機能は、作業記憶中のファジィ・データおよびルール部のファジィ・ルールに対してファジィ述語を含む問い合わせを与えたとき、ファジィ・パターン・マッチングによってその問い合わせが成立する度合いを区間 [0, 1] 上のファジィ真理値として返すものである。

2. プロダクション・システムにおける後向き推論

プロダクション・システムにおける後向き推論は、何か求めたい問題(問い合わせ)が与えられたとき、その問い合わせとマッチする結論部を持つルールを探し出し、そのルールを逆向きに使って問い合わせが成り立つかどうかを検証する推論機構であり、前向き推論より効率的な推論方式であると言われている[4]。例えば、

[データ] A1 A2 ··· An

[ルール] if A1 A2 ··· An then B1

があるときに、 B1 という問い合わせをする。データにはマッチするものがないのでルールに対してマッチングを行なうとルールの結論部 B1 とマッチし、条件部 A1 A2 … An が新たな問い合わせとして調べられる。そのすべてがデータ中に存在するので、もとの問い合わせ B1 が成立する。

具体的には次のような手順で進められる。

(1) 問い合わせにマッチする事実(データ)が作業記憶中に存在するかどうか調べる。存在していればその問い合わせは成功し、存在していなければ (2) を行なう。

(2) 問い合わせにマッチする結論部を持つルールを探し、そのようなルールがあれば (3) を行い、なければその問い合わせは失敗する。

(3) ルールの条件部を新たな問い合わせとして、(1) から再帰的にマッチングを行なう。

3. ファジィ・プロダクション・システムにおける後向き推論機能

従来のファジィ・プロダクション・システム[1,2,3]に、あいまいなルールやデータに対してあいまいな問い合わせをすることのできる後向き推論機能を追加した。すなわち、ファジィ述語を含む問い合わせをしたとき、作業記憶中のファジ

ィ集合を含むデータとファジィ集合やファジィ述語を含む後向きルールに対して、ファジィ・パターン・マッチングを行なうことによりその問い合わせの成立する度合を区間 [0, 1] 上のファジィ真理値(一般的にはファジィ集合となる)として返す機能を導入した。

3.1 記述の構成

ファジィ・プロダクション・システムで後向き推論機能を使用するときには、次のように記述する。

[例 1] 後向き推論の記述例

```
(predicates
  (short          (u)  (z  u 150 160))
  (middle         (u)  (pi u 150 170 190))
  (tall           (u)  (s  u 180 190))
  (light          (u)  (z  u  60  70))
  (middle_weight  (u)  (pi u  65  75  85))
  (heavy          (u)  (s  u  80  90)) )

(terms
  (true       {    1/1, 0.8/0.9, 0.5/0.8})
  (about50    { 0.3/45,    1/50,  0.3/55})
  (about80    { 0.3/75,    1/80,  0.3/85})
  (about150   {0.4/145,   1/150, 0.4/155})
  (about180   {0.4/175,   1/180, 0.4/185}) )

(wm  {     (height  Bob      170),
     true/(height John about150),
      0.9/(height Mike about180),
      0.8/(weight  Bob       70),
          (weight John  about50),
     true/(weight Mike  about80) } )

(backward-rules
  (r1 0.9 (size =name S) :-
              (height =name short(=x))
              (weight =name light(=y)))
  (r2 true (size =name M) :-
              (height =name middle(=x))
              (weight =name middle_weight(=y)))
  (r3 (size =name L) :-
              (height =name tall(=x))
              (weight =name heavy(=y))) )
```

(1) ファジィ述語

ルールの条件部および問い合わせで用いるファジィ述語は predicates を使って定義する。例 1 では、z、pi、s を使って、それぞれのメンバーシップ関数をZ関数、Π関数、S関数で定義している。

(2) ファジィ集合

作業記憶などでファジィ・データとして用いるファジィ集合を名前で参照したい場合には terms を使って定義する。

(3) 作業記憶

作業記憶には wm を使ってファジィ・データを設定する。例えば、例 1 の true/(height John about150) はファジィ値 about150 とファジィ真理値 true を持つデータである。

(4) 後向き推論用ルール

後向き推論に用いるルールは backward-rules で設定する。ルールは、

(結論) :- (条件)(条件) ・・・ (条件)

という形式で記述する。例 1 では、身長と体重によってサイズを選ぶルールを記述している。ルール r1 と r2 はそれぞれ、真理値 0.9 および true を持ったルールである。また、ルール r3 の真理値は省略されているので 1 であるとみなされる。また、先頭に = がある記号 (=name、=x、=y) は変数である。

(5) 問い合わせ

(3)、(4) で設定した作業記憶およびルールに対して問い合わせをするときには ?- を使って行なう。また、問い合わせには複数の項を記述できる。

また、(1)、(2)、(3) は、従来の前向き推論機能の場合と共通である。

以下、この記述例に対して問い合わせを行なうマッチングの計算過程について述べる。

3.2 問い合わせと作業記憶のマッチング

まず、例 1 に対して問い合わせをしたときに、作業記憶のデータが直接マッチする場合について述べる。

(1) 数値の真理値を持つデータに対する問い合わせ

まず、通常の後向き推論のようにまったくあいまいさを含まない場合を考えて、「Bob の身長は何 cm ですか ?」という問い合わせをしてみる。

```
> (?-  (height Bob =x) )
((=x 170))
1.0 : (height Bob 170)
0.0
```

すると、変数 =x に 170 が代入されれば成り立つ、すなわち「170cm です」という結果が得られる。このとき、作業記憶内のマッチしたデータ (height Bob 170) は、その真理値が省略されているので 1 であるものとみなされる。そして、通常の後向き推論における yes に対応する 1.0 という結果が得られている。また、最後の 0.0 は別解を求めてバックトラックを行なった結果として、これ以外に解がない(no)ということを意味している。

次に、数値の真理値を持つデータに対する問い合わせ「体重が 70kg の人は誰ですか ?」という問い合わせをしてみる。

```
> (?-  (weight =name 70) )
((=name Bob))
0.8 : (weight Bob 70)
0.0
```

すると、「Bob です」という結果とデータの真理値 0.8 が問い合わせの真理値として出力される。すなわち、この問い合わせは 0.8 の正しさで成り立つということを意味している。

(2) ファジィ述語を用いた問い合わせ

「体重が中くらいの人は誰ですか ?」という問い合わせをしてみる。これは、ファジィ述語を用いて次のように記述できる。

```
> (?-  (weight =name middle_weight(=x)) )

((=name Bob) (=x 70))
0.5 : (weight Bob 70)

((=name Mike) (=x about80))
{0.3/0, 1/0.5, 0.3/0.8, 0.3/0.9, 0.3/1} :
                              (weight Mike about80)
0.0
```

すると、2 つの結果(「Bob で体重は 70kg です」と「Mike で体重は 80kg ぐらいです」)とそれぞれの結果に対する真理値が得られている。これは、次のように計算される。

① Bob に対しては、作業記憶中のデータ (weight Bob 70) と問い合わせ (weight =name middle_weight(=x)) のマッチングが行なわれる。まず、問い合わせ中の weight はマッチ度 1 でマッチし、変数 =name は Bob が代入されてマッチ度 1 となる。さらに、ファジィ述語付き変数 middle_weight(=x) では、変数 =x に 70 が代入されて、そのマッチ度として middle_weight(70) が計算されて 0.5 を得る。そして、データ (weight Bob 70) と項全体 (weight =name middle_weight(=x)) のマッチ度をシステム関数 f1 (デフォルトは min) を使って計算すると、

```
f1(1, 1, 0.5) = min(1, 1, 0.5) = 0.5                    (1)
```

となる(実際には関数 f1 は 2変数関数なので f1(f1(1,1), 0.5)) を計算する)。

しかし、マッチしたデータ (weight Bob 70) には真理値 0.8 がついているので、さらにそれを考慮したマッチ度をシステム関数 f2 (デフォルトは min) を使って計算すると、

```
f2(0.5, 0.8) = min(0.5, 0.8) = 0.5                      (2)
```

となり、問い合わせに対するこの結果の真理値 0.5 が得られる。

② Mike に対しては、作業記憶中のデータ (weight Mike about80) と問い合わせのマッチングが行なわれる。①の場合と同様に weight、=name に対するマッチ度は 1 であるが、ファジィ述語付き変数 middle_weight(=x) に対する about 80 の度合は middle_weight(about80) を計算しなければならない。これは、引数がファジィ集合であるので 1 変数関数に対する拡張原理[5]を用いて、

```
middle_weight(about80)
   = middle_weight({0.3/75, 1/80, 0.3/85})
   = {0.3/middle_weight(75), 1/middle_weight(80),
                             0.3/middle_weight(85)}
   = {0.3/1, 1/0.5, 0.3/0}                              (3)
```

と計算される。さらに、このマッチ度とデータの真理値 true ({1/1, 0.8/0.9, 0.5/0.8}) を f2 (min) を使って計算するが、これはファジィ集合どうしの演算であるので 2 変数関数に対する拡張原理[5]を用いて、

```
min({0.3/1, 1/0.5, 0.3/0}, {1/1, 0.8/0.9, 0.5/0.8})
= {   0.3∧1/min(1, 1),   0.3∧0.8/min(1, 0.9),
   0.3∧0.5/min(1, 0.8),       1∧1/min(0.5, 1),
   1∧0.8/min(0.5, 0.9),  1∧0.5/min(0.5, 0.8),
       0.3∧1/min(0, 1),  0.3∧0.8/min(0, 0.9),
   0.3∧0.5/min(0, 0.8)}
   = {0.3/1, 0.3/0.9, 0.3/0.8, 1/0.5, 0.8/0.5,
                0.5/0.5, 0.3/0, 0.3/0, 0.3/0}
   = {0.3/0, 1/0.5, 0.3/0.8, 0.3/0.9, 0.3/1}            (4)
```

と計算され、これが問い合わせの真理値となる。ここで、∧は min を表わす。

(3) 項が複数の問い合わせ

これまでの例では、問い合わせ中に項が一つだけある場合を考えてきたが、ここで項が複数ある場合を考える。「背が低くて体重の軽い人は誰ですか ?」という問い合わせをしてみる。

```
> (?-  (height =name short(=h))
       (weight =name light(=w)) )

((=name John) (=h about150) (=w about50))
{0.4/0.5, 0.5/0.8, 0.8/0.9, 1/1} :
        (height John about150) (weight John about50)
0.0
```

すると、「John で身長が 150cm ぐらい、体重が 50kg ぐらいです」という結果とそのマッチ度が得られている。

項 (height =name short(=h)) のマッチ度は上記の方法で計算して、{0.4/0.5, 0.5/0.8, 0.8/0.9, 1/1} であり、項 (weight =name light(=w)) はマッチ度 1 であるので、問い合わせ全体のマッチ度は、システム関数 f3 (デフォルトは min) を用いて、

```
f3({0.4/0.5, 0.5/0.8, 0.8/0.9, 1/1}, 1)
= min({0.4/0.5, 0.5/0.8, 0.8/0.9, 1/1}, {1/1})
= {0.4/0.5, 0.5/0.8, 0.8/0,9, 1/1}                      (5)
```

と計算される。

3.3 ルールとのマッチング

問い合わせが作業記憶のデータにマッチしなかったときには、ルールの結論部とのマッチングを行ない、そのルールの条件部が成立するかどうか調べる。

いま、「S サイズの人は誰ですか ?」という問い合わせをしてみる。

```
>(?- (size =name S))

((=name John))
{0.4/0.5, 0.5/0.8, 1/0.9} : (size John S)
0.0
```

すると、John という結果とその真理値が出力される。この問い合わせに対しては作業記憶内にマッチするデータがないので、ルールに対してマッチングが行われる。その結果、ルール r1 の結論部 (size =name S) がマッチ度 1 でマッチし、その条件部が新たな問い合わせとなる。この条件部は、3.2 節における項が複数の問い合わせの例と同じであるので、マッチ度 {0.4/0.5,0.5/0.8, 0.8/0,9, 1/1} で作業記憶中のデータ (height John about150) と (weight John about 50) にマッチする。さらに、ルールの真理値、すなわちルールの条件部が成立したときに結論部が成立する度合いが 0.9 であるので、これらをシステム関数 f4 (デフォルトは

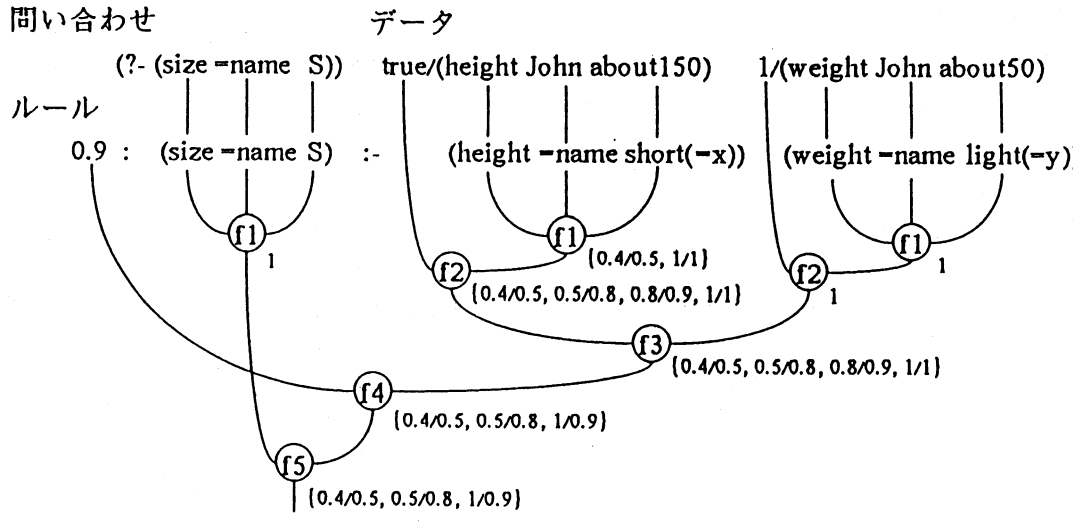


図1　ファジィ・パターン・マッチング

min) で計算して、

$$f4(\{0.4/0.5,\ 0.5/0.8,\ 0.8/0.9,\ 1/1\},\ 0.9) = \{0.4/0.5,\ 0.5/0.8,\ 1/0.9\} \quad (6)$$

となる。さらに、問い合わせに対してルールの結論部がマッチした度合いが 1 であるので、システム関数 f5 (デフォルトは min) を用いて、

$$f5(\{0.4/0.5,\ 0.5/0.8,\ 1/0.9\},\ 1) = \{0.4/0.5,\ 0.5/0.8,\ 1/0.9\} \quad (7)$$

となり、これが問い合わせのマッチ度として出力される。このマッチングの計算過程を図 1 に示す。

4. おわりに

ファジィ・プロダクション・システムに新たに追加した後向き推論機能について述べた。本システムは、SONY 社製のワークステーション NEWS の Franz Lisp、KCL(Kyoto Common Lisp) 上、および Sun Microsystems 社製のワークステーション Sun 4 の Sun Common Lisp 上でファジィ集合処理システム[6,7]を用いて動作している。

本報告で述べた後向き推論機能は前向き推論機能と同じ環境下で動作しているので、実際にエキスパート・システムを作成するときに、前向きと後向きの長所を組み合わせた効率のよい推論ができるようになる。さらには、ファジィ・データベースやファジィ・フレームとの融合も検討中である。

[謝辞]

本研究を行なうに当たり、いろいろとご配慮を頂いている関西大学の伊藤郁男教授、久保井不二男教授に深く感謝致します。

[参考文献]

[1] 馬野:「ファジィ・プロダクション・システムとその実現」、SICE 関西支部シンポジウム「あいまい情報処理と知的システム制御」、pp. 75-80 (1988).

[2] 中嶋 :「ファジィ・プロダクション・システムの拡張」、関西大学・工学部・卒業論文(1989).

[3] 馬野、江澤、中嶋 :「ファジィ・プロダクション・システムの拡張 －作業記憶の分割と複数ルールの実行－」、情報処理学会 第 39 回(平成元年後期) 全国大会、pp. 363-364 (1989).

[4] 長尾 : 知識と推論、岩波書店 (1988).

[5] L. A. Zadeh : "The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning," Information Sciences, Vol. 8, pp. 199-248; Vol. 8, pp. 301-357; Vol. 9, pp. 43-80 (1975).

[6] 馬野 :「Lisp によるファジィ集合処理システム」、第 3 回ファジィ・システム・シンポジウム、pp. 167-172 (1987).

[7] 久米、馬野:「Lisp によるファジィ集合処理システムの実現」、情報処理学会 第 35 回(昭和 62 年後期) 全国大会、pp. 791-792 (1987).

[問い合わせ先]

〒564 吹田市山手町 3-3-35
関西大学 工学部 管理工学科 情報処理工学研究室
中嶋 直紀

TEL : 06-388-1121 (Ext. 5821)
FAX : 06-330-3154
JUNET : nakajima@iecs.kansai-u.ac.jp

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FB3-1

ファジィエキスパートシステム構築支援ツールLIFE FEShell

Fuzzy Expert System Shell LIFE FEShell

深海 悟† 三好 力† 小山 宏† 高木 友博† 馬野 元秀††
Satoru Fukami Tsutom Miyoshi Hiroshi koyama Tomohiro Takagi Motohide Umano

†：技術研究組合・国際ファジィ工学研究所
Laboratory for International Fuzzy Engineering Research (LIFE)

††：大阪大学・大型計算機センター
Computation Center, Osaka University

abstract : LIFE Fuzzy Expert System Shell (LIFE FEShell) is designed for building expert systems using fuzzy knowledge. This shell is consisted of four parts: Fuzzy Production System (FPS), FPS Object Editor (FPOE), Fuzzy Frame System (FFS) and FFS Editor (FFE). FPS and FFS can exchange informations each other and work together for building more complex expert systems. And each editors help to create and edit knowledge base with interactive window.

1．はじめに

あいまいな知識やデータを取り扱うことのできるファジィエキスパートシステム構築支援ツールの研究開発が各所で進められている[1]～[4]。これは、エキスパートシステムの構築に際しあいまいな知識、データの取り扱いが避けがたい場合が多いとの認識に基づくものである。

しかしながら現状のファジィエキスパートシステム構築支援ツールをみると種々の点で改善の余地を残している。具体的には、まず通常のエキスパートシステム構築支援ツール（例えば、NEXPERT OBJECT[5]等）と比較すると、使用できる知識表現形式や開発環境等の面で問題がある。すなわち、一般のエキスパートシステム構築支援ツールでは、知識表現形式としてプロダクションルールに加えフレームその他をサポートしているのに対し、現状のファジィエキスパートシステム構築支援ツールのほとんどがプロダクションシステムのみしかサポートしていない。さらに開発環境すなわち知識編集、デバグ・チューニング支援ツールの面でも一般のエキスパートシステム構築支援ツールに比して見劣りがするというのが実状である。これは、ファジィエキスパートシステムの使用実績に乏しく、どのような機能をサポートするのが適当かといった面で明らかになっていない部分が多いことも原因のひとつと言えよう。一方、ファジィエキスパートシステム構築支援ツールにおける最も重要な機能であるあいまいさの取り扱い機能に関しては、性質の異なった複数種のあいまい性を同時に取り扱えるツールはほとんどないということが指摘できる。特に、プロダクションルール中のあいまいな条件（ファジィ条件）に加えて例えば身長が“170cm位”といったデータのvaguenessを取り扱えるツールは見当たらない。

以上のような現状認識に立ち、我々はこれら問題点の改善を目的として、実験・研究用ファジィエキスパートシステム構築支援ツールLIFE FEShellの試作開発を進めている。

本稿では、上記問題点に対する我々の考え方を整理した後、LIFE FEShellの構成および特徴について述べる。 なお、LIFE FEShellの構成要素であるファジィプロダクションシステム（ＦＰＳ）、およびオブジェクトエディタ（ＦＰＯＥ）については文献[14]、[15]で詳しく述べる。

2．基本的な考え方

2．1 位置づけ

現在開発中のLIFE FEShellは、ファジィエキスパートシステムに関する各種実験研究用ツールと位置づけており、これを使用していくつかのエキスパートシステムを実際に構築するなかでファジィエキスパートシステム構築支援ツールとしての必要機能の抽出・改善を図っていくことを目的としている。従って現バージョンでは性能面には特に考慮ははらっていない。

2．2 知識表現形式

LIFE FEShellでは、代表的な知識表現形式であるプロダクションルールとフレームを各々ファジィプロダクションシステム（ＦＰＳ）、およびファジィフレームシステム（ＦＦＳ）でサポートしている。また、これらは相互に呼び合うことができ、ＦＰＳとＦＦＳが相互に協調しながら問題解決を行なうエキスパートシステムを構築することができる（図１参照）。

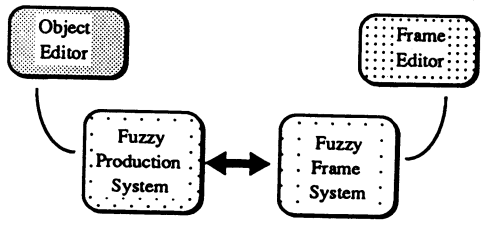


図１．LIFE FEShellの構成

２．３　開発環境

エキスパートシステム開発環境としては、知識の初期生成を支援する機能に加え、デバグ・チューニング支援機能が重要と考える。LIFE FEShellでは、ＦＰＳ用の知識編集およびデバグ・チューニングツールであるオブジェクトエディタ（ＦＰＯＥ）と、ＦＦＳ用の同ツールであるフレームエディタ（ＦＦＥ）を備えている（図１参照）。

２．４　あいまいさの取り扱い

プロダクションシステムにおいてルール中のあいまいな条件（ファジィ条件）に加えてデータのvaguenessを取り扱おうとすると、以下の問題が生じる。例えば、

IF　（身長(x)≧１７０cm）and（体重(x)が重い）THEN　・・・・

（ここで“体重(x)が重い”はファジィ条件とする）

なるルールが存在し、これに対しワーキングメモリに、

（（身長(Tom)＝170cm位）and（体重(Tom)＝７８kg））

を示すデータが存在したとする。ここで条件（身長(x)≧１７０cm）とvagueなデータ（身長(Tom)＝170cm位）を比較すると、このデータは条件を満たしている可能性もあるが満たしていない可能性もあり、あいまいと言える。このあいまいさは、クリスプな条件に対して満たしているか否かがはっきりとはわからないという意味のあいまいさである。一方、条件（体重(x)が重い）とデータ（体重(Tom)＝７８kg）を比較すると、ファジィ条件“体重が重い”の定義にもよるが、一般には完全に満たしているとは言い切れずここにもあいまいさが存在する。これは前述のあいまいさとは異なり、ファジィな条件に対し、条件を満たしている度合いが０か１では割り切れないという意味のあいまいさである。従って、これら二つのあいまいさは性質の異なるものであり、例えば前者の条件とデータのマッチ度を0.7、後者のそれを0.8とし、これらから複合条件（身長(x)≧１７０cm）and（体重(x)が重い）に対するマッチ度を例えばmin(0.7, 0.8)といった方法で求めることはできない。このことは、FLOPS[1]、[2]、FMUFL[4]のようにルールとワーキングメモリエレメントのマッチ度をひとつの数値で表現する方法を採用しているシステムでは、このように性質の異なった複数のあいまいさが同時に出現する状況を扱うことはできないことを意味している。

LIFE FEShellではこの問題を解決するため、ファジィ論理[6]、及び可能性理論[7]に基づくあいまいさの取り扱い機能をサポートしている。これにより、信頼性の高くないデータ（データのuncertainty[8]）、情報不足等で値が一点に定まらないデータ（データのvagueness[8]）、およびファジィ条件[8]を含むルールが統一的枠組みのなかで取り扱い可能となっている。上述の例をもとに以下この点について説明する。なお、以下は基本的考え方の説明を行なうことを目的としているため、データ等の表記は必ずしもＦＰＳ、ＦＦＳのシンタックスには従っていない。

ルールの条件部（（身長(x)≧１７０cm）and（体重(x)が重い））において、ファジィ述語（体重(x)が重い）が以下のように定義されているとする。

体重が重い：{ 0.1/71, 0.2/72, 0.3/73, 0.4/74, 0.5/75, 0.6/76,
0.7/77, 0.8/78, 0.9/79, 1/80以上}

ここで例えば“0.2/72”は命題“体重72kgは重い”の真理値が0.2であることを示している。すなわちこれは真理値関数μ(u)を定義している。

一方、ワーキングメモリエレメント（（身長(Tom)＝170cm位）and（体重(Tom)＝７８kg））において“170cm位”が以下の可能性分布で定義されているとする。

170ｃｍ位：{0.4/168, 0.8/169, 1/170, 0.8/171, 0.4/172}

ここで例えば“0.8/169”はこの人の身長が169cmである可能性測度の値が0.8であることを示している。すなわちこれは可能性分布関数π(v)を定義している。

LIFE FEShellでは上記ルールとワーキングメモリエレメントとのマッチ度は以下に示す考え方で求める。

(a) (身長(x)≧１７０cm) と (身長(Tom)＝170cm位)のマッチ度

可能性分布関数π(v)に基づき、条件を満たしている可能性測度の値Π(170cm以上)、および条件を満たしていない可能性測度の値Π(170cm未満)を求める。そしてこれらを以下のように真理値空間上の可能性分布の形式で表現する。

{ 0.8/0, 1/1 }

ここで“0.8/0”は条件を満たしていない（すなわち真理値が０である）可能性測度の値が0.8であることを、“1/1”は条件を満たしている（すなわち真理値が１である）可能性測度の値が１であることをそれぞれ示している。

(b)（体重(x)が重い）と（体重(Tom)＝７８kg）のマッチ度

“体重72kg”を“体重が重い”に対して定義された真理値関数に基づき評価し、μ(72)＝0.2の値をマッチ度とする。一般には体重の値が可能性分布で定義されている場合も考慮し、マッチ度を真理値空間上の可能性分布で表現する。これを可能性分布として表現すると{１／0.2}となる。

(c) ルール条件部全体のマッチ度

上記（a）、（b）で得られたマッチ度は共に真理値空間上の可能性分布であり同一のディメンションを持つ。そこでこれらに対してand（∧）の演算（デフォルトはmin）を拡張原理に基づいて行なうことでトータルのマッチ度を求める。この例の場合は以下のようになる。

{ 0.8/0, 1/1 } ∧ {１/0.2}
＝ {0.8/0, 1/0.2 }

この表現は、全くマッチしていないとする可能性測度の値が0.8であることを、真理値0.2でマッチしているとする可能性測度の値が1であることを示しており、２種類のあいまい性を含んでいる。なお、この値はルール条件部のマッチ度として当該ルールの実行部で自由に使用することができ、さらに実行結果をワーキングメモリに書き込む場合このマッチ度をデータの信頼性を表す値として付加することもできる。

以上からもわかるように本システムでは信頼性の高くないデータ（データのuncertainty）、情報不足等で値が一点に定まらないデータ（データのvagueness）、およびファジィ条件を含むルール（条件のfuzziness）が統一的枠組みのなかで取り扱い可能となっている。

なお、以上はＦＰＳに即して説明したが、ＦＦＳでも同様の枠組みでこれらあいまいな情報を取り扱うことができる。

３．LIFE FEShellの構成と各部の概要

３．１　全体の構成

LIFE FEShellの構成を図２に示す。ここで、Fuzzy Sets Manipulation Systemは、文献[9]で発表されているシステムである。図２にも示すとおり、ＦＰＳとＦＦＳは本システムが実験研究用システムであることを考慮しAllegro Common LISPで記述している。また、ＦＰＯＥおよびＦＦＥはＣ言語で記述し、Ｘウィンドウを採用している。

３．２　ファジィプロダクションシステム[14]

LIFE FEShellファジィプロダクションシステム（ＦＰＳ）は参考文献[10]～[12]のファジィプロダクションシステムに基づき、これをAllegro Common LISPに書き換えると共にいくつかの機能拡張を図ったものである。

ＦＰＳは例えばＯＰＳ５等と同様前向きタイプのプロダクションシステムであり、あいまいさの取り扱い機能については、前節で述べた方式に基づいている。

本ＦＰＳは文献[10]～[12]のシステムが持っている機能に加え、以下の特徴的機能を持っている。

(a)バックトラックのユーザコントロール機能

(b)ルール条件部にLISP関数を記述し、このリターン値とワーキングメモリエレメントとをマッチさせる機能

(c)ルールブロック単位に競合解消規則を指定する機能、他

ここで(b)の機能により、例えばルール条件部からＦＦＳを呼びだし、ＦＦＳの実行結果とワーキングメモリエレメントとをマッチさせるといったことも実現できる。

３．３　ＦＰＳオブジェクトエディタ[15]

LIFE FEShell ＦＰＳオブジェクトエディタ（ＦＰＯＥ）は、ＦＰＳにおいてユーザが定義する各オブジェクト（具体的にはルール、ワーキングメモリ等）対応のウィンドウベースエディタ機能に加え、ＦＰＳ側から発行されるコマンドによるウィンドウ操作機能を持っている。

（１）ＦＰＯＥの構成

ＦＰＯＥの構成を図３に示す。

ここでウィンドウベースユーザインタフェース部は、各オブジェクト対応のエディタ等を管理する部分であり、編集された結果はデータベースマネジャーを介してオブジェクトデータベースに格納される。コミュニケーションハンドラはＦＰＳとの通信を制御する部分であり、ＦＰＳとＦＰＯＥの間で定義されたプロトコルに基づき各種機能を実現する。

（２）ユーザインタフェース

ＦＰＯＥのユーザインタフェースはウィンドウを用い、操作性の向上を図っている。特に、ファジィエキスパートシステムを意識し、ファジィ述語のメンバシップ関数、可能性分布等の入力・編集は専用のウィンドウにより負荷の軽減を図っている。

（３）ＦＰＯＥの動作モード

ＦＰＯＥの動作モードには大きく分けて以下の２つがある。

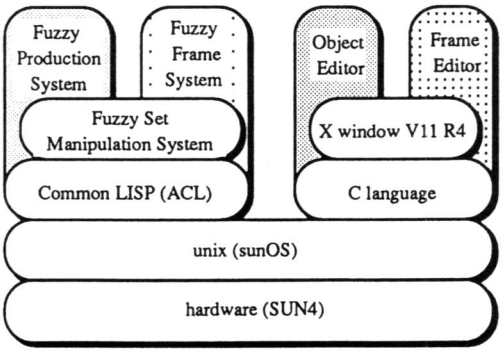


図２．LIFE FEShellの構造

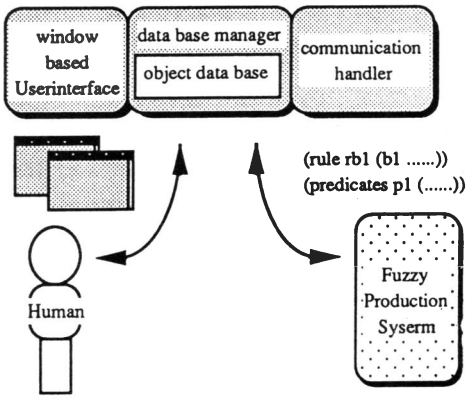


図３．オブジェクトエディタ

・スタンドアローンモード

本モードではＦＰＳとの通信を行なうことなくＦＰＯＥ単独でルール等の編集を行なうことができる。本モードは主としてルール等の初期投入の際に使用することを目的としている。

・ＦＰＳコミュニケーションモード

ＦＰＳとＦＰＯＥが協調して動作するモードである。このモードではＦＰＯＥはＦＰＳからのコマンドに基づき、オブジェクトデータベース中のデータのＦＰＳへの引き渡し、各オブジェクト対応のウィンドウを開きユーザにデータ投入を促すと共にユーザが投入したデータのＦＰＳへの引き渡し、あるいは現在処理中のルールブロック、ルール、ワーキングメモリの表示といった処理が実現できる。本モードは主としてデバグ・チューニング時に使用する。

３．４　ファジィフレームシステム

LIFE FEShell ファジィフレームシステム（ＦＦＳ）は、2.4節で述べた理論的枠組みに基づきあいまいな知識、データの取り扱いを可能としたフレームシステム[13]である。ＦＦＳの特徴は以下の通りである。

（１）スロット値

ＦＦＳのスロット値としては通常のフレームシステムにおけるクリスプな値に加え、値が可能性分布で定義されたもの、さらには真理値を表す区間［０，１］上の可能性分布（これで値の信頼性をあらわす）が付加されたデータが扱える。この機能により例えばデフォルト値は事実に比べ信頼性に劣るといったことが表現できる。

（２）ファシット

通常のフレームシステム同様、if-needed、if-added、if-removedといった付加手続きが記述できる。これら付加手続きはLISP関数であり、これらからＦＰＳを起動しその実行結果をスロット値としてＦＦＳ側に返すことも可能である。

（３）クラスと継承

通常のフレームシステム同様クラスフレーム、インスタンスフレームが定義できる。また、継承に際してはその信頼性が定義できる。信頼性の値はスロット値の信頼性同様一般に区間［０，１］上の可能性分布で与えられる。継承関係を利用してデフォルト値を決定する際にはこの信頼性の値が考慮される。

（４）フレーム間ネットワーク

ＦＦＳではフレーム間でネットワークを定義することができる。フレーム間ネットワーク機能はフレーム（スロット）間の各種関係を定義するのに使用する。この関係には一般にファジィ関係が定義できる。

３．５　ファジィフレームエディタ

LIFE FEShell ファジィフレームエディタ（ＦＦＥ）はＦＦＳ用の編集・デバグツールである。ＦＦＥはオブジェクトエディタ同様Ｘウィンドウを使用し操作性の向上を図っている。具体的には、例えばフレームの構造を表示しておき、マウスによるクリックに従ってスロット値あるいはファシットの関数名、関数本体を表示し編集するといったことが可能である。さらに、ＦＰＯＥ同様、実行中のＦＦＳからのコマンドにより、特定のフレームの編集といったことも実現できる。

４．おわりに

LIFE FEShellは現在ＦＦＥを除き基本部分は稼働している。今後はこれを使用して外国為替取引支援エキスパートシステム、画像理解エキスパートシステム等の開発を予定しており、その結果得られた知見をもとにさらに機能向上を図っていく予定である。

謝辞

本検討に際し種々のご意見を賜りましたLIFE・寺野 寿郎所長、並びにオブジェクトエディタの検討に際し種々のご意見を賜りましたＴＩＬ社 社長・戸貝 方規 博士に感謝致します。

［参考文献］

[1] W. Siler : "FLOPS: A Fuzzy Expert System Shell", Proc. 2nd IFSA Congress, pp.848-850 (1987).
[2] J.Buckley : "Managing Uncertainty in Fuzzy Expert System", Int. J. Man-Machine Studies, Vol.29, pp.129-148 (1988).
[3] K. S. Leung and W.Lam : "Fuzzy Concepts in Expert Systems", IEEE Computer Magazine, Vol. 21, No.9, pp.43-56 (1988).
[4] J.Bowen and J.Kang : "A Fuzzy Multi-paradigm Language", Fuzzy Sets and Systems, Vol.34, pp.263-291 (1990).
[5] 羽島　良重：" 業界標準のエキスパートシステム構築ツール", CAD&CIM, No.16, July (1990).
[6] L.A.Zadeh : "Fuzzy Sets ", Information and Control, Vol.8, pp.338-353(1965).
[7] L.A.Zadeh : "Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility", Fuzzy Sets and Systems, Vol.1, pp.3-28 (1978).
[8] D.Dubois and H.Prade : "An Introduction to Possibilistic and Fuzzy Logics", in Non-Standard Logics for Automated Reasoning (ed. by P.Smets, et. al.) Academic Press, pp.287-326 (1988).
[9] M.Umano : "Fuzzy-Set Manipulation System in Lisp", Proc. 2nd IFSA Congress, pp.840-843 (1987).
[10] M.Umano : "A Fuzzy Production System", in Fuzzy Logic in Knowledge Engineering (ed. by H.Prade and C.V.Negoita), Verlag TUV Rhinland , pp.194-208 (1986).
[11] M.Umano : "Implementation of Fuzzy Production System", Proc. 3rd IFSA Congress, pp.450-453 (1989).
[12]馬野 元秀："ファジィ・プロダクションシステムとその実現"，ＳＩＣＥ関西支部シンポジウム「あいまい情報処理と知的システム制御」, pp.75-80 (1988).
[13] M.Minsky : "A Framework for Representing Knowledge", in The Psychology of Computer Vision (ed. by P.H.Winston) McGraw-Hill (1975).
[14]小山 宏, 三好 力, 深海 悟, 高木 友博, 馬野 元秀："LIFE FEShellにおけるファジィプロダクションシステム", 第６回ファジィシステムシンポジウム (1990).
[15]三好 力, 深海 悟, 小山 宏, 高木 友博, 馬野 元秀："LIFE FEShellにおけるオブジェクトエディタ", 第６回ファジィシステムシンポジウム (1990).

問い合わせ先：〒231　横浜市中区山下町８９－１
シイベルヘグナビル
技術研究組合・国際ファジィ工学研究所
深海　悟
ＴＥＬ：０４５－２１２－８２３４
ＦＡＸ：０４５－２１２－８２５５

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FB3-2

LIFE FEShellにおけるファジィプロダクションシステム

Fuzzy Production System in LIFE FEShell

小山 宏 * Hiroshi KOYAMA
三好 力 * Tsutomu MIYOSHI
深海 悟 * Satoru FUKAMI
高木 友博 * Tomohiro TAKAGI
馬野 元秀 ** Motohide UMANO

* 国際ファジィ工学研究所
Laboratory for International Fuzzy Engineering Research (LIFE)

** 大阪大学 大型計算機センター
Computation Center, Osaka University

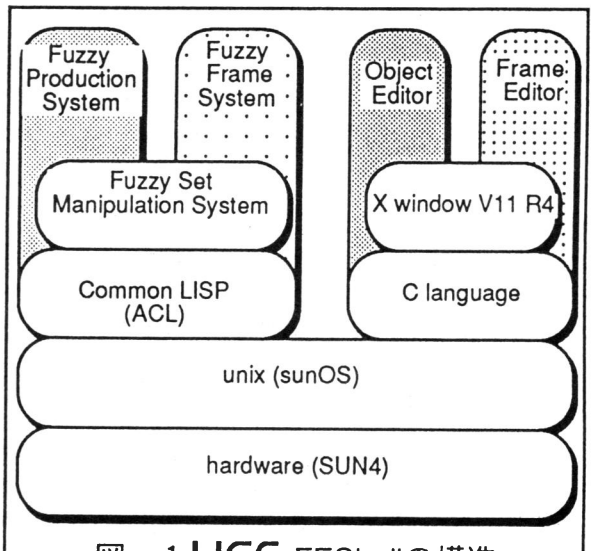
Abstract: We develop the Fuzzy Production System which is inclueded in LIFEFEShell (Fuzzy Expert Shell). In this paper, we report some features which are effective in a reasoning system. These features include user controllable backtracking and conflict resolution in rule block.

1. はじめに

エキスパートシステム構築の際の問題点として、専門家の知識をどう表現するかという問題がある。これは浅い知識のように経験による主観が大きくウエイトを占めるような知識の表現力が欠けているためと思われる。これを解決するための一手法として確信度の利用がなされてきた。しかし、あいまいな知識の中には、知識自身があいまいな場合やその知識がどれぐらい確からしいかがあいまいな場合がある。現在 LIFE で構築中のファジィエキスパートシステム構築支援ツール (LIFE FEShell [6]) の一部であるファジィプロダクションシステムは、これらのあいまいさを表現できるようにプロダクションシステムを拡張したものである。しかし、あいまいな知識やデータを取り扱ったパターンマッチングを行なうとルール数が減少している分、競合が発生しやすくなる。よって、推論を円滑かつ効率的に進めるために競合解消規則の充実やバックトラックの制御機能の充実が重要になってくる。本稿では、本ファジィプロダクションシステムにおいて推論をユーザの意図どうりに効率的に行なうための特徴的な機能として次の2点を報告する。

1) ユーザコントロール可能なバックトラック機能
自動バックトラック機能に加えて、バックトラック時の戻り先 (失敗の原因となった分岐点) を直接指定することによって無駄なルールの発火を防止する。そして、ファジィなパターンマッチング特有な競合についても本バックトラック機能が有効であることを示す。

2) ルールブロック単位の競合解消規則の選択
競合解消の戦略をルールブロック単位に記述することによりきめ細かな推論制御を可能とする。



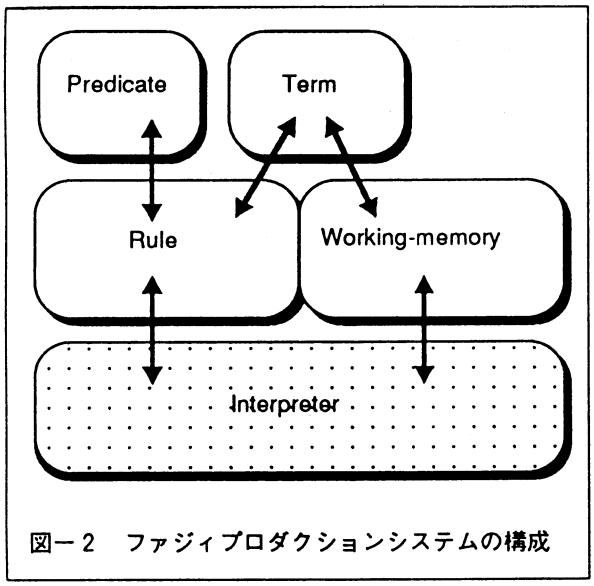
図－1 LIFE FEShellの構造

2. LIFE FEShell 概要

LIFE FEShell はファジィエキスパートシステム構築支援ツールであり、LIFE において現在構築中である。本ツールは大きく4つの部分より構成されている。システム構成を図 - 1 に示す。

1) ファジィプロダクションシステム
推論規則や事実データにあいまいさを表現できるようにプロダクションシステムを拡張したものである。

2) オブジェクトエディタ
ファジィプロダクションシステム構築の際の知識の



図－2　ファジィプロダクションシステムの構成

入力、デバッグ、チューニングを支援するツールである。

3) ファジィフレームシステム
あいまいさを取り扱えるように一般のフレームシステムを拡張したものである。

4) フレームエディタ
ファジィフレームシステムを構築する際に知識の入力、デバック、チューニングを支援するためのツールである。

ファジィプロダクションシステム及びファジィフレームシステムは、相互独立に稼働し、互いにやりとりも可能となっている。また、両者ともファジィ集合の演算にはファジィ集合処理システム [4] を使用している。

3. ファジィプロダクションシステム概要

本システムは、既に報告されているファジィプロダクションシステム [3] [5] [7] を Allegro Common Lisp に書き換えると共に機能拡張したものである。本システムでは、あいまいさはデータやルールの条件部と動作部に可能性分布 [2] やファジィ述語 [1] を記述することにより表現する。また、推論はファジィパターンマッチングにより条件部が最もよくマッチしたルールの動作部を実行する前向き推論である。本システムは通常のプロダクションシステム同様、ルールベース、ワーキングメモリ、インタプリタを基本として構成されている。さらに、ファジィ述語と可能性分布を管理する部分がある。システム構成を図 - 2 に示す。

1) 作業記憶 (working-memory)
ルールによる参照や更新の対象となるデータの集まりである。あいまいなデータやデータの確からしさを可能性分布や閉区間 [0,1] の値で表現できる。

2) ルール (rule)
推論規則の集合である。ルールは「IF 条件部 THEN 動作部」の形式で書かれる。あいまいな知識の表現として条件部には可能性分布やファジィ述語が記述できる。また、結論部には可能性分布に対する演算を用いることにより、あいまいなデータやデータ自身の確からしさ等を表現できる。

3) 基本語 (term)
可能性分布の集合から構成されており、離散表現によって記述する。また、関数と範囲ときざみ幅を指定して離散値を生成することも可能である。

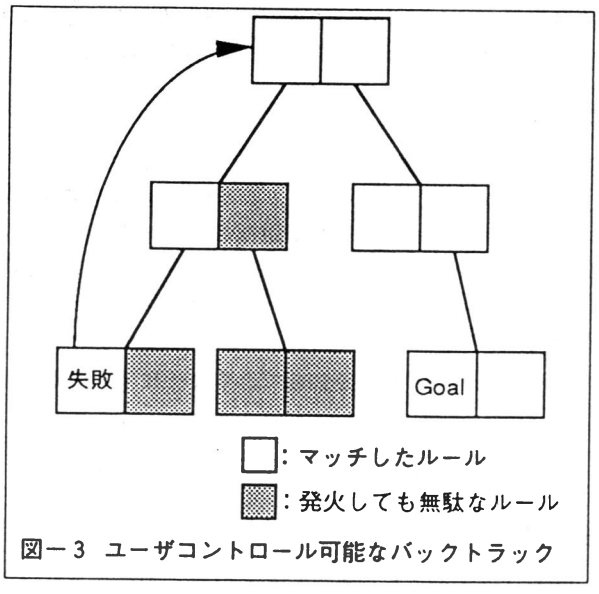
4) 述語 (predicate)
ファジィ述語 (メンバーシップ関数) の集合から構成されている。ファジィ述語は連続表現によって定義可能である。(もちろん、離散表現も可能である。)

5) インタプリタ (interpreter)
推論をつかさどる部分であり、ルールの各条件と作業記憶のデータの内容をファジィなパターンマッチングを行ない各ルールのマッチ度を計算し、競合解消規則によって抽出されたルールを発火させる。マッチするルールがなくなるとバックトラック機能により基本的にはひとつ前の競合時点に戻りワーキングメモのリ状態をもとに戻し、別のルールを発火させる。

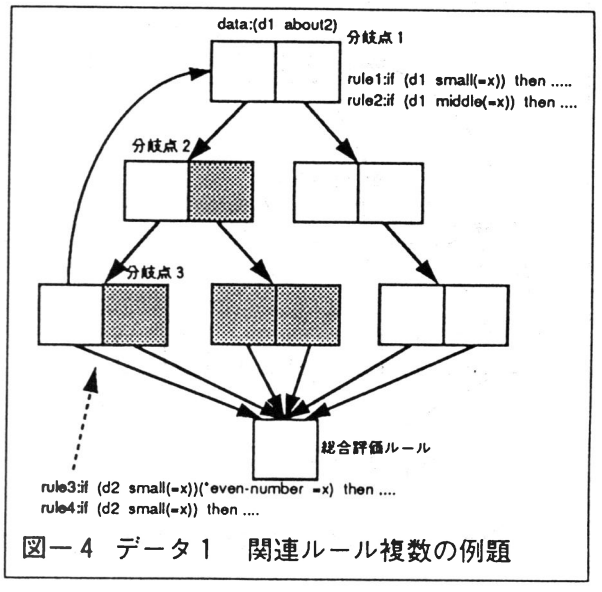
4. ファジィプロダクションシステムの機能

ファジィプロダクションシステムの機能を以下に示す。

1) データには可能性分布が記述でき、ルールにはファジィ述語及び可能性分布が記述できる。
2) ルールのアクション部において、任意の関数が実行できるので、推論中にメンバーシップ関数の書き換えやルールの生成も可能である。
3) ルール及び作業記憶はブロック単位の管理が可能である。
4) 複数のルールの発火が可能である。
5) 自動バックトラック機能がある。
6) ルールの条件部に関数を記述でき、その関数値をマッチ度とすることができる。
7) バックトラック時の戻り先をユーザが直接指定できる機能がある。
8) 競合解消規則はルールブロック単位に指定可能である。
9) 作業記憶内のデータには自動的にタイムタグが付加され管理される。
10) ルールの条件部に関数を記述でき、その関数値をパターンと考えて作業記憶中のデータとパターンマッチングが可能である。



図－3 ユーザコントロール可能なバックトラック



図－4 データ1 関連ルール複数の例題

以上機能のなかで今回拡張したのが 7) ～ 10) である。本稿では 7)、8) について報告する。

5. ユーザコントロール可能なバックトラック機能

バックトラックは推論が失敗した時に発生する。失敗する原因は、複数のルールがマッチした時に誤ったルールを選択することにある。この時に、自動バックトラッキングを用いると、1 つ前の段階に戻るだけなので、既に失敗するとわかっているルールについても発火することがある。このような場合には、選択を誤った分岐点に直接戻るのが妥当であると考えられる (図 - 3)。本バックトラックの実現方法は戻りたい分岐点の戻りたいルールにフラグを立てて、それをひとつのルール群としてスタックにつむ。そして、バックトラックが発生するとスタックからルール群を取り出すという形式をとっている。ファジィ集合を用いた推論には競合 (分岐点) にどのような場合があるのかについて検討してみる。

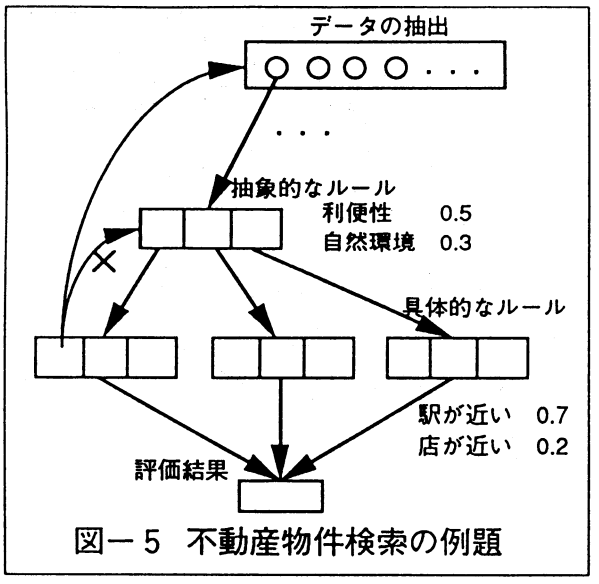
1) ひとつのデータと関連のある複数ルール
2) ひとつのデータと関連のない複数ルール
3) 複数データとひとつのルール
4) 複数データと複数ルール

2) ～ 4) に関しては通常のプロダクションシステムにおいてもいえるが、1) はファジィを用いたプロダクションシステムに特有である。それぞれについて簡単に説明する。

1) ひとつのデータと関連のある複数ルール
あいまいさを含んだデータやルールを取り扱うと関連のある複数ルールにマッチすることがある。例えば、次の例題を考えてみる (図 - 4)。これは、属性 d1 の値が条件 (d1 小さい) を持つルールと (d1 中くらい) を持つルールの双方にマッチしたため、双方のルールに対してこのマッチ度をもとに処理を進め、最後にこれらの結果に対して総合評価を行なう例を示している。この場合に、より合致したルールを発火させるのでは不十分で、両方のルール (rule1,rule2) を発火させる必要がある。そして、競合解消によってあるルールを選択し、推論を行なっていき解が得られるか失敗した時点で分岐点に戻る必要がある。この時に分岐点 3 のように rule3 が発火した時点で rule4 を発火させる必要がないことがわかっていて、かつ、分岐点 2 でも同様の場合には、未発火のルールを発火させずに分岐点 1 に戻ればよい。このような時に今回のバックトラック機能は有効に使用することができる。しかし、バックトラック機能は推論が失敗した時の後戻りとして使用するものであり、バックトラックするとワーキングメモリは戻り先の失敗したルールの発火前の状態に戻される。すると、この例題のように推論結果を最後に総合評価するのは困難である。そこで、本システムではバックトラックの影響を受けない特別なワーキングメモリを設けてある。これは、ルールの動作部のコマンドにより操作可能である。

2) ひとつのデータと関連のない複数ルール
通常のプロダクションシステムでよくみられる競合であるが、やはり直接数段前に戻れる場合には本バックトラック機能が有効に使用できる。

3) 複数データとひとつのルール
これも一般的によくみられる競合である。不動産物件検索を例に考えてみる (図 - 5)。ある物件に関して評価していき条件にあてはまらななくなった時点で次の物件に目を移すべきであろう。その時に本バックトラック機能が使用できる。



図－5 不動産物件検索の例題

4) 複数データと複数ルール
複数データと複数ルールによる競合を分解すると、1) ～ 3) のパターンに属するか、あるいは、ひとつのデータとひとつのルールを要素として構成している。これら要素により構成されているということは、同様に本バックトラック機能が有効に使用できると思われる。

いずれの場合にも本バックトラック機能により、無駄なルールの発火を防ぎ推論効率が向上する。

6. ルールブロック単位の競合解消規則の選択

プロダクションシステムでは知識を２つの形で表現しているといえる。ひとつは、浅い知識、深い知識などの断片的な知識を「IF ～ THEN ～」形式のプロダクションルールとして表現している。もうひとつは、推論を制御するための知識 (メタ知識) である。例えば、「この場合にはこのルールを適用すればうまくいくことが多い」というような知識がある。これは、次の方法で実現できる。

1) ルール及び作業記憶をブロック単位に管理し推論を制御する。
2) 競合解消規則によって推論を制御する。
3) ルールの生成や削除により制御する。

以上の 1) ～ 2) から考えて、ルールブロック単位に競合解消規則を選択できることは意味がある思われる。これにより、ルールブロックごとに異なる競合解消規則を用いて可能性の高いルールから発火できゴールに早くたどりつく可能性が高くなる。また、ユーザが推論を制御しやすくもなる。本システムでは使用頻度の高い競合解消ルールを標準関数として提供している。また、提供していない競合解消ルールを使用する場合にはユーザが競合集合情報をもとに Lisp で関数を記述することにより、新たに競合解消規則を追加することも可能である。

7. おわりに

本稿では、LIFE FEShell 内のファジィプロダクションシステムの概要及び本システムの特徴的な機能である、ユーザコントロール可能なバックトラッキング機能、及び、ルールブロック単位に競合解消規則が選択できる機能について報告した。今後の課題として次の項目を検討中である。

1) どんなあいまいさを表現できるようにすべきか
2) よりきめ細かな推論を制御するための機能追加
3) 高速パターンマッチングアルゴリズムの検討

8. 謝辞

本システム開発にあたり有益な助言を頂いた寺野 寿郎 LIFE 所長に感謝致します。

参考文献

[1] L.A.Zadeh. Fuzzy Sets. *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338–353, 1965.

[2] L.A.Zadeh. Fuzzy Sets as a basis for a Theory of Possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 3–28, 1978.

[3] M.Umano. A Fuzzy Production System. *in Fuzzy logic in knowledge engineering (ed.by H.prade and C.V.Negoita), Verlag TUV Rheinland*, pp. 194–208, 1986.

[4] M.Umano. Fuzzy-Set Manipulation System in LISP. *Proc. 2nd IFSA Congress*, pp. 840–843, 1987.

[5] M.Umano. Implementation of Fuzzy Production System. *Proc.3rd IFSA Conress*, pp. 450–453, 1989.

[6] 深海悟, 三好力, 小山宏, 高木友博, 馬野元秀. ファジィエキスパートシステム構築支援ツール LIFE FEShell. 第６回ファジィシステムシンポジウム, 1990.

[7] 馬野元秀. ファジィプロダクションシステムとその実現. *SICE* 関西支部シンポジウム あいまい情報処理と知的シス テム制御, pp. 75–80, 1988.

問い合わせ先
〒２３１ 横浜市中区山下町８９－１
シーベルヘグナビル３Ｆ
技術研究組合・国際ファジィ工学研究所
小山 宏
TEL:045-212-8239 (直通)
FAX:045-212-8255

FB3-3

LIFE FEShell におけるオブジェクトエディタ

Object Editor on LIFE FEShell

三好 力 MIYOSHI Tsutomu
深海 悟 FUKAMI Satoru
小山 宏 KOYAMA Hiroshi
高木 友博 TAKAGI Tomohiro
馬野元秀 † UMANO Motohide

国際ファジィ工学研究所,
† 大阪大学 大型計算機センター
Laboratory for International Fuzzy Engineering Research(LIFE),
† Computation Center, Osaka Univercity

Abstract: Fuzzy Production System Object Editor (FPOE) is an object editor for Fuzzy Production System (FPS) which is a unit of total environments in fuzzy expert systems (LIFE FEShell). The knowledge representations of FPS are difficult to input directly by still because representations are troublesome for the users. FPOE is designed to input user's knowledge in FPS easily and directly by the users. In this paper, the user interface and the facilities of FPOE are described.

1. はじめに

国際ファジィ工学研究所第2研究室 (以下 LIFE と称する) では、あいまいなデータを扱うことのできるファジィエキスパートシステム構築支援ツールとしてファジィエキスパートシェル [1] (以下 LIFE FEShell と称する) の研究・開発を行っている。

LIFE FEShell の推論部分であるファジィプロダクションシステム [2] (以下 FPS と称する) とファジィフレームシステム (以下 FFS と称する) は LISP インタプリタの上で開発されている。そのため、知識はリスト形式で表現されており、一般の利用者にはなじみが薄い。この形態の知識を利用者が直接入力する場合、文法的に正しく表現されているか、必要な情報が入っているかなど、入力するべき知識と直接関係ない部分に多くの労力を費やす事になる。また、リスト形式での表現に限らず、あいまいさの表現では記述すべき情報の量が多いため、テキスト形式の入力では、誤りを招き易い。

このような問題を解決するため、ファジィプロダクションシステム専用のエディタとして、ファジィプロダクションシステムオブジェクトエディタ及びファジィフレームシステム専用のエディタとして、ファジィフレームエディタの研究・開発を行っている。エディタの仕様検討に当たっては、利用者にとってなじみやすいユーザインタフェースを提供するため、ウインドウとマウスをできるだけ用いて、キー入力を少なくするよう工夫した。このユーザインタフェースを利用して、エディタと同じユーザインタフェースを持ったデバッグ・チューニング環境も提供している。この論文ではファジィプロダクションシステムオブジェクトエディタについて報告する。

2. LIEF FEShell の構成

LIFE FEShell は、ファジィプロダクションシステム (FPS)、ファジィフレームシステム (FFS)、ファジィプロダクションシステムオブジェクトエディタ (FPOE)、ファジィフレームエディタ (FFE) の4つから構成されている (図1)。

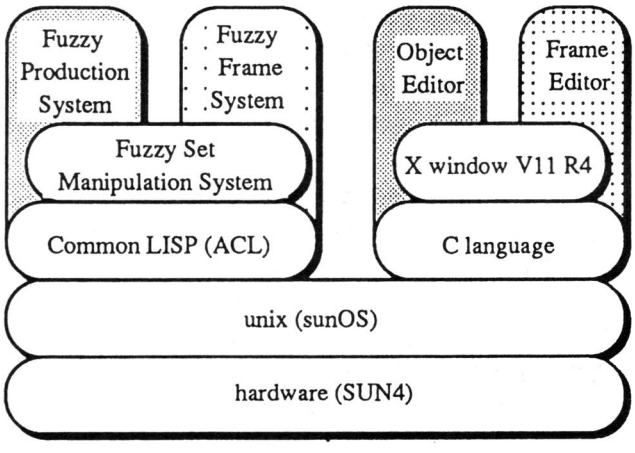


図 1: LIFE FEShell の構造

FPS は馬野のファジィプロダクションシステム [3] [4] [5] を基に拡張を行なった。FPS では、標準的な前向き

推論のプロダクションシステムの上で、あいまいな知識の表現を取り扱うことができる。あいまいな知識の表現は、ファジィ述語 (メンバシップ関数 [7]) と可能性分布 [8] を用いてプロダクションシステムのルール部とワーキングメモリ部に記述する。

FFS は、宣言型の知識にファジィ述語や可能性分布を用いてあいまいな知識の表現ができるように拡張を行なったフレームシステムである。あいまいさは、フレームにおける、値と関係に対して記述することができる。

さらに、FES と FFS 双方の長所を採り入れるため、各プログラムは相互に情報を交換することができる。これによって、より自然な形での知識表現と推論を実現することが期待される。

FPS と FFS は実験研究用の推論エンジンであることを考慮し、Allegro Common LISP 上で開発を行なった。

ファジィ述語や可能性分布を表現する場合、汎用のテキストエディタでは、効率や間違い易さの面で現実的な入力環境を得ることは難しい。そこで FPS の知識を入力・編集することを第 1 義の目的として、専用エディタである FPOE を開発した。FPOE のユーザインタフェースを利用し、エディタと同じユーザインタフェースを持ったデバッグ・チューニング環境も提供している。

FFS についても FPS と同様な問題があるため、FPOE と同様の目的で FFE の開発を行なっている。

3. ファジィプロダクションシステムオブジェクトエディタ

エキスパートシステムの開発にあたって問題となるのが、知識獲得とチューニングを如何にうまく行なうかであることを考えると、推論エンジンの性能とともに、ユーザインタフェースとしてどの様な環境を提供するかがエキスパートシステム開発の鍵となるものと考える。FPOE は FPS の各オブジェクト (ルール、ワーキングメモリなど) の編集を容易にすることを第 1 義的な目標とし、FPS と協調して動作させることによって、エキスパートシステムのデバッグ・チューニングを行なう総合的なエキスパートシステム開発支援環境を目指して研究開発を行なっている。

システムの負荷の軽減と知識入力の効率化をはかるため、FPOE と FPS は独立なプロセスとして動作するよう設計した。従って、FPOE は FPS と協調して動作するために、ユーザインタフェースの他に FPS と情報交換を行なためのインタフェースをもっている。FPOE は大きく分けて 3 つの部分から構成される。ユーザインタフェース部、データベース管理部、コミュニケーションハンドラ部である (図 2)。

データベース管理部は各オブジェクト情報、ウインドウの情報など、FPOE が取り扱うすべての情報を管理している。各部分はデータベース管理部を通して各情報にアクセスする。ファイルの読み書きもこの部分が担当し

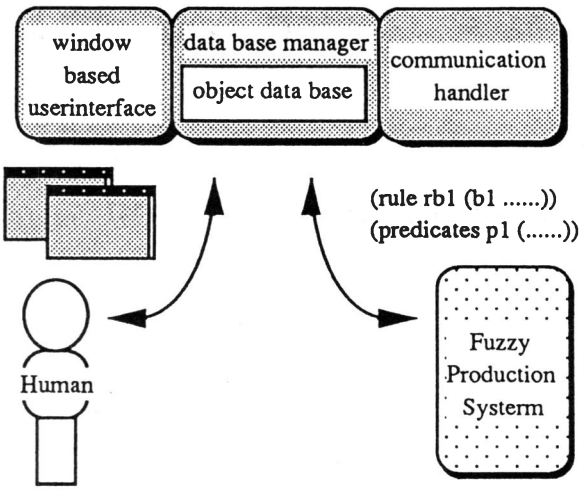


図 2: FPOE の概要

ている。

利用者は、ユーザインタフェース部の提供するウインドウを通して FPOE の持つ情報にアクセスする。FPS の各オブジェクトごとに専用のウインドウが提供されている。詳しくは第 4. 節で述べる。

FPOE と FPS はコミュニケーションハンドラを通して情報の交換を行なう。主に FPOE 側から、エディタウインドウを使って編集されたオブジェクトの情報を FPS 側に送るが、FPS 側が主体的に FPOE のデータベースにアクセスすることも許している。FPOE と FPS の情報交換のため、専用のプロトコルを作成した。詳しくは第 5. 節で述べる。

FPOE と FPS は各々独立に動作することができる。FPOE と FPS が情報を交換しながら動作する状態を FPS コミュニケーションモードと呼んでいる。この状態では FPS が FPOE のユーザインタフェースを利用することができ、FPS を使ったエキスパートシステムのデバッグ・チューニングを FPOE のインタフェースを使用して行なうことができる。

FPOE が単独で動作する状態をスタンドアロンモードと呼んでいる。この状態では、LISP インタプリタを起動する必要がないため、システムの負荷を軽減できる。スタンドアロンモードは知識の初期入力など FPS との通信が必要ない場合、熟練者でない利用者による知識入力を行なう場合などに有効である。

4. ユーザインタフェース

FPS では利用者の入力 (ルール、ワーキングメモリなど) は基本的にリストで表現している。これは柔軟であるという点、LISP 上で取り扱いやすいう点で有利である。しかし、離散的なファジィ集合や値の可能性分布などを記述する場合、すべての離散値を列挙する必要があり、記述するべき情報量が多くなる。精度を上げていく

と必然的に膨大な記述が必要である。汎用のテキストエディタでの入力では誤りを招きやすく、データの全体像も掴みにくい。そこで、数値を入力するのではなく、グラフのような視覚に訴える表示と、それを直接変更することによりデータを入力するような形式のものが有効と考えられる。また、ルールやワーキングメモリにはテンプレートに基づく入力形式が考えられる。このようにすると、打ち間違いに伴う入力誤りやデータの文法的な誤りがなくなることが期待される。さらに視覚的に表示されているために、データを直観的に把握することが容易である。

FPOE の開発に当たっては、対象計算機を unix ワークステーションとしているので、FPOE のユーザインタフェースには当初より X window の利用を考えて設計した。編集対象について、必要な情報はウインドウ中に表示し、その時点で可能な操作は全て表示されているようにウインドウの設計を行なった。

FPOE は、FPS の構文に従い、入力が必要な要素に対しては専用のフィールドを設けて入力を促している。FPS に送られる情報は、ウインドウの各フィールドに入力された情報を基にして、FPS が処理できるリスト形式のデータを FPOE が合成する。このため、テキストエディタを使っての入力に比べて、構文上の誤りを起こす可能性が飛躍的に減少する。

FPS の各オブジェクトに対し、約 20 の専用のウインドウを設計した。これらのウインドウはそれぞれ、オブジェクトの選択、オブジェクト情報の表示・編集、メンバシップ関数や可能性分布を表現するための離散値情報や連続関数の表示・入力を担当している。

図 3 に離散表現入力用ウインドウの概要を示す。このウインドウでは、利用者がグラフの高さをマウスにより直接変更することがでる。

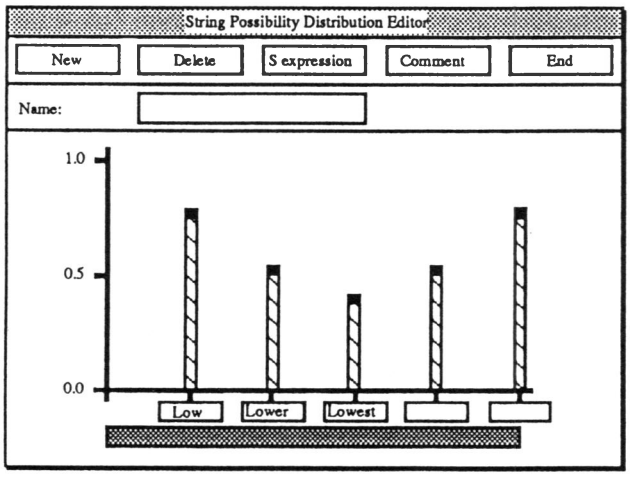


図 3: 離散表現入力用ウインドウの概要

FPS では、連続関数は形状を表す関数とそのパラメータによって与える。そして、具体的にどのような形をした曲線を入力したかを直観的に把握できるように、FPOE では連続関数用の視覚的なユーザインタフェースを持っている。これを使って、以下の関数を入力できる。

- Π 関数 [9]
- S 関数 [9]
- Z 関数 [9]
- 三角形
- 台形
- 右上がり直線
- 左上がり直線

図 4 に連続表現入力用ウインドウの概要を示す。このウインドウでは利用者が直接グラフの形状を変化させることができ、それがパラメータの入力に対応する。

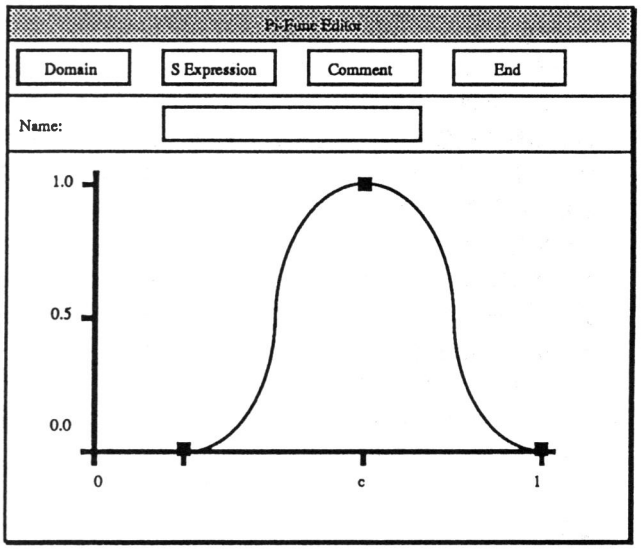


図 4: 連続表現入力用ウインドウの概要

5. プロトコル

FPOE と FPS は別々に動作することができるため、独立に内部データベースとユーザインタフェースを持っている。従って、何らかの方法で情報をやり取りする仕組みが必要になる。そこで、FPOE と FPS とがやり取りするためのプロトコルを定義した。プロトコルには、変更されたオブジェクトの情報を FPS に送るコマンドの他に、FPOE のデータベースを変更するためのコマンド、一時的な情報を編集するためのコマンド、ウインドウを管理するためのコマンドなどがある。

FPOE のデータベースに関するコマンドとしては、各オブジェクトごとに show, edit, delete, get, put がある。

delete, get, put を使うことで、FPOE と FPS の間で、FPS 側が主導的に情報の交換が可能である。

show と edit により FPOE のエディタウインドウを用いてデータベースの情報を表示し、編集することができる。さらに、show, edit に各オブジェクトの記述を引数として渡すことで、FPOE のデータベースとは独立に与えられたオブジェクトを編集することも可能である。

ウインドウ管理のコマンドとしては、close, top, bottom, resize, move がある。ウインドウ番号 (生成時に付けられる) を指定することで任意のエディタウインドウを FPS 側から操作することができる。

デバッグ・チューニングのための環境を提供する場合、FPS がウインドウの管理を行なったり、利用者に対して各オブジェクトの情報の表示や編集を促すといった機能が必要となる。上記のプロトコルによりこれらの機能を容易に実現できる。

6. おわりに

LIFE FEShell の内、FPOE について報告した。あいまいな知識の入力用ユーザインタフェースの提案を行なった。今後、インタフェースおよびプロトコルに関する有効性を検証するとともに、このインタフェースを利用し、FPS のデバッグ・チューニング環境の研究・整備をおこなう予定である。

FPOE と FFE はウインドウシステムを利用した類似のユーザインタフェースを持っている。FPS と FFS がお互いにデータのやりとりを行なってより自然な知識表現を行なうことを考えると、これらのユーザインタフェースを利用し、FPS と FFS に同時にアクセスするデバッグ・チューニングの総合的な環境を実現することは今後の課題の一つと考える。

謝辞

本研究の機会をいただいた LIFE 所長 寺野 寿郎 教授、並びに FPOE の検討に際し、種々の御意見をいただいた TIL 社社長 戸貝 方規 博士に感謝致します。

参考文献

[1] 深海 悟, 三好 力, 小山 宏, 高木 友博, 馬野 元秀: "ファジィエキスパートシステム構築支援ツール LIFE FEShell", 第 6 回ファジィシステムシンポジウム (1990).

[2] 小山 宏, 三好 力, 深海 悟, 高木 友博, 馬野 元秀: "LIFE FEShell におけるファジィプロダクションシステム", 第 6 回ファジィシステムシンポジウム (1990).

[3] M. Umano: "A Fuzzy Production System", in Fuzzy logic in knowledge engineering (ed. by H. Prade and C. V. Negoita), Verlag TUV Rheinland, pp. 194-208 (1986).

[4] M. Umano: "Implementation of Fuzzy Production System", Proc. 3rd IFSA Congress, pp. 450-453 (1989).

[5] 馬野 元秀: "ファジィ・プロダクション・システムとその実現", SICE 関西支部シンポジウム「あいまい情報処理と知的システム制御」, pp. 75-80 (1988).

[6] M. Umano: "Fuzzy-Set Manipulation System in Lisp", Proc. 2nd IFSA Congress, pp. 840-843 (1987).

[7] L. A. Zadeh: "Fuzzy Sets", Information and Control, vol. 8, pp. 338-353(1965).

[8] L. A. Zadeh: "Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility", Fuzzy Sets and Systems, vol. 1, pp. 3-28 (1978).

[9] L. A. Zadeh: "Calculus of Fuzzy Restrictions", Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Procsses, (1975).

問い合わせ先

〒 231 横浜市中区山下町 89-1
シイベルヘグナービル 3F
技術研究組合 国際ファジィ工学研究所 第 2 研究室
三好 力
Tel : 045-212-8246
Fax : 045-212-8255

FB4-1

A VME-based Parallel Fuzzy Processing System

Erik A. Horstkotte, Rodney J. Corder and Masaki Togai, Ph. D.
Togai InfraLogic, Inc.
30 Corporate Park Suite 107
Irvine, CA 92714
(714) 975-8522
FAX (714) 975-8524

The FCA10VME is a four-processor parallel fuzzy processing VME board with applications in both UNIX-based information processing and standalone control systems. It is well supported by both text-based and graphical software development tools.

Introduction

The FCA10VME is a four-processor parallel fuzzy processing VME board, intended for use in either standalone applications or for UNIX-based fuzzy processing. Up to 64 boards may be used in the same computer system, for a total of 256 fuzzy processors operating in parallel. The board is supported by a comprehensive set of software development tools. These include the TILShell, a graphical fuzzy expert system development tool, and the FC110 Development System, which contains an FPL™ compiler for the FC110, an FC110 relocatable assembler, and a linker.

The FCA10VME Hardware

The board is designed around four fully supported FC110 Digital Fuzzy Processors (DFP™) [1]. Operating in a loosely coupled environment, this board offers the flexibility and rule processing power required for most real-time systems. The message passing facilities integral to the FC110 DFP allow each processor independent communication to the host computer system. By coupling the processors at the software level and providing integral message passing facilities, many different architectures for parallel processing systems may be created, without changing the hardware. This allows researchers to experiment with disjoint, systolic, mesh, hypercube and hypertorus architectures, all on the same development platform.

Figure 1, on the following page, shows a simplified block diagram of the board. Each FC110 processor on the board operates at 20 MHz, allowing it to perform as a 10 MIPS fuzzy computing node. Each node has 128K bytes of knowledge base memory exclusive to it. This allows each processor uninhibited access to its own knowledge base. There are 256 bytes of shared variable space between each FC110 DFP and the host computer. This memory is used for passing messages, commands and data between the node and the host computer. With all four processors active, the FCA10VME board provides up to 40 MIPS of fuzzy computing power, making it capable of over 1.3 million fuzzy production rule evaluations per second.

The logical addressing of the board is configured such that the board requires only 256K bytes of physical address space in the VME system. The 512K bytes of knowledge base memory is switched into physical memory 128K bytes at a time. This allows the host to switch in the knowledge base memory of a node into the physical address space of the system, download the knowledge base, and switch to the next node. Since the availability of each of the FC110 processors is a key feature of the board, they are not switched like the knowledge base memory. Instead, they are permanently mapped into physical memory so there is no unnecessary overhead in accessing them. Similarly, the control and status registers are also permanently mapped into physical memory.

In order to facilitate high-speed processing, each processor is capable of interrupting the host system in one of two methods: the message interrupt or the idle interrupt. If the FC110 sends a message to the host system, the message interrupt is activated. If the FC110 finishes its current task and halts execution, the idle interrupt is activated. Using jumpers on the board, any of these 8 interrupts may be enabled to affect the host operation. There is also a control register which allows the host to poll and determine which node or nodes caused the interrupt.

The FCA10VME is a A24-D16 VME interrupting slave adhering to the IEEE P1014 (rev C) standard for VME bus peripherals. The board itself has a 6U form factor making it directly compatible with most existing VME systems, both in embedded controllers and in workstations. Hardware jumpers are provided to allow both non-privileged and supervisor access. This allows it to work well as either a generally available embedded peripheral, or a system regulated resource.

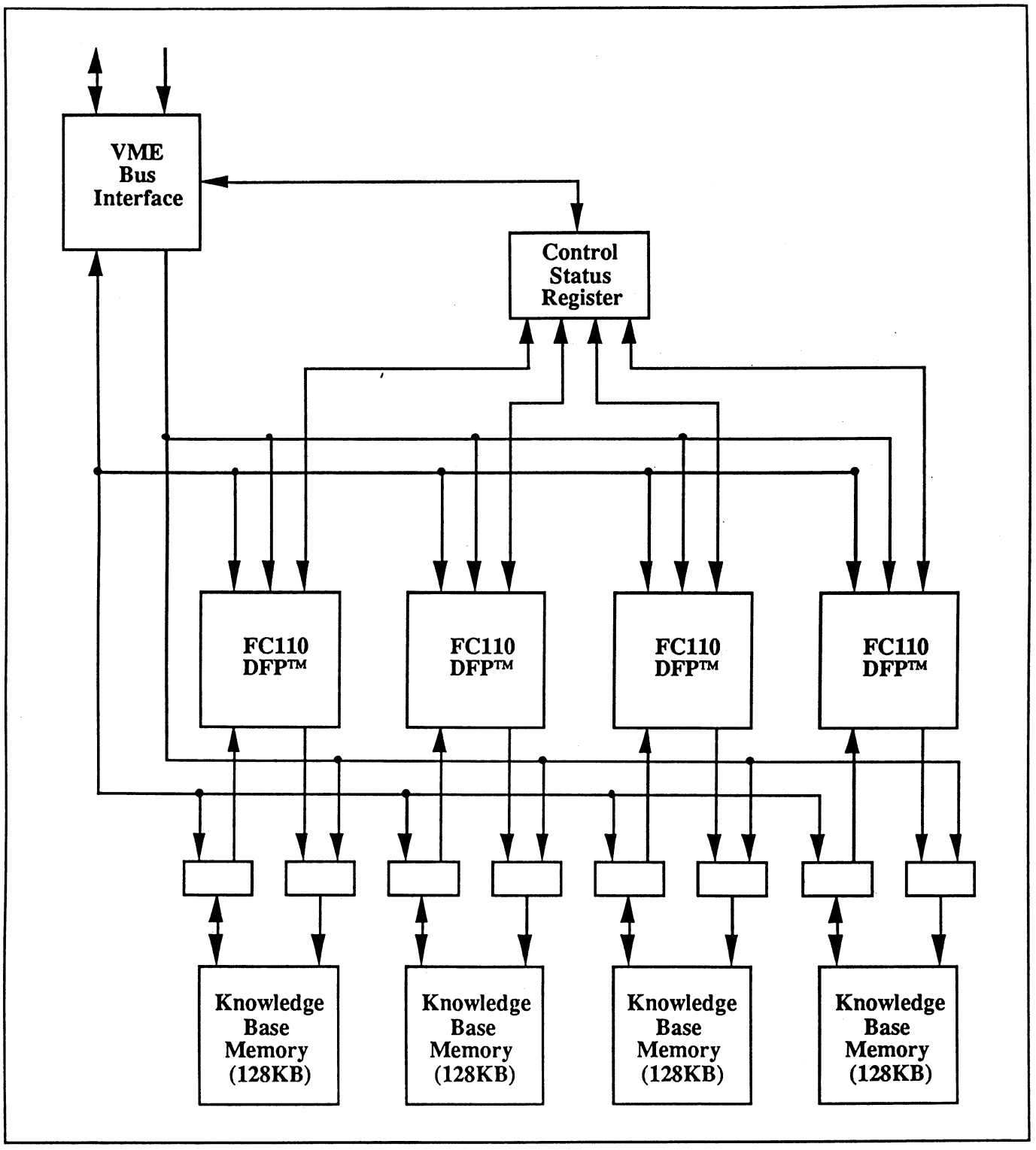


Figure 1 — FCA10VME Board Block Diagram

Development Software

The board is supported by two major software development tools. The first is the TILShell, which is a graphical tool for creating and modifying fuzzy expert systems, including ones that will run on the FCA10VME [2]. The second is the FC110 Development System, which includes the FC110 FPL Compiler, the FC110 Assembler, and the FC110 Linker [3]. The FC110 FPL

Compiler and FC110 Assembler produce relocatable object modules that are combined by the FC110 Linker to produce load images for the FC110, and C interface code for the expert system.

Using the FCA10VME

The board was designed to be very easy to integrate into existing VME-based systems. The method used to interface to the system differs depending on whether a "protected" operating system such as UNIX is used. By a "protected" operating system, we mean an operating system that prevents an application process from accessing arbitrary locations in memory, typically by using a memory management unit (MMU).

Standalone Systems

In a standalone system that does not use a "protected" operating system such as UNIX, an application program can access the processors on an FCA10VME board just by reading and writing the appropriate locations in the VME address space. An interrupt routine might be coded to respond to the board's DONE interrupt and signal the process that requested the operation (if a real-time kernel is being used), or the process might just poll the board's status register waiting for the processor to finish. The following code fragment might be used to interface to one processor after its code is downloaded:

```
#define CSR ((short *) 0x0fc0000)
#define CSR_NPEND 0x00100
#define CSR_NIDLE 0x01000
#define SRAM ((short *) 0x0fc0200)

/*
 * load inputs and start DFP
 */

void start_system ()
{
      /* Load inputs */
      SRAM[2] = x;
      SRAM[3] = y;

      /* Start DFP */
      SRAM[0] = 1;
}

/*
 * Wait for DFP and get outputs.
 */

void wait_system ()
{
      /* Watch out for optimization
         here! */

      while (*CSR & NIDLE)
            ;

      z = SRAM[4];
}
```

Note that the "while" loop in the routine "wait_system" can cause problems if the C compiler used does good optimizations. Some compilers will evaluate the condition only once, causing the loop to execute forever. If the compiler is compatible with the ANSI C standard, the cast in the definition of CSR can be changed to "(volatile short *)."

UNIX Systems

When operating under a "protected" operating system such as UNIX, an application program that wishes to access the FCA10VME board must go through the services of a device driver. The board is supplied with the C source code for a simple UNIX device driver for use under SUNOS V4.0.1. This code can be used as a prototype when developing device drivers for other operating environments.

Sample Driver Strategy

There are several implementation decisions that must be made when writing a device driver for the board. Some of these are:

- Should the driver allow access from multiple processes, or only from one process?
- Should the driver queue requests, or simply block the requesting process if the processor is busy?
- If the requests are queued, should the driver block the requesting process until the request is serviced or not?

The strategy used in the sample device driver supplied with the board allows access to a particular processor on an FCA10VME board only from a single process at a time. For a UNIX-based system, this strategy would be implemented by creating a device driver for each processor of the board. When using this device driver, the controlling process must use the following steps to download the knowledge base image created by the software development tools to a processor:

1. The controlling process opens the processor's device. If the device is already open by another process, the operating system will return an error.
2. To download the knowledge base image from the development tools into the processor's knowledge base RAM, the controlling process must first lseek to the device offset of the processor's control status register, and set the control bits for "mapped in" and "reset" by using a **write** call.
3. Next, it sends the download image to the processor by using an **lseek** to the device offset for the knowledge base RAM, and then using **write** calls to actually write the image to the RAM.

4. To finishing downloading the image and start the processor running, the controlling process performs an **lseek** to the device offset for the processor control status register, followed by a **write** to clear the "mapped in" and "reset" bits.

Now that the knowledge base image has been downloaded to the processor, the controlling process must use the following steps each time the downloaded expert system needs to be executed:

1. First, the controlling process will repeatedly **lseek** to the device offset of the control status register, and **read** the contents of the register, waiting for the processor "not idle" bit to become zero. This step can be omitted if the controlling process is sure that the processor is idle (done).

2. Next, the controlling process will **lseek** to the device offset of the shared RAM, and use the **write** system call to send the parameters for the expert system to the processor's shared RAM.

3. Next, it will then **lseek** to the device offset of the control status register again and use the **read** system call to get its contents, waiting for the processor "not idle" bit to become zero again. This indicates that the processor has finished executing the expert system.

4. Finally, it will **lseek** to the device offset of the shared RAM again, and use the **read** system call to get the values of the outputs of the expert system. At this point the processor is ready to perform another execution of the loaded expert system.

This strategy is relatively simple, but requires many system calls to execute a single cycle of the expert system, and doesn't allow multiple processes to access the same processor cooperatively. A more intelligent device driver would allow the user to do a single **lseek** and **write** to send the input parameters to the processor and start it running, and a single **lseek** and **read** to wait for completion and to read the output values. Such a device driver is currently under development.

Applications

The power of the FCA10VME board lends itself to many diverse applications. The following sections describe a few.

Factory Automation

Many factory automation system already use VME-based computer systems. With the addition of one or more FCA10VME boards, these systems can be upgraded to perform real-time fuzzy information processing and decision making with little additional hardware complexity.

Multiple-axis Control

The FCA10VME's four FC110 DFPs are capable of handling simultaneous control of four axes of motion in the most demanding environments. In less demanding environments, each processor can be use control more than one axis, for a total of more than four axes per board.

Transaction Processing

Many transaction processing systems, such as credit card verification services, require that decisions based on ambiguous data be made at very high speed. The FCA10VME can be used in this application by dedicating each processor as a fuzzy decision maker for a single transaction. Multiple boards can be used to increase the number of transactions that can be simultaneously processed, up to 256 parallel decisions in a single VME-based computer system.

References

[1] Rodney J. Corder, "A High-Speed Fuzzy Processor," Proceedings of IFSA, 1989.

[2] Gregory Hill, Erik Horstkotte and Jon Teichrow, The TILShell User's Manual, Togai InfraLogic Publication #TILS-IBM-1, January 1990.

[3] Jon Teichrow and Carl Perkins, "A Fuzzy Logic Programming Environment and Fuzzy Processor for Real-Time Applications," Proceedings of IFSA, 1988.

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FB4-2

α - カット変換チップ

Convertor between α-cut and Membership Function Methods

徳永秀和 Hidekazu TOKUNAGA
勝亦敦 Atsushi KATSUMATA
安信誠二 Seiji YASUNOBU

国際ファジィ工学研究所
Laboratory for International Fuzzy Engineering Research (LIFE)

Abstract: A computer system for fuzzy information processing is being developed. This system performs high speed numerical operations on fuzzy information by concurrently executing different functions with more than one operator. Therefore, it is necessary to develop operators that can perform numerical operations peculiar to fuzzy set theory at high speed. This report discusses the need for high-speed conversion between the membership function and the α-cut methods of representation to perform both fuzzy set and fuzzy number operations at high speed. This report also presents the basic design of a computer chip for achieving this high-speed conversion.

1. はじめに

人間の持つ主観量によるあいまいさ(ファジィ性)を取り扱う理論として、あいまいさをファジィ集合で表現し、処理するファジィ理論 [1, 2] が、注目されている。このファジィ理論は、様々な分野に応用されており [3]、その有効性が示されている。そして、今後も広範囲な分野で応用されることが期待される。

我々は、ファジィ情報処理を支援するシステムとして、ファジィコンピュータシステムの開発 [4] を進めている。このファジィコンピュータシステムは、十分な汎用性と高速性を考慮して設計されている。

ファジィ情報処理では、ファジィ理論特有の数値演算や行列演算などの、多様な数値演算を高速処理する必要がある。我々が開発を進めているファジィコンピュータは、このような数値演算を、機能の異なる演算器を複数並べて並列処理することにより、高速化を図っている。したがって、ファジィ理論特有の演算を高速処理するための演算器の開発が課題である。

本稿では、ファジィ理論に特有である、ファジィ集合演算とファジィ数演算の高速処理方法を考える。そして、ファジィ集合とファジィ数の有効なデータ表現を考察する。その結果より、メンバーシップ関数表現とα - カット表現の高速変換の重要性と、変換方法について述べる。そして、この高速変換を行なうチップの基本設計について述べる。

2. 離散化されたファジィ集合の表現

2.1 ファジィ集合演算

結びや交わり等のファジィ集合演算は、記号や数値の台集合の個々の要素のグレード値に対して演算を施す。したがって、ファジィ集合を台集合の個々の要素のグレード値のベクトルで表す(メンバーシップ関数表現 [5]) ことにより、処理の高速化ができる。

2.2 メンバーシップ関数表現

メンバーシップ関数表現は、グレード値の分解能を 8bit とすると、図 1のように表現される。メンバーシップ関数の開始点と終了点および台集合の分解能を、ヘッダとして持ち、台集合に対するグレード値をベクトルとして持つ。

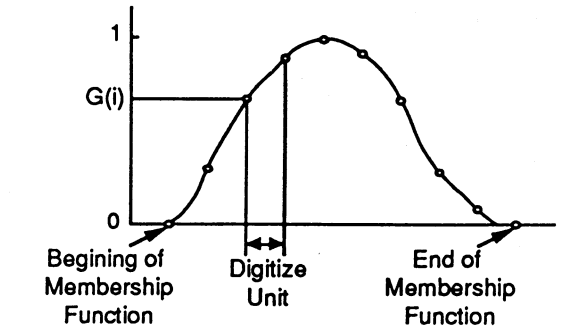
3. 離散化されたファジィ数の表現

3.1 ファジィ数演算

ファジィ数は、実数を台集合とし、α- カットが閉区間となる正規で凸のファジィ集合である。ファジィ数の和演算 ⊕ は、(1) 式に示すように定義される。

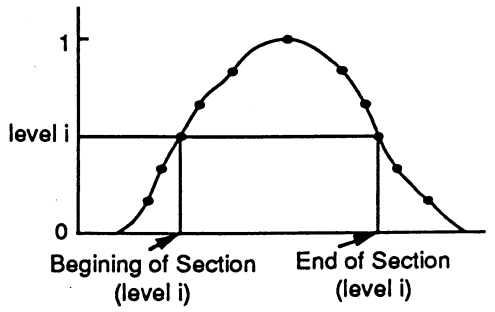
$$\begin{aligned}\mu_{M\oplus N}(z) &= \sup_{z=x+y} \min(\mu_M(x), \mu_N(y)) \\ &= \sup_{x\in R^1} \min(\mu_M(x), \mu_N(z-x))\end{aligned} \quad (1)$$

従って、メンバーシップ関数表現されたファジィ



Address →				
Begining of Membership Function				
End of Membership Function				
Digitize Unit of Support				
G(3)	G(2)	G(1)	G(0)	
G(7)	G(6)	G(5)	G(4)	
G(11)	G(10)	G(9)	G(8)	
⋮	⋮	⋮	⋮	
G(n)	G(n-1)	G(n-2)	G(n-3)	

図 1: メンバーシップ関数表現



Address →	Digitaize Unit of Grade
	Begining of Section (level 1)
	End of Section (level 1)
	Begining of Section (level 2)
	End of Section (level 2)
	Begining of Section (level 3)
	End of Section (level 3)
	⋮
	Begining of Section (level n)
	End of Section (level n)

図 2: α - カット表現

数に対して、上記の定義式をそのまま演算すると以下の演算が必要となる。

1) 台集合のすべての組合せに対する加算
2) 台集合のすべての組合せに対するメンバーシップ関数値の最小値演算
3) 台集合の加算結果の等しいもののメンバーシップ関数値に対する最大値演算

しかし、ファジィ数の定義より、α- カットはすべて一つの閉区間となる。さらに、α- レベル値が大きい区間は α- レベル値の小さい区間の部分集合となる。従って、ファジィ数の加算は、以下の演算で求められる。

1) 各 α- レベル値に対する α- カットの、区間の開始点と終了点に対する加算

従って、ファジィ数の演算は、α- カットにより演算することで高速化できる。

3.2 α - カット表現

ファジィ数の α- カットは、実数の一つの区間で表現できる。従って、α- カットは、二つの数値を対にした表現方法でメモリ内に蓄えることができる。また、グレード値の分解能をヘッダとして持つ (図 2)。

4. 表現の高速変換

4.1 高速変換の重要性

演算の高速化を考えると、ファジィ集合とファジィ数は、表現方法を変えることが望ましい。また、ファジィ数の演算結果をファジィ集合と見なし、ファジィ集合演算を行ないたい要求や、ファジィ集合をファジィ数と見なし、ファジィ数演算を行ないたい等の要求がある。

以上の要求を満足するためには、メンバーシップ関数と α- カット表現との高速な変換が重要である。

4.2 変換アルゴリズム

4.2.1 メンバーシップ関数表現から α カット表現

α- カット表現に必要なメモリ領域は、グレードの分解能によって決まる。ここで、グレードの分解能はユーザに指定させることにより得る。メンバーシップ関数表現から α- カット表現への変換の手順を以下に述べる (図 1,2,3)。

1) α- カットの開始点を求める。

a) 求めるα- カットを最小のα- レベル値 (level 1) とする。

b) メンバーシップ関数表現から取り出すグレード値の、ポインタを先頭 (G(1)) とする。

c) メンバーシップ関数表現から、ポインタより2つのグレード値を取り出す。

d) 取り出した2つのグレード値とα- レベル値を比較する。

- α- レベル値が、2つのグレード値の間に入っている場合。
  開始点を、2つのグレード値とその台集合から、直線補間を行ない求める。
- α- レベルの最小値が、2つのグレード値の間に入ってない場合。
  グレード値のポインタを1つ進め、c) の処理に戻る。

e) 線形補間により求めた値を、α- カットの区間の開始値に格納する。

f) α- レベルを1レベル上げ、グレード値のポインタを1つ進めて、α- レベルが最大値 (1) まで、c)、d)、e) の比較補間処理を行なう。

2) α- カットの終了点を求める。

α- レベル値を最大値 (1) の1レベル下から最小レベルまで、1) と同様の比較補間処理を行ない終了点を求める。

4.2.2 α カット表現からメンバーシップ関数表現

メンバーシップ関数表現は、量子度と台集合の範囲により、必要なメモリ領域が決まる。ここで、台集合の範囲は、α- カット表現より得、量子度は、ユーザに指定させることにより得る。

グレード値は次の手順で求められる (図 1,2,4)。

1) 最小のα- レベル値から2つのα- カットの開始点を取り出す。

2) 求めるメンバーシップ関数の開始点と量子度を足した値が、この2つの開始点の区間に入るか調べる。

- 入る場合

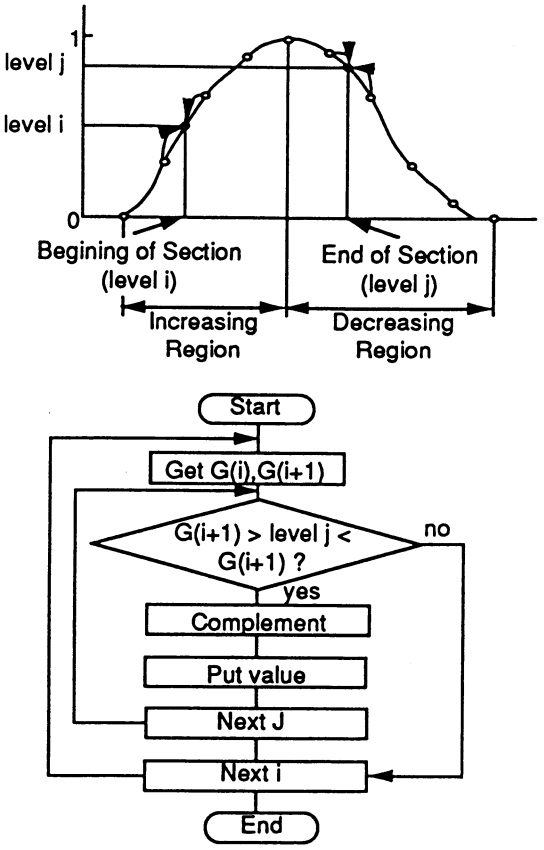


図 3: α カット表現への変換

線形補間してこの点でのグレード値を求める。

- 入らない場合

α- レベル値を1レベル上げ、1) の処理に戻る。

3) 全てのα- カットの開始点に対して上記処理が終了したら、次に終了点に対してα- レベル値の大きい方から同様の処理を行なう。

5. チップデザイン

以上のような変換方法を実現するハードウェアを検討した。本チップは、汎用コ・プロセッサとして設計されており、自ら接続されたバスを制御しない (図 5)。したがって、データの転送は CPU、DMAC(Direct Memory Access Controller) を用いる。

また、本チップは専用のメモリを持ち、前章で述べたような変換処理を効率良く実行する。従って、変換中はバスに対して影響を及ぼさないので、CPU

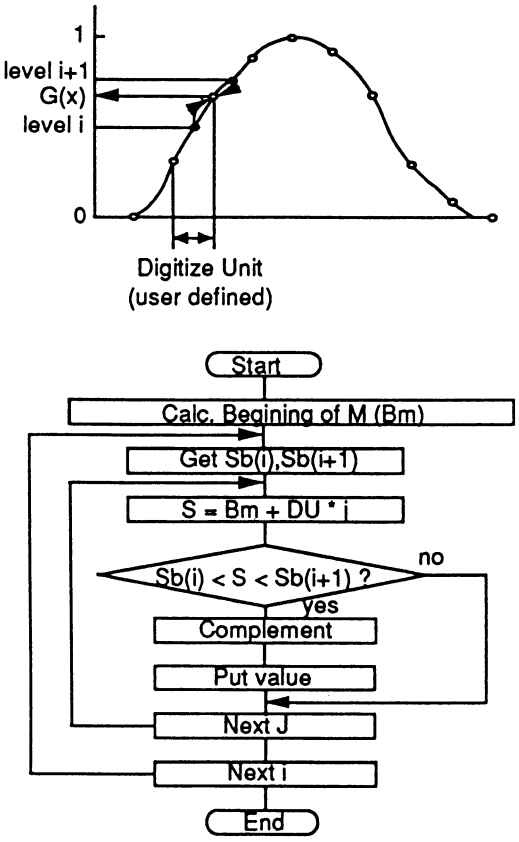


図 4: メンバーシップ関数表現への変換

等の他のプロセッサは、同時に動作できる。チップの構成を以下に示す。

1) バスインタフェース部
外部からのレジスタアクセス、データメモリアクセスを制御する。

2) データメモリインタフェース部
バスインタフェース部と制御部からのアクセスを制御する。

3) 演算部
変換のための比較演算、直線補間、を高速に実行する。

4) 制御部
命令の解釈、演算部への補間命令の発行、バスインタフェース部へのデータのアクセス要求を行なう。

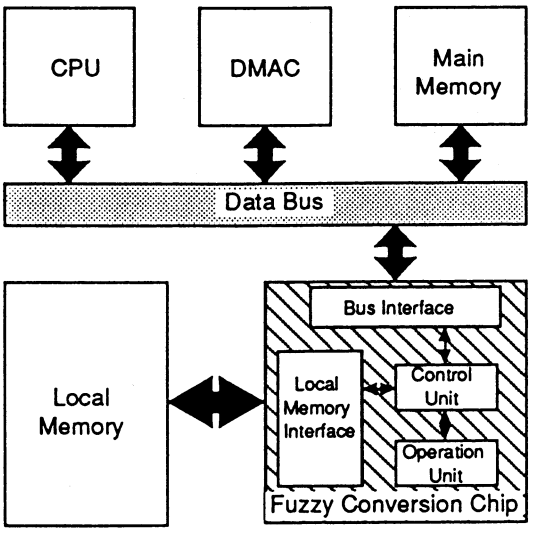


図 5: 変換チップ

6. おわりに

本稿では、α-カット表現と、グレードベクタによるメンバーシップ関数表現の変換方式について提案し、そのチップ化の基本方針について示した。本チップを用いることにより、ファジィ数演算が高速に処理できる。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、有益な助言を頂いた LIFE 第 3 研究室の山本、井上主任研究員に感謝致します。また、本研究の機会を頂いた LIFE の寺野所長ならびに、新日本製鐵 (株)、山武ハネウエル (株)、(株) 日立製作所をはじめとする組合員各社に深く感謝します。

参考文献

[1] L. A. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, pp. 338–353, 1965.

[2] 寺野寿郎, 浅居喜代治, 菅野道夫 (編). ファジィシステム入門. オーム社, 1987.

[3] 安信誠二. ファジィ推論を利用した列車自動運転. 情報処理, pp. 970 –975, 8 1989.

[4] 徳永 秀和, 勝亦 敦, 井上 由文, 山本 創造, 安信 誠二. ファジィコンピュータハードウェアアーキテクチャの一提案. 計算機アーキテクチャ研究会報告書 *(swopp 流球 '90)*. 情報処理学会, 1990.

[5] 勝亦 敦, 徳永 秀和, 安信 誠二. ファジィ集合演算チップ. 第 6 回ファジィシステムシンポジウム予稿集, 1990.

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FB4-3

ファジィ集合演算チップ
Fuzzy Sets Operation Chip

勝亦敦 Atsushi KATSUMATA
徳永秀和 Hidekazu TOKUNAGA
安信誠二 Seiji YASUNOBU

国際ファジィ工学研究所
Laboratory for Internationl Fuzzy Engineering Research(LIFE)

Information processing systems based on fuzzy set theory is characterized by a variety of operations and significant computational complexity. The computer hardware that allows the high-speed and flexible processing of these characteristics is necessary for fuzzy information processings. We have developed the processor as VLSI(Very Large Scale Integrated Circuit) with high-speed processing and flexibility for the processing of fuzzy information. The processor includes a method of parallel processing called SIMD(Single Instruction Multiple Data Stream) that has multiple basic operation elements for high-speed fuzzy information processing. The processor has a rewritable micro-programmed controller for complex fuzzy set operations with flexibility. By using this processor, it is possible to perform high-speed processing on fuzzy information based on a variety of fuzzy set operations in addition to fuzzy inference.

1. はじめに

ファジィ情報処理は，ファジィ理論 [1, 2] に基づき，人間の主観量によるあいまいさ (ファジィ性) を取り扱うことが可能な情報処理として注目されている．現在，様々な応用 [3] がなされており，今後ともその応用は増えていくと期待されている．

このファジィ情報処理では，ファジィ集合演算やベクトル演算を含む，多様なファジィ演算を処理する必要がある．そして，これらの演算は，ファジィ集合やベクタのように異なったデータ型のデータに対して行なわれ，それぞれの処理内容は，お互いに異なる．

現在，我々は，ファジィ情報処理を行なうコンピュータとして，ファジィコンピュータシステムのハードウェアとソフトウェアの開発 [4, 5, 6] を進めている．このファジィコンピュータシステムの開発にあたっては，十分な汎用性と高速性を考慮し設計している．

本稿では，ファジィ集合演算チップ (Fuzzy Sets Operator = FSO) の構成について述べる．FSO は、我々が開発しているファジィコンピュータの、ファジィ集合演算を高速に処理するファジィ集合演算部 (Fuzzy Sets Operation Unit = FSU) の核となる VLSI である．

2. ファジィ集合演算

2.1 ファジィ集合について

ファジィ集合 A は 全体集合を U とすると，メンバーシップ関数

$$\mu_A : U \rightarrow [0, 1]$$

によって特徴づけられる集合のことである [1]. $\mu_A(u)$ の値は要素 u $in U$ のファジィ集合 A への所属度と呼ばれ，この値が大きいほど要素 u がファジィ集合 A に属する度合いが大きい．

ファジィ集合 A を数式で表現する場合，全体集合 U の要素が連続値の場合と離散値の場合が考えられる．

1) 要素 u が連続値の場合[1]

$$U = \{u | a \leq u \leq b\}$$
$$\mathbf{A} = \int_U \mu_A(u)/u$$

2) 要素 u が離散値の場合

$$U = \{u_0, u_1, \cdots, u_n\}$$
$$\mathbf{A} = \mu_A(u_0)/u_0 + \mu_A(u_1)/u_1 + \cdots + \mu_A(u_n)/u_n$$

[1]実数区間を考えると全体集合は無限集合になる

$$= \sum_{i=0}^{n} \mu_A(u_i)/u_i$$

また，ファジィ集合に対しては，通常の集合と同様に和・積・補集合等を定義することができる [1]. 和，積を求めるには max,min の演算方式を用いることが多い．しかし，一般的な t-norm, s-norm を考えるとユーザが定義する演算方式は無限に定義可能である [2]. これらの演算方式は応用により最適な方式が利用されるが，論理和 / 積 (logical)，代数和 / 積 (algebraic)，限界和 / 積 (bounded)，激烈和 / 積 (drastic) と言った，演算方式が代表的である.

2.2 ファジィ集合の表現

ファジィ情報をコンピュータ上で高速処理するためには，ハードウェア化を考慮して，ファジィ集合を表現するデータ形式を決定する必要がある.

上述のように，一般にファジィ集合の表現には，全体集合の要素が連続値の場合と離散値の場合がある. 全体集合の要素が連続値の場合，全体集合は数値で表され，離散値の場合，記号で表される. 現状のファジィ集合演算の応用を見ると，全体集合は数値で表されていることが多く，この場合の処理の高速化が必要である. そこで，ファジィコンピュータ内のメモリへの表現方法は，全体集合の要素が連続値の場合を重視して決定する.

ハードウェア化による処理の高速化を実現するためには，高速なデータ転送が必要である. そのためには，処理に必要なデータをアクセスしやすい形で表現しておかなければならない.

以上の考察から，ファジィ集合の表現には図 1に示すように，グレード値のベクタ表現とした.

このグレードベクタには，全体集合が連続値である場合に，処理に必要である最低限の情報をヘッダとして付けている [7][2].

また，全体集合が離散値の場合には，全体集合を規定するためにグレードベクタの添字を一致させることにより，単純なベクタ演算として処理できる.

2.3 ファジィ集合演算の特徴

ファジィ集合演算をハードウェアで処理する時，次の特徴を考慮することで高速な演算が可能になる.

- MIN, MAX 演算

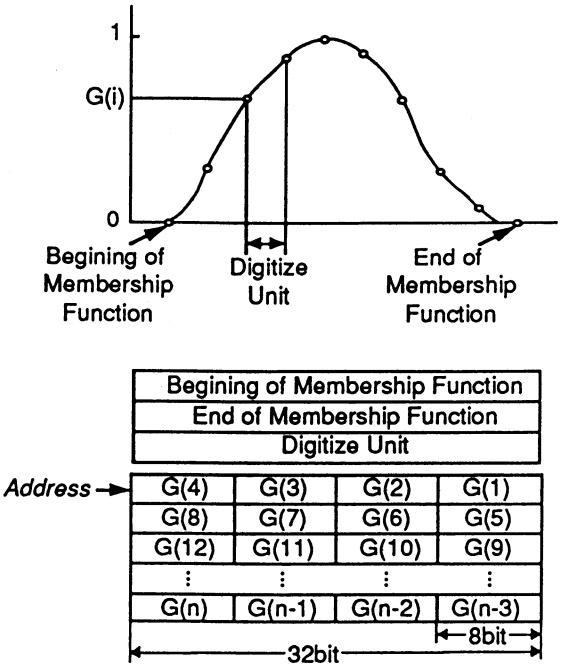


図 1: グレード・ベクタによるメンバーシップ関数の表現

これらの演算は，従来のプロセッサではサポートされていない．しかし，ファジィ集合演算では，もっとも多用されている．また，ハードウェア化により高速処理が容易に実現できる.

- 低演算精度

  求められる演算精度が，通常の数値演算に求められる精度よりも低い．一般に 4 から 8bit 程度の精度で充分である [8, 9, 10].

- ベクトル性

  同一の演算を複数のデータの対して施す.

また，演算の多様性として，t-norm, s-norm を考えると無限の演算方法があるという点が挙げられる. これらの演算方法は，四則演算と MIN,MAX 演算等の基本演算で記述できるので，基本演算の高速化と，基本演算を複数回行なう場合の処理の高速化を考慮する必要がある.

3. チップデザイン

3.1 チップ全体構成

ファジィ集合演算チップは，

[2]これらの情報により，α カット変換，要素間のグレード値の補間，量子度が区間によって異なるファジィ集合の表現等が可能となる

1) 演算部

基本演算を実行する.

2) 制御部

命令を解読し,演算部を制御する.

3) インタフェース部

外部とのデータ転送を行なう.

から構成される (図 2). 以下にそれぞれの回路について説明する.

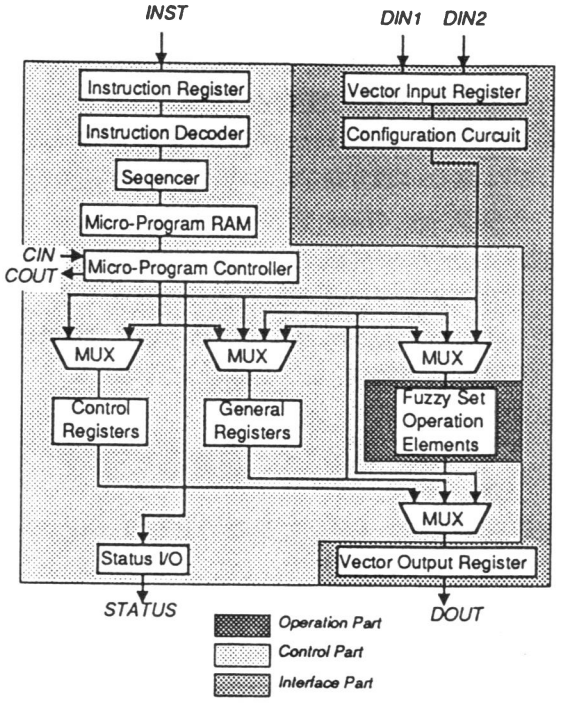


図 2: ファジィ集合演算チップのブロック図

3.2 演算部

メンバーシップ関数は図 1に示すように,グレード値を 8bit 分解能とした. また,他の演算器とのメモリの共有が容易になるように 1 ワードを 32bit にした. 要素の数には制限はない. このように,メンバーシップ関数は 8bit のベクタで表され, 1 ワードに 4 個の要素を持つ.

このメンバーシップ関数の演算を高速に実行するために, 演算回路は 4 個の演算器を内蔵した SIMD(Single Instruction Multiple Data Stream) 並列処理方式を採用した. これにより,4 つのベクトルに対する同一の処理を同時に実行できる. 個々の演算器は,ファジィ集合演算に特有な演算 (MAX,MIN) と簡単な算術演算を処理できる.

3.3 制御部

多様なファジィ集合演算を高速に実行するために,制御部にマイクロプログラム方式を採用した. この方式により, t-norm,s-norm などの複雑なファジィ集合演算も,演算回路でサポートされている基本演算を用いてマイクロプログラミングすることにより,高速処理が可能である.

また,用途に合わせて必要な機能を実現できるように,マイクロプログラムメモリは RAM で実現し,書き換え可能である.

マイクロ命令は,表 1に示すように,データ転送命令,演算命令,分岐命令をサポートしている. データ転送命令は, チップ内部のレジスタ間での転送を行なう. 演算命令は,前節で示した演算部の処理できる基本演算命令を実行する. 分岐命令にはジャンプとコールがあり,分岐条件 (イベント) にはレジスタ間の比較の結果等が使用できる.

表 1: マイクロ命令の例

MOVE	データ転送
JUMP	ジャンプ
CALL	サブルーチン呼びだし
RETURN	サブルーチンからの戻り
MIN	MIN 演算
MAX	MAX 演算
ADD	和
SUB	差
MUL	積

3.4 インタフェース部

MIN,MAX のような簡単な演算の場合には,演算部での実行は高速である。しかし, これらの演算には, 2 つの入力データをロードし 1 つの出力データをストアする必要があるため, これらのデータ転送能力により処理速度が制限されてしまう. この問題を解決するため,入出力データバスを分離し,2 つの 32bit 入力バスと 1 つの 32bit 出力バスを設けた.

また,命令用のバスも専用に用意した. このように,バスを完全に分離することで, パイプライン動作が可能となり,高速処理が期待できる.

3.5 接続例

ファジィコンピュータに複数の FSU チップを使用する場合, (1)1 ワードのベクトル要素数を増加させ, 単一のファジィ演算を高速化する方法と, (2) 複

数の演算部にし，複数のファジィ演算を同時に実行する方法がある．

(1) の高速化が可能となるように，制御部を使用しないスレーブモードの機能がある．この機能により，n 個の FSU チップを使用する場合，n x 4 個の演算器を持つ SIMD 方式ベクトルプロセッサを構成できる．この接続例を図 3に示す．

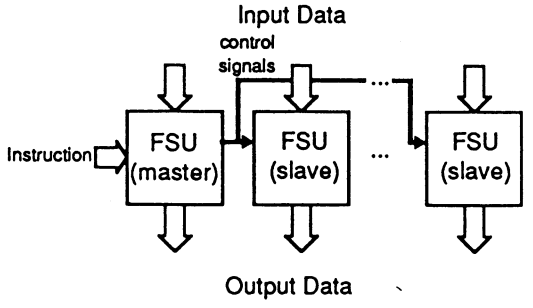


図 3: ファジィチップ接続例

4. おわりに

本稿では，ファジィ集合演算の特徴を考慮し，ファジィ情報処理に適したファジィ集合演算チップの構成について示した．

このファジィ集合演算チップの特徴は，

- グレードベクタ表現されたファジィ集合の処理
- MIN,MAX 演算を実行可能な演算部
- SIMD 並列処理方式によるグレードベクタの高速処理
- 書き換え可能なマイクロプログラム方式制御部
- バスを完全に分離し，高速なデータ転送を可能としたインタフェース部

である．

これらの特徴により，本 FSU チップを使用することで，ファジィ情報処理の高速化が可能である．

謝辞

本稿をまとめるにあたり，有益な助言を頂いた LIFE 第 3 研究室の山本，井上主任研究員に感謝致します．また，本研究の機会を頂いた LIFE の寺野所長ならびに，山武ハネウエル (株)，新日本製鐵 (株)，(株) 日立製作所をはじめとする組合員各社に深く感謝します．

参考文献

[1] L. A. Zadeh: Fuzzy sets, *Information and Control*, pp. 338–353, 1965.

[2] 寺野寿郎, 浅居喜代治, 菅野道夫 (編): ファジィシステム入門, オーム社, 1987.

[3] 安信誠二: ファジィ推論を利用した列車自動運転, 情報処理, pp. 970 –975, 8 1989.

[4] 徳永 秀和, 勝亦 敦, 井上 由文, 山本 創造, 安信 誠二: ファジィコンピュータハードウェアアーキテクチャの一提案, 計算機アーキテクチャ研究会報告書. 情報処理学会, 1990.

[5] 井上 由文, 山本 創造: 計算機言語におけるファジィ集合の取り扱いについて, 第 *40* 回全国大会予稿集, pp. 47–48. 情報処理学会, 1989.

[6] 井上 由文, 安信誠二: ファジィ情報処理の機能を持つオブジェクト指向プログラミングシステム MoNo の概念について. 第 *4* 回人工知能学会全国大会予稿集. 人工知能学会, 1990.

[7] 徳永 秀和, 勝亦 敦, 安信 誠二: α- カット変換チップ, 第 *6* 回ファジィシステムシンポジウム予稿集, 1990.

[8] 渡辺浩之: ファジィ推論法のＶＬＳＩ化, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J72-A No.2, pp. 179–187, 1989.

[9] H.Watanabe and W.Dettloff: Reconfigurable fuzzy logic processor - a full custom digtal VLSI, *International Workshop on Fuzzy System Applications*, pp. 49–50.

[10] M.Togai and H.Watanabe: A VLSI implementation of fuzzy inference engine - toward an expert system on a chip. *2nd Coference on Artificial Intelligence Applications*, pp. 192–197.

問い合わせ先

〒 231 横浜市 中区 山下町 89-1
シイベルヘグナービル 4 階
国際ファジィ工学研究所 第 3 研究室
勝亦 敦
Tel: 045-212-8243
Fax: 045-212-8255
E-Mail: kat@lab3.fuzzy.or.jp

FB4-4

補間機能を持たせた多入力ファジィ推論ボード

Virtual Paging Fuzzy Inference Board with Interpolation Circuit

大谷　正幸*)　　芦田　隆次*)　　蜂巣　史良*)　　廣田　薫**)
Masayuki Otani, Takatsugu Ashida, Shiroh Hachisu, Kaoru Hirota
*)マイコム株式会社　研究開発部
Mycom, Inc. Research & Development Division
**)法政大学　工学部　電気工学科　計測制御専攻
Dept. of Instrument & Ctl. Eng., College of Eng., Hosei Univ.

Abstract : Virtual paging fuzzy chip with 16 bit input and 8 bit output has been already reported. Based on this method, an extended fuzzy inference engine board ,which has 48 bit input and 16 bit output, is presented.
The board of the presented method is consisted of very small memory IC's more than the previous method. This confirmes that the presented method is of much practical use. It is applied to the model helicopter control.

1．はじめに

仮想ページング推論方式についてはすでに報告している。[1)2)3)4)] この推論方式は前もってファジィ演算を行い、結果をメモリに格納しておく。そして入力条件が確定した時に入力条件に対応する演算結果のデータを引き出すものである。

しかしこの方式では入力のビット数が１ビット増えるごともしくは出力のビット数が倍に増えるごとに、倍のメモリ容量が必要になる。つまり入力および出力数の増加にともないメモリ容量は指数的に増加する。従ってこの方式のみでファジィ推論を行う場合には、採用するメモリ容量に合わせて入力および出力点数を制限する必要があった。

そこで仮想ページング方式の特性を生かしつつ入力および出力点数を増やすことを目的とした研究を行い基板レベルではあるが完成し、本方式の実用性を確認した。

本稿では、提案している方式の概念および基板の内容について発表する。

2．構成

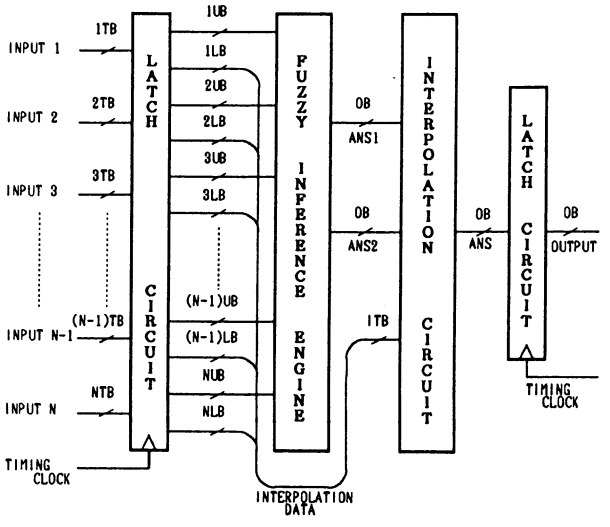


図１．構成図

提案している方式の概念の構成図を図１に示す。

2-1.ラッチ回路部(Latch Circuit)

入力および出力部のデータ保持用のラッチ回路部。

2-2.ファジィ推論エンジン部 (Fuzzy Inference Engine)

ファジィ推論を行う。

2-3.補間部(Interpolation Circuit)

ファジィ推論エンジン部の出力（結論）と補間用データによる補間演算を行う。

3．制御方式

図１の構成図に基づいて提案の制御方式を説明する。

3-1.構成図の定義の説明

ファジィ推論の入力はINPUT 1からINPUT NまでのN項目あるとする。各々の入力のビット数はＸＴＢで表現される。従って入力の合計ビット数ＴＢは、

$$TB = \sum_{X=1}^{X=N} (XTB) \qquad \text{bit (1)}$$

$$X = \{1,2,3,\text{-----},N-1,N\}$$

各々の入力ＸＴＢは、入力部のラッチ回路を介してＸＵＢとＸＬＢに分けられる。

$$XTB = XUB + XLB \quad \text{bit (2)}$$

ファジィ推論部には各々の入力ＸＴＢのうちＸＵＢのみが接続される。従ってファジィ推論部の入力部の合計ビット数ＦＴＢは、

$$FTB = \sum_{X=1}^{X=N} (XUB) \qquad \text{bit (3)}$$

補間部の補間データは、各々の入力ＸＴＢのうちのＸＬＢのみが接続される。従って補間データの合計ビット数ＩＴＢは、

$$ITB = \sum_{X=1}^{X=N} (XLB) \qquad \text{bit (4)}$$

図中のＯＢは出力のビット数とする。

3-2.ラッチ回路部

入力部と出力部にあり、ファジィ推論エンジンの推論時間および補間演算時間を考慮して各々ラッチ回路を設けてデータの保持を行う。データ保持のタイミングはタイミングクロック信号で行う。

3-3.ファジィ推論エンジン部

ファジィ推論エンジン部の入力部では、入力すべてのビット数ＴＢが接続されるのではない。各々の入力ＸＴＢからいくつかの上位ビットだけのＸＵＢのみが接続される。

従ってファジィ推論エンジン部のメモリ容量は、従来の仮想ページング方式のみの場合に比べて非常に小さくすることが可能となる。

従来方式のメモリ容量　：

$$OB \times 2^{TB} \quad \text{bit} \quad (5)$$

提案の方式のメモリ容量　：

$$OB \times 2^{FTB} \quad \text{bit} \quad (6)$$

提案の方式と従来方式の比：

$$2^{-ITB} \quad (7)$$

ここでファジィ推論エンジン部におけるメンバーシップ関数は、ファジィ推論エンジン部に接続されているＸＵＢビットのみで作成するのではなくＸＴＢビットの台集合で作成しておく。しかしファジィ推論エンジン部のメモリには、ＸＵＢで離散された入力条件のみが格納される。

入力条件のＸＵＢビットのみで構成されるデータをＸＵＤ、ＸＵＢのＬＳＢビットのみを１にしたデータをＸＬＳＢＤとすると、ファジィ推論エンジン部の結論部ＡＮＳ１とＡＮＳ２は以下の関係式で表現できる。

$$ANS1 = f(1UD, 2UD, 3UD, \text{-----}, (N-1)UD, NUD) \quad (8)$$

$$ANS2 = f(1UD+1LSBD, 2UD+2LSBD, 3UD+3LSBD, \text{-----}, (N-1)UD+(N-1)LSBD, NUD+NLSBD) \quad (9)$$

このＡＮＳ１とＡＮＳ２によってINPUT 1からINPUT Ｎまでの真の入力データの一番近い離散データの結論が導き出される。

このＡＮＳ１とＡＮＳ２の結論を得るために必要なメモリ容量と従来方式とのメモリ容量の比は、

提案の方式のメモリ容量　：

$$OB \times 2^{I+FTB} \quad \text{bit} \quad (10)$$

提案の方式と従来方式の比：

$$2^{I-ITB} \quad (11)$$

3-4.補間部

補間部では、ファジィ推論エンジン部で出力された結論ＡＮＳ１とＡＮＳ２および各入力のＸＬＢビットで構成されているデータＸＬＤによって決められた演算を行う。

まずＸＬＢビットで構成されているデータＸＬＤによって補間のデータＩＰＮＤの演算を行う。この計算の関係式は、次式のように表現できる。

$$IPND = f(1LD, 2LD, 3LD, \text{-----}, (N-1)LD, NLD) \quad (12)$$

次に補間データＩＰＮＤと、ファジィ結論データのＡＮＳ１，ＡＮＳ２によって最終結論ＡＮＳを導く。この計算式は、次式のように表現できる。

$$ANS = f(IPND, ANS1, ANS2) \quad (13)$$

4．提案の方式と従来方式の検証

従来の仮想ページング方式の１６ビット入力・８ビット出力の場合と、提案の方式に置き換えた場合の実際の推論結果の違いを検証してみた。

検証の条件は、２条件１結論で各々のビット数は８ビットとした。また提案の方式の場合、ＸＵＢを３ビット・ＸＬＢを５ビットに割り当てた。

この条件下での各々のメモリ容量および比は、

従来方式のメモリ容量　［式(5)より］：

$$8 \times 2^{8+8} \text{ bit} = 64 \text{ Kbyte} \quad (14)$$

提案の方式のメモリ容量　［式(10)より］：

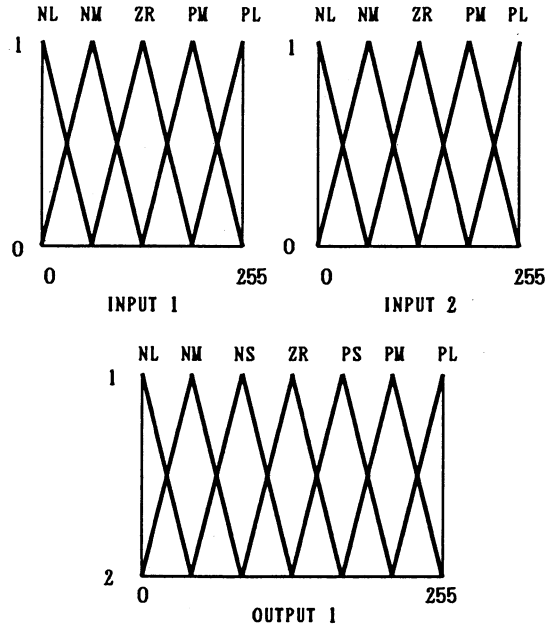
$$8 \times 2^{1+3+3} \text{ bit} = 128 \text{ byte} \quad (15)$$

提案の方式と従来方式の比［式(11)より］：

$$2^{1-(5+5)} = 1/512 \quad (16)$$

両方式ともファジィ演算方式は、ＭＡＸ－ＭＩＮ合成面積法で行い、補間演算は平均演算で行った。

また各々のメンバーシップ関数およびプロダクションルールは図２の内容で検証を行った。



MEMBERSHIP FUNCTIONS

INPUT 1

INPUT 2 \	NL	NM	ZR	PM	PL
NL	PL	PL	PM	PS	ZR
NM	PL	PM	PS	ZR	NS
ZR	PM	PS	ZR	NS	NM
PM	PS	ZR	NS	NM	NL
PL	ZR	NS	NM	NL	NL

FUZZY PRODUCTION RULES

図２．検証の条件

検証結果を以下に示す。

二方式の結論の偏差の絶対値の平均値：

3.956176 (255) (17)

結論が違った回数：

59374回 (65535) (18)

最大偏差： 13 (255) (19)

最大偏差の条件と結論：

入力1	入力2	結論A	結論B
34	B4	9A	8D
34	B5	99	8C
35	B4	99	8C
36	B6	97	8A
74	74	9A	8D
74	75	99	8C
74	B4	6F	62
75	74	99	8C
75	B5	6E	61
75	B6	6D	60
76	76	97	8A
76	B5	6D	60
77	B7	6B	5E
78	78	94	87
78	B7	6A	5D
B4	34	9A	8D
B4	35	99	8C
B4	74	6F	62
B5	34	99	8C
B5	75	6E	61
B5	76	6D	60
B6	36	97	8A
B6	75	6D	60
B7	77	6B	5E
B7	78	6A	5D

表1．最大偏差

検証結果を見る限りメモリ容量を1／512に減らしても充分制御できると思われる。

5．ファジィ推論エンジン基板

提案の手法を用いて、48ビット入力・16ビット出力の基板を製作した。基板は非常に小さく作ることができた。

この基板では、6入力2出力（各々8ビット）もしくは6入力4出力（入力各々8ビット・出力各々4ビット）の形態をとることができる。各々の入力8ビットの内XUBに3ビット・XLBに5ビットを割り当てている。

この条件での式(5)，(10)，(11)は、

式(5)より

$16\times2^{(8\times6)}=16\times2^{48}$ bit (20)

式(10)より

$16\times2^{(1+3\times6)}=16\times2^{19}$ bit (21)

式(11)より

$2^{(1-6\times5)}=1/2^{29}$ (22)

これは従来の仮想ページング方式の場合に比べて、非常にコンパクトになっていることが判る。従来の方式の場合には、現在のメモリICではハードウェアを実現することは不可能である。しかし提案の方式では、必要なメモリ容量が8Mbitなので4Mbitのメモリが2チップあれば実現できることになる。

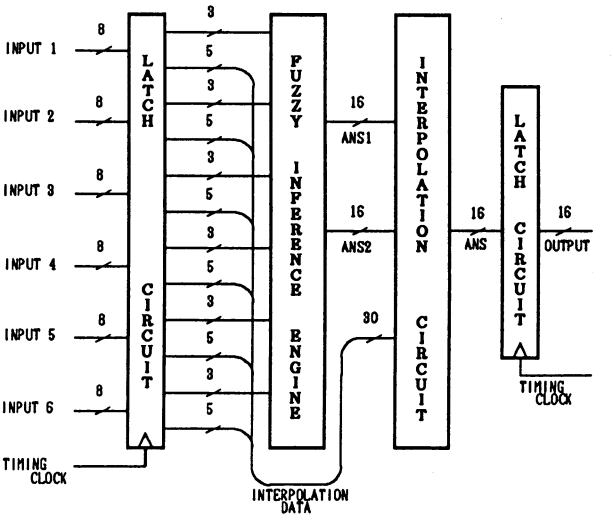


図3．ファジィ推論エンジン基板構成図

補間部は、メモリとLCAを使用している。

ファジィ推論エンジン部のメンバーシップ関数およびルールの作成と、ファジィ推論エンジン部に格納される推論結果の演算は、我々が開発したファジィ開発ステーションを使用している。

汎用のファジィ開発ステーションを、製作した基板用にモディファイし、応用研究のファジィ制御のチューニングアップに使用している。

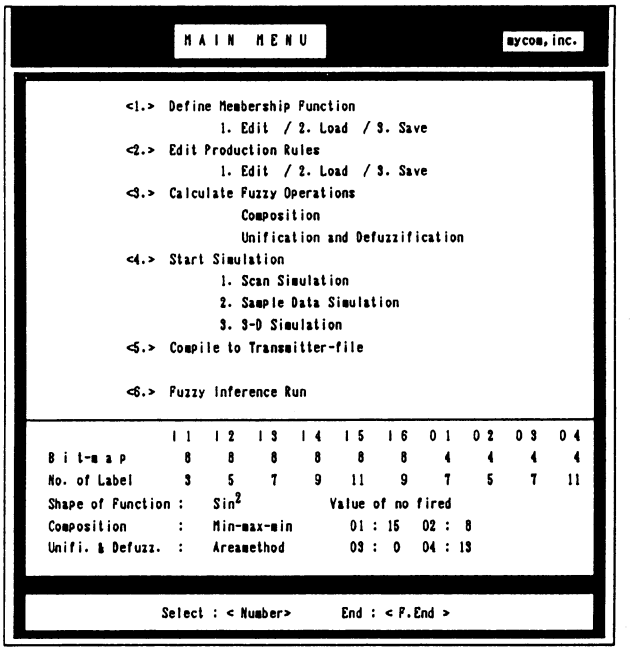


図4．ファジィ開発ステーションの画面の一例

6．今後の展開

今回製作した基板は、LCA以外は汎用のロジックICを使用している。しかし、メモリ部をマスクロム、汎用IC部をPLD・ゲートアレー、またそれ以外にA／D・D／Aなどを使用することによりハードウェ

アの構成はますますコンパクトにすることが可能であろう。

最終的な形としてはＶＬＳＩにして１チップもしくは２チップで構成できると思われる。我々はこの方式についてのＶＬＳＩ化の開発を進めている。

また補間演算方式について、様々な演算方式を検討する必要がある。

この方式についての応用研究として、モデルのヘリコプターの制御を研究している。この研究の報告を今回のシンポジウムのデモセッションで行う。デモセッションでは、ＣＣＤカメラからの画像情報でラジコンの４種類レバーの操作を行う。

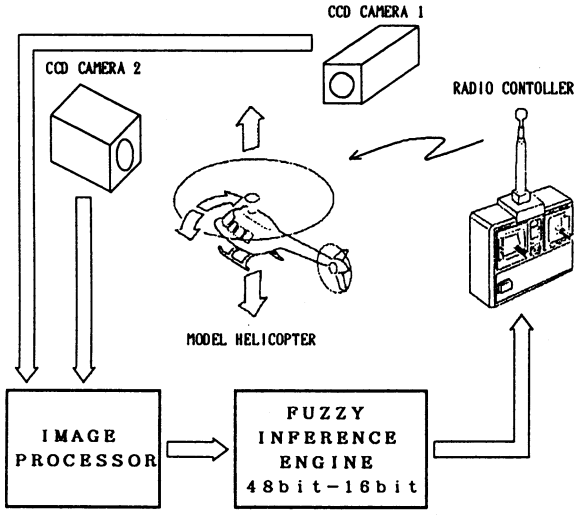


図５．モデルのヘリコプターの制御

７．ソフトウェアへの応用

この方式は、ソフトウェアファジィ演算にも応用することができる。ソフトウェア演算の場合、仮想ページング方式でメモリに格納されるべき結論データを事前に演算しておき、配列もしくは補助記憶装置に格納しておく。

次に入力条件が確定した時に、該当する結論データを配列もしくは補助記憶装置から引き出す。その後補間演算のみをソフトウェア演算することにすれば、従来のソフトウェアファジィ演算で推論時間が遅い点で問題になっているところがある程度解消することができる。

また従来のソフトウェアファジィ演算では、ルール数およびメンバーシップ関数のラベルなどにより推論速度が変動する。しかし提案の方式を採用することによりこの点は解消される。

８．まとめ

提案の方式の持つ特徴は、ハードウェア面では仮想ページング方式に比べてその特徴は生かしつつメモリ容量については大幅に軽減することが可能である。推論結果においても偏差は少なく充分実用的に使用できることも確認できた。

Reference

(1)H. Arikawa and K. Hirota: "Fuzzy Inference Engine by Address-look-up & Paging Method", Proc. International Workshop on Fuzzy System Applications, Iizuka Japan, pp.45-46 1988.

(2)H. Arikawa and K. Hirota: "Inverted Pendulum Driven by Single-board Fuzzy Controller", Proc. International Workshop on Fuzzy System Applications, Iizuka Japan, pp.267-268 1988.

(3)H. Arikawa, K. Hirota and M. Sakawa: "Virtual Paging Fuzzy Chip and Fuzzy Work Station" (in the Japanese language), Proc.5th Fuzzy System Symp., Kobe Japan, pp.53-58 1989.

(4)K. Hirota and H. Watanabe: "Grasping 2-D Moving Object Using Fuzzy Controlled Arm Robot" (in the Japanese language), Proc. 5th Fuzzy System Symp., Kobe Japan, pp.65-70 1989.

(5)H. Arikawa and K. Hirota: "Fuzzy Inference Chip by Address-look-up and Virtual Paging Method" (in the Japanese language), The Society of Instrument and Control Engineers Vol.26 No.2 180/187, pp.58-65 1990.

(6)M. Otani, T. Ashida, S. Hachisu, N. Yubazaki and K. Hirota: "Fuzzy Inference Engine Board Using Virtual Paging Fuzzy Chips & Interpolation Circuits", Proc. North American Fuzzy Information Processing Society, Toront Canada, pp.25-28 1990.

(7)寺野寿郎,浅居喜代治,菅野道夫: 応用ファジィシステム入門, オーム社, 1989.

(8)三矢直城,田中一男: Ｃ言語による実用ファジィブック, ラッセル社, 1989.

問い合わせ先：〒616 京都府京都市右京区嵯峨広沢南下馬野町12
マイコム株式会社　研究開発部
大谷正幸　芦田隆次
TEL 075-882-3601
FAX 075-882-6531

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FC1-1

ファジィ論理によるカーネーション苗の判別

Evaluation of Carnation Speedling By Fuzzy Logic

寺野寿郎* 増井重弘* 田中民雄* 藤原英幸**
T. Terano S. Masui T. Tanaka H. Fujiwara
法政大学 工学部* 日本たばこ株式会社**
Faculty of Engineering, Hosei University Japan TABAKO INC.

Abstract

Image understanding of natural scene or things is not so easy, because there is no fixed standard pattern. We have studied these problems using fuzzy set theory for these several years. This paper is one of the application of our studies, where automatic inspection of carnation seedlings in a plant-factory is reported. Their shape, size and color are examined qualitatively and the final judgement is done by the integrated value.

1．緒言

画像認識は人工知能の重要な課題であり，これまで多くの研究が行われている．そして，その内容は文字や幾何学図形の判別から自然物画像の意味理解へと進みつつある．この分野へのファジィ応用はまだ少なく，輪郭線の判別や手書き文字認識などで統計処理に代わる手法として研究されている程度である．我々は以前から自然物の認識にファジィを利用する研究を進めてきた．自然物は同一種類のものでも形状，大きさ，色彩などが様々であり，定性的な判断が必要である．それをファジィ集合に変換してファジィマッチングを行い認識する方法をとっている．本論文はこの方法を利用して植物工場における苗の品質を判別した研究結果の報告である．苗の品質判別は熟練した人たちにとっては容易な仕事であるが，コンピュータにとっては難しい問題である．ここでは特に色彩が重要な情報であるので，輪郭のほかに色のファジィ処理を行った．

2．システム構成

本研究に使用した画像処理システムは図1に示すような構成を持つ．コンピュータは16bitマイコン(PC-9801RX2)で，画像処理装置(PIAS LA-555)は512×512 画素，256階調，R・G・Bの3画面のカラー処理をする．情報処理の流れを図2に示す．対象となる苗は黒い背景の前に置かれ，上面と側面からＣＣＤカメラで撮影する．輪郭の抽出には背景と輝度値の差が最も大きいG画面の情報を利用する．すなわち，全画素の輝度値を1と0とに分け，膨張・収縮を行って境界をなめらかにした後にラプラシアンをとる．その最外部を追跡することによって輪郭線が求まる．

3．特徴量の抽出とそのファジィ表現

まず，苗の品質判別を専門家はどのような基準で行っているかを調べた．その結果，専門家の知識はきわめて感覚的・抽象的で簡単にまとめられており，そのままではファジィ表現できないことが分かった．そこで，それらを形状的なものと色彩に関するものと色彩に関するものとに分け，自然言語を用いて，前者は定性的な量の形に変換し，後者は葉と茎に分けて全体的な特徴と部分的な特徴の抽出を試みた．その結果を表1と表2に示す．

この表にでてくる言語変数の認識は次のようにして行う．苗の背丈は側面の画像の輪郭線より最小自乗法によって求める．縦横比も同様にして求まる．また，葉の面積は上面からの画像の輪郭から求める．葉が重なっていることもあるが，同一種類の苗ではでは良品と不良品とではかなり面積が違うので，重なりは無視できる．測定結果は基準となるファジィラベルと比較され，背丈と面積は2種類，縦横比は3種類のラベルのどれかに分類される．図3～図5に基準ラベルのメンバーシップ関数を示す．

色の判断は形状よりもかなりデリケートである．まず，病気の苗は葉に黒色または褐色の斑点があらわれる．これはR・G・Bの画面でかなり顕著な輝度値を示すので，上面の画像から明確に検知できる．つぎに成長不良の苗は茎も葉も全体的に緑が薄い．しかし，側面画像においても茎は葉と同色であり，また，葉の影になったりしていて茎の部分を検知するのは難しい．そこで，側面画像で色の白っぽいところが全体の面積の何パーセントを占

めるかで茎の健康度を判定することにした．最後に苗全体の色の良さは上面画像の緑の度合いを見ることで評価する．色の判定は照明の具合などで輝度値が変わるので，表３の１行目に示すようにＲ・Ｇ・Ｂの範囲を定め，その範囲内にある画素の平均値を求めた．同表の２行目以下は色の判断に用いた輝度値の範囲を示す．

図６は白い部分の面積比を２種分ける基準ラベルのメンバーシップ関数である．全体の色が健康な緑であるための判定にはＲ・Ｇ・Ｂ輝度値で直接表すことをやめ，（Ｒ－Ｇ）と（Ｇ－Ｂ）という輝度値の差をとって表す．図７，８はその基準色のメンバーシップ関数である．これは照度の差によって生じる誤差を除くためである．

４．苗の判別実験

上記の装置を用いて，約15cmに成長した苗の試料13種に対して判別実験を行った．この情報処理の流れを図９に示す．その上面と側面の輪郭線を図１０と図１１に示す．さて，良い苗の定義は前に述べたように形状（背丈が中以上，縦横比が中ぐらい，上面積が大）と色（全体的に緑，葉に斑点が少ない，葉に白い部分がない）について６項目で，試料はこれらの点について基準ラベルと比較されそのマッチングの度合いが決められる．但し，斑点については有無だけの２値で分けられる．その結果を表４に示す．

最終的な判定は６項目を総合して決められる．これには各評点の重み付き和を求める方法と，各評点のMINをとる方法の２種類を試みた．前者についての重みの配分は実験の結果，背丈と縦横比にそれぞれ0.05，上面積0.1，全体の色と斑点にそれぞれ0.35，茎の白い部分に0.1が最もよく，色の比重がかなり大きい．総合点が0.69以上を良品，それ以下を不良品と判別する．MINをとる場合には評価が厳しくなるので，0.31以上を良品とした．

判定の結果は表５のとおりで，MIN法では良い苗を不良品と誤判定した場合が２回あるが，重み付け法では誤判定はない．一般に重み付け法は人間の直感的判断に近い．一方，MIN法は不良品を確実に除くことができる利点がある．

５．結論

本論文では植物工場におけるカーネーション苗の品質判定工程を自動化するための基礎研究である．植物は大きさ，形，色などが一品ごとに異なり，また，品質の評価は極めて微妙なので，数量的な判別方法は利用できない．ここでは苗の形状・色彩の特徴をファジィ集合として検知し，それを同じくファジィ集合で表現した基準ラベルと比較して品質を判定する方法を提案し，その実験結果について述べた．判定結果は人間の評価とよく一致しており，この方法が定性的評価問題に有効なことを証明した．

参考文献

［１］寺野，増井，河野，山本：
ファジィ論理による農作物の形状認識，
第３回ファジィシステムシンポジウム
PP 127/132(1987)

［２］T.Terano, S.Masui, S.Suzuki:
Flower Arrengement By Flower Robot,
Proc. of Third IFSA Congress pp

［３］田中民雄：
ファジィ論理を用いた苗の品質判別，
法政大学工学部卒業論文(1990)

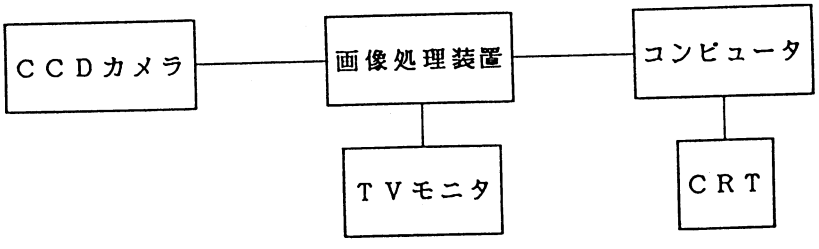


図1　システムの概略構成

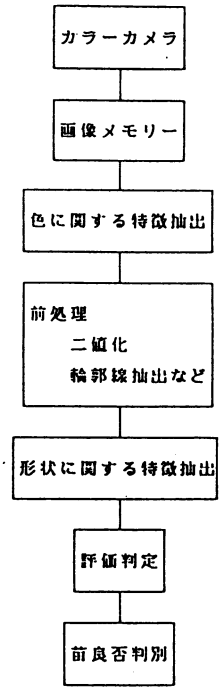


図2　システム処理の流れ

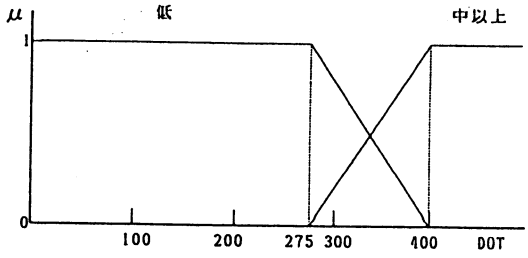


図3　背丈のファジイラベル

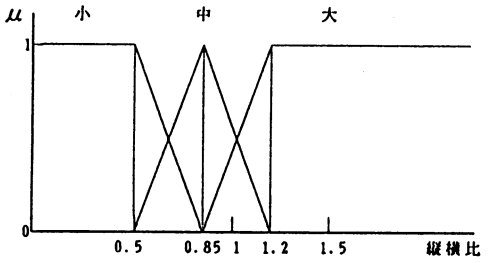


図4　縦横比のファジイラベル

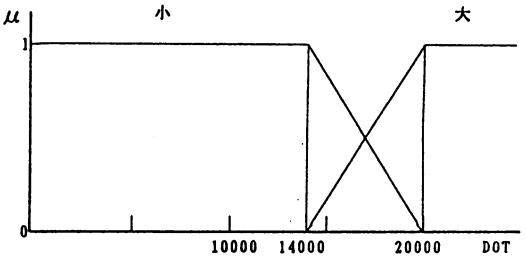


図5　上面の面積のファジイラベル

表1　良い苗の言語表現

専門家の知識	画像処理のための言語表現	画像処理
・充実してがっちりしている	・背丈がある ・縦横比が中くらいである ・面積がある	側面 側面 上面
・全体的に青々している	・葉が全体的に緑色である ・茎の幹部分が緑色である	上面 側面

表2　不良苗の言語表現

専門家の知識	画像処理のための言語表現	画像処理
・線が細く弱々しい （生長不良苗）	・背丈がない ・縦横比が大または小である ・面積がない	側面 側面 上面
・色が異常である （病気苗・生長不良苗）	・葉の緑色が全体的に薄い ・葉に褐色あるいは黒色の斑点がある ・茎の幹部分に白色の部分が多い	上面 上面 側面

表3　輝度値の範囲

	R		G		B	
	下限	上限	下限	上限	下限	上限
苗の緑	100	255	135	255	29	224
斑点	117	221	68	129	26	71
白い部分	190	255	208	255	144	210
バック	44	107	19	64	0	80

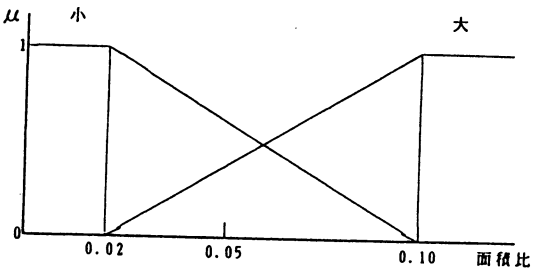


図6　茎の白い部分の面積比のファジイラベル

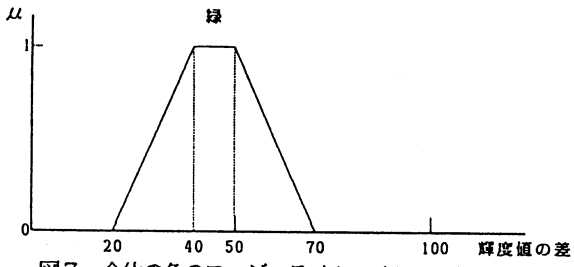


図7　全体の色のファジィラベル　（R－B）

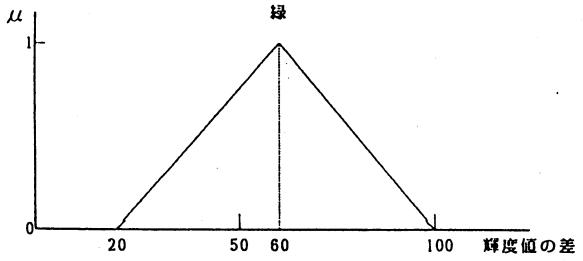


図8　全体の色のファジィラベル　（G－B）

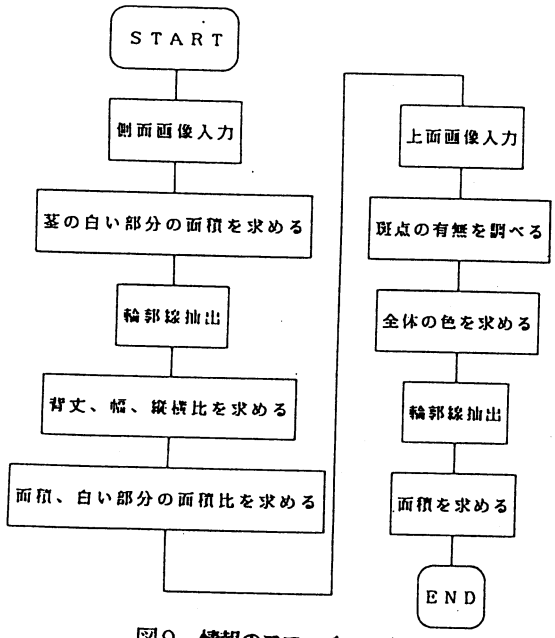


図9　情報のフローチャート

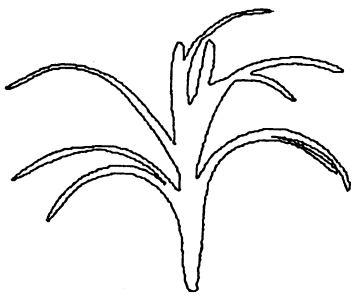


図10　輪郭線　（側面）

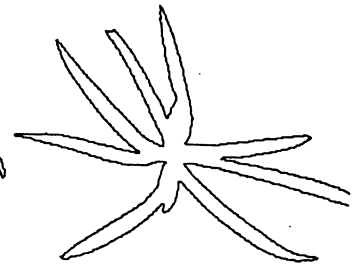


図11　輪郭線　（上面）

表4　各特徴項目の評価

試料No.	背丈	縦横比	面積	斑点	白い部分	全体の色
1	0.62	0.67	1	1	0.86	0.80
2	0.75	0.65	0.47	0	0.41	0.46
3	0.93	0.29	0.06	1	0	0
4	0.54	0.76	0.58	1	0.96	0.59
5	0.50	0.68	0.87	1	0.92	0.89
6	0.61	0.68	0.72	1	0.40	0.64
7	1	0.21	0.74	1	0.35	0.54
8	0.40	0.75	0.65	1	0.47	0.76
9	0.75	0.60	0.25	1	0	0.85
10	0.01	0.62	0.40	0	1	0.76
11	0.48	0.70	0.61	0	0.00	0.28
12	0.48	0.15	0	1	0.03	0
13	0	0.74	0	1	0	0

表5　総合評価

試料No.	実際の状態	MIN法	判別結果	重み付け法	判別結果
1	良苗	0.61	良苗	0.88	良苗
2	病気苗	0	不良苗	0.32	不良苗
3	生長不良苗	0	不良苗	0.42	不良苗
4	良苗	0.54	良苗	0.78	良苗
5	良苗	0.50	良苗	0.90	良苗
6	良苗	0.40	良苗	0.75	良苗
7	良苗	0.21	不良苗	0.71	良苗
8	良苗	0.40	良苗	0.78	良苗
9	良苗	0	不良苗	0.74	良苗
10	病気苗	0	不良苗	0.44	不良苗
11	病気苗	0	不良苗	0.22	不良苗
12	生長不良苗	0	不良苗	0.38	不良苗
13	生長不良苗	0	不良苗	0.39	不良苗

FC1-2

ファジィ行列階数の評価アルゴリズム

Algorithm for Evaluating Margin Rank of Fuzzy Matrix

荒木宏之* 影井清一郎* 大里有生**
Hiroyuki ARAKI Seiichirou KAGUEI Ario OHSATO
*横浜国立大学 工学部
Faculty of Engineering, Yokohama National University
**長岡技術科学大学 計画経営系
NagaokaUniversity of Technology, Dept. of Planning and Management Science

Abstract : The margine rank of $k \times k$ fuzzy matrix can be estimated from the root of the function whose value is given as the least determinant of 2^{k^2} matrices. In this report an algorithm is proposed for finding the root. This algorithm requires the calculation of 2^{k^2} determinants only for the verification of the root. Without this type of calculation, lower and upper bounds for the root are obtained from the minimal matrix and the interval arithmetic, respectively.

1 はじめに

前回の報告[1]で，ファジィ数を要素とする行列に「限界階数」と呼ばれる新しい階数を導入した．この新しい階数は，代表値の行列階数が保たれる範囲をメンバシップ値で示したものである．限界階数を用いることにより，線形写像の1対1対応，線形系の可制御性や可観測性などの度合いを扱うことができる．

今，k次の正方ファジィ行列$\tilde{\mathbf{A}}$を考える．$\tilde{\mathbf{A}}$の代表値の行列$\mathbf{A}$は正則とする．ここで，特異行列との等価性の度合いともいうべき次の関数$g(\tilde{\mathbf{A}})$を導入する．

$$g(\tilde{\mathbf{A}}) = \sup_{\det \mathbf{X}=0} \min\{f_{\tilde{a}_{11}}(x_{11}), f_{\tilde{a}_{12}}(x_{12}), \cdots, f_{\tilde{a}_{kk}}(x_{kk})\} \tag{1}$$

このとき，$\tilde{\mathbf{A}}$の限界階数$r(\tilde{\mathbf{A}})$は次式で定義される．

$$r(\tilde{\mathbf{A}}) = k - g(\tilde{\mathbf{A}}) \tag{2}$$

$g(\tilde{\mathbf{A}})$については次の性質がある．ただし，$\det \mathbf{A} > 0$とする．$0 < \phi < 1$なるϕに対し，$f_{\tilde{a}_{ij}}(x) = \phi$なる解を$\{x_{ij}^-, x_{ij}^+\}$とする．$(i,j)$要素を$x_{ij}^-$または$x_{ij}^+$とする行列を$\mathbf{X}$として，次式で定義される関数$F(\phi)$を考える．

$$F(\phi) = \min_{\mathbf{X}} \det \mathbf{X} \tag{3}$$

すると，$F(\phi) = 0$の根が$g(\tilde{\mathbf{A}})$となる[2]．

2 $g(\tilde{\mathbf{A}})$の評価のためのアルゴリズム

(3)式右辺の行列$\mathbf{X}$の個数は2^{k^2}である．従って，kが大きくなると，$F(\phi)$を求める計算量が膨大になる．そこで，最小の$\det \mathbf{X}$を持つ行列:最小行列$\mathbf{X}^{\mathbf{O}}$の代りに次の極小行列$\mathbf{X}^*$を用いる．ここで，X_{ij}^*は$\mathbf{X}^*$の余因子である．

$$X_{ij}^*(x_{ij}^* - a_{ij}) \leq 0 \quad for\, all\, i,j \tag{4}$$

論理上，極小行列$\mathbf{X}^*$は最小行列$\mathbf{X}^{\mathbf{O}}$と必ずしも一致はしない．しかし実際には，ほとんどの場合，$\mathbf{X}^* = \mathbf{X}^{\mathbf{O}}$となる．$\mathbf{X}^{\mathbf{O}}$に比べて$\mathbf{X}^*$は容易に求めることができるので，$F(\phi) = \det \mathbf{X}^{\mathbf{O}}$の代りに$F^*(\phi) = \det \mathbf{X}^*$を用いる．$F^*(\phi) = 0$の解はニュートン法により，効率よく求めることができる．実際，$(n-1)$番目の近似解からn番目の近似解を求めるには，

$$\phi_n = \phi_{n-1} - \frac{F^*(\phi_{n-1})}{\left[\frac{dF^*(\phi)}{d\phi}\right]_{\phi=\phi_{(n-1)}}} \tag{5}$$

ここで，

$$\frac{dF^*(\phi)}{d\phi} = \sum_{i,j} \frac{X_{ij}^*}{\left[\frac{df_{\tilde{a}_{ij}}(x)}{dx}\right]_{x=x_{ij}^*}} \tag{6}$$

なお，初期値ϕ_1は1に近い値を選べば良い．

極小行列とニュートン法を用いて$F(\phi)$の0点を求めるアルゴリズムを図1に示す．このアルゴリズムでは，$F^*(\phi) = F(\phi) = 0$を確かめるため，最後に少なくとも1回は$F(\phi)$を計算しなければならないので，2^{k^2}個の行列式の計算を完全に避けることができてはいない．

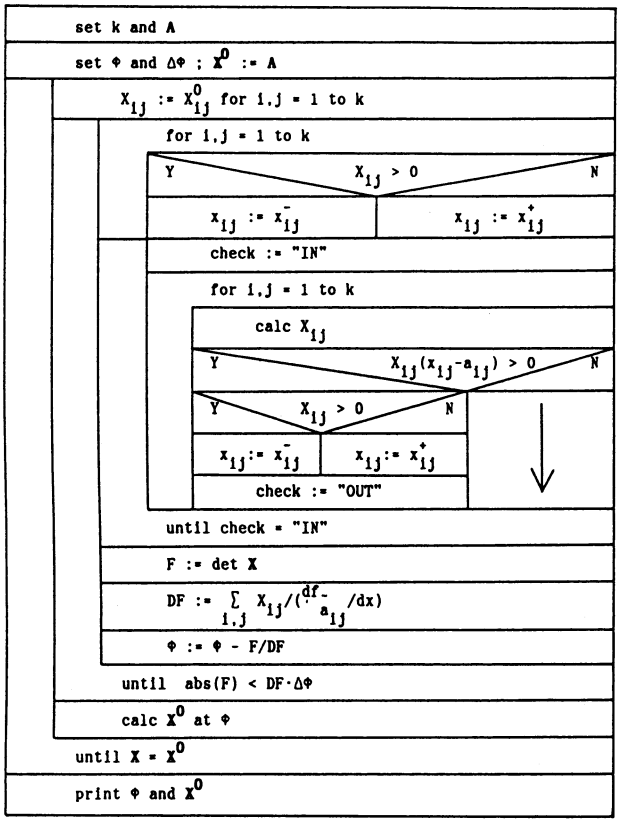


図 1:$F(\phi)=0$ の解を求めるアルゴリズム

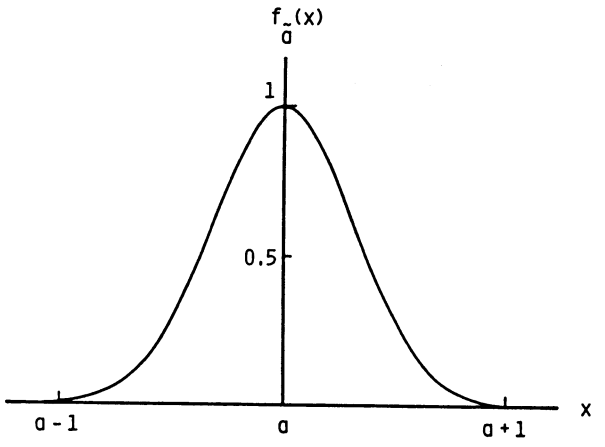


図 2:(8) 式で与えられるメンバシップ関数.

[例] 次の 5 行 5 列のファジィ行列を考える.

$$\tilde{\mathbf{A}}=\begin{bmatrix} \tilde{4} & \tilde{5} & \tilde{0} & \tilde{6} & -\tilde{2} \\ \tilde{2} & \tilde{0} & \tilde{1} & \tilde{0} & \tilde{3} \\ \tilde{2} & \tilde{2} & -\tilde{1} & -\tilde{2} & \tilde{1} \\ \tilde{1} & -\tilde{1} & \tilde{0} & \tilde{0} & -\tilde{4} \\ -\tilde{3} & \tilde{2} & -\tilde{4} & \tilde{1} & \tilde{0} \end{bmatrix} \tag{7}$$

ここで，メンバシップ関数は (図 2 参照)

$$f_{\tilde{a}}(x)=\exp\{-5(x-a)^2\} \tag{8}$$

図 3 に $F^*(\phi)$ のグラフが示されている．この場合，すべてのϕに対し $F^*(\phi)=F(\phi)$ が成立している．ニュートン法による $F^*(\phi)=0$ の近似解を表 1 に示す．$g(\tilde{\mathbf{A}})=0.78$ となるので$\tilde{\mathbf{A}}$の限界階数は 4.22 と求まる．

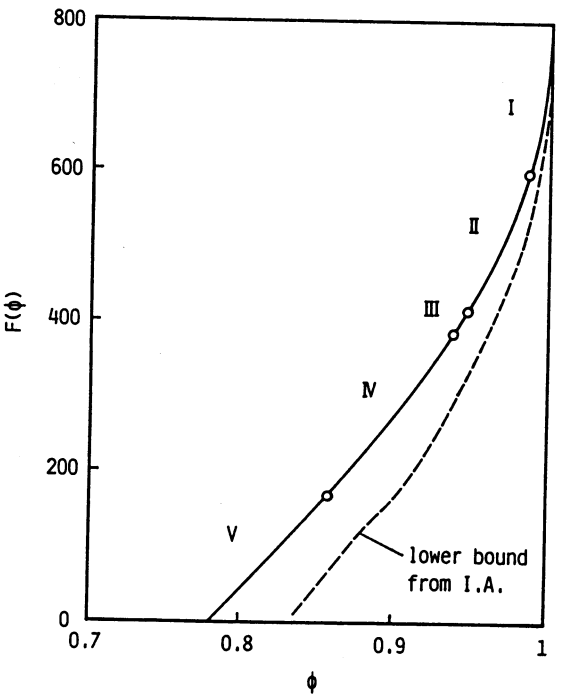


図 3:$F^*(\phi)$ vs ϕ (o印は $\mathbf{X}^*$の余因子が 0 になる点を示す．)

表 1: ニュートン法による $F^*(\phi)=0$ の近似解.
($\phi_1=0.99$ の場合)

n	ϕ_n	$F^*(\phi_n)$	$\left[\frac{dF^*}{d\phi}\right]_{\phi_n}$
1	0.99	621	8116
2	0.913	311	2823
3	0.803	50.7	2096
4	0.779	0.9	2025

3 区間解析による $F(\phi)$ の下限

図1のアルゴリズムでは最後に1回だけ $F(\phi)$ を計算する必要があった．(7) 式の例の場合，$F(\phi)=0$ を確かめるのに，$F^*(\phi)=0$ を解く計算時間の1万倍以上を要する．

$F(\phi)$ の下限を求める方法として区間解析がある．今，(i,j) 要素が区間 $[x_{ij}^-, x_{ij}^+]$ となる区間行列 $\mathbf{A}^I$ を考えよう．ガウスの消去法によって上三角行列 $\mathbf{T}^I$ に変換すると，

$$\det \mathbf{A}^I \subset \prod_{i=1}^{k} \mathbf{t}_{ii}^I \tag{9}$$

ここで $\mathbf{t}_{ii}^I$ は $\mathbf{T}^I$ の対角要素である．(9) 式はあらゆる対角化に対して成立するので

$$\det \mathbf{A}^I \subset \min \prod_{i=1}^{k} \mathbf{t}_{ii}^I \tag{10}$$

(10) 式の右辺を計算するためのアルゴリズムは図4に示されている．ここではバックトラックを用いて効率化を計っている．

(7) 式の行列について，区間解析 (図4) から求めた $F(\phi)$ の下限が図3に破線で示されている．これと極小行列とから，$0.78 \leq \phi \leq 0.83$ となり，従って，$\tilde{\mathbf{A}}$ の限界階数は 4.17 ～ 4.22 の間にあることが判る．なお，$F(\phi)$ の下限の計算に要した時間は $F(\phi)$ の約千分の1であった．

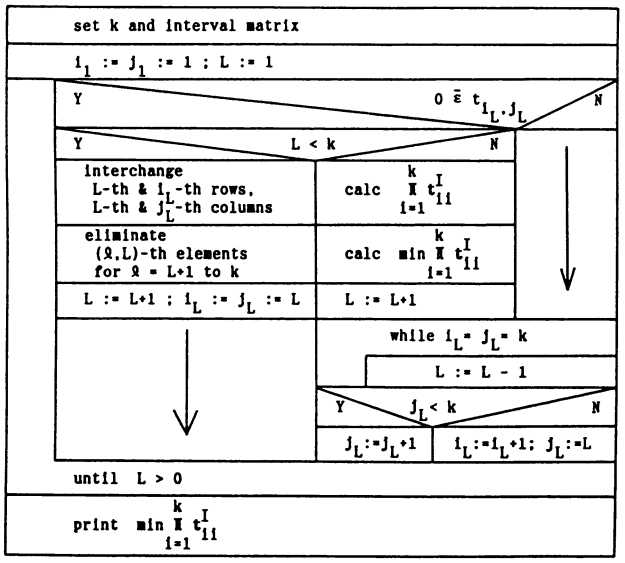


図4:区間行列の行列式を求めるアルゴリズム．

参考文献

[1] 影井・大里:ファジィ行列の階数とその評価，第5回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，p.265-270 (1989).

[2] S.Kaguei and A.Ohsato: Rank of Fuzzy Matrix and its Evaluation,Int.J.Fuzzy Set & System, to be published.

問い合わせ先

〒240 横浜市保土ケ谷区常盤台 156
横浜国立大学 工学部 電子情報工学科
影井清一郎
TEL:045-335-1451 内線 2924
FAX:045-334-3215

FC1-3

可能性回帰分析の応用と評価
― 日本の広告費の予測 ―

Application and Evaluation of Possibilistic Regression Models
- The Forcasting of Advertising Expenditure in Japan -

森本 正昭＊　　秋元 武＊＊　　和多田 淳三＊＊＊
Masaaki Morimoto, Takeshi Akimoto and Jyunzou Watada
＊㈱電通　　＊＊㈱プラスアイ・システム　　＊＊＊大阪工業大学
DENTSU INC.　　PRASAI System INC.　　OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Abstruct Social phenomena such as economical variation contain many kinds of "Fuzziness". This paper explaind the results of applying Possibilistic Regression Models to The Forcast of Advertising Expenditures in Japn. And also makes clear whether this Model is useful or not. There are two types,one is that the regression coefficient is fuzzy,another is that the input data is fuzzy itself.

1 まえがき

経済事象の変動には数多くのあいまい性が含まれている。そのため、計量的予測にはファジィ集合論にもとづいたファジィ関数を用いることが有効と考えられる。金融市場や株式市場では幾多の予想値が発表される。たとえば月末の為替レートは１５０～１５５円位になろうとか、株式市場では平均株価が３５０００円台にのせるだろうとか、変動の激しい事象ほど予想値を幅をもった値として予想している。～台というのも幅をもった値であり、そのほかにも１０％強とか、上向き下向きなども同様である。通常の回帰モデルのような１点の予測値が求められているのではないことがわかる。

一方、予測値はどのようにして決定されるのだろうか。予測のエキスパートは数多くのモデル式を作り、推定数値を算出してみる。その数値群の中から、どの値を最適と判断すればよいかは各種の環境条件を考慮した上でエキスパートの判断にまかせられる。それはきわめて高度な専門家判断による。そこには専門家がよいとする域値があり、その範囲にあればよいとされる。これは実験心理学でいう主観的等価域にあたると思う。予想値はその領域に入る値から選ばれる。さらに経営者の判断が介在することもしばしばで積極的な経営方針により、この専門家判断が上方修正されることがある。したがって予測の主観的等価域＋上方修正は、右辺の長い三角型メンバーシップ関数になっている。非専門家の幅広い予想域に対し、幅の狭いαレベル集合になっているとみることができる。

本稿では、日本の総広告費の予測作業を通して可能性回帰分析の利用の実際とその評価を試みる。

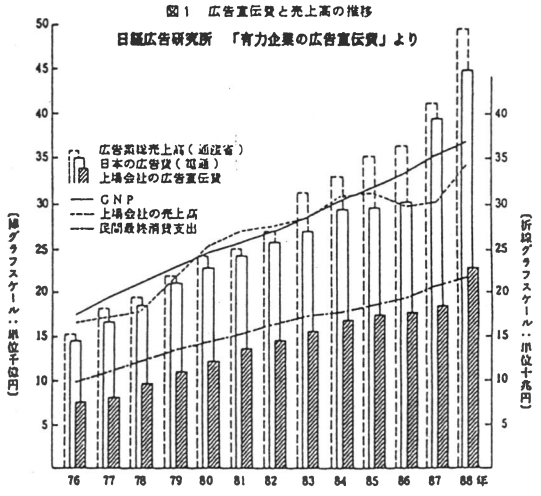
2 広告費データにおける”あいまいさ”

日本における広告費統計には３種類がある。通産省「特定サービス産業実態調査－広告業」、日経広告研究所の「上場会社（有力企業）の広告宣伝費」と電通の「日本の広告費」である。それぞれ調査対象が広告会社、広告主、広告の媒体社という違いがある。

最近の発表数字によると、通産省の数字では昭和６３年４兆９０６１億円（前年比１２０．８％）に対し、電通は４兆４１７５億円（同１１２．０％）、日経は有力企業のみであるが２兆１９１１億円（同１１３．２％）となっている。（図１参照）

これは調査対象、調査範囲が異なるためであり、個々の数字があいまいさを含んでいるわけではない。しかし、みる角度によってかなり違った数字を示していることは注意しなければならない。

図１ 広告宣伝費と売上高の推移



電通では広告費の推定範囲を表１のように定義している。これは時代の趨勢により次第に変化し得るものであり、８５年には次のような改訂を加えている。

1) マスコミ４媒体広告費に広告制作費を含めたこと
2) ＤＭ、屋外、その他に ＰＯＰ、電話帳、展示を加えＳＰ広告費としたこと
3) ニューメディア広告費を加え海外広告費を除外したこと

表１の中で、ＳＰ広告費はその内容の区分がむつかしく、推定にはあいまいさを含んでいるが、このＳＰ広告の構成比が年々高くなってきている。

表１ 日本の広告費推定範囲

日本の広告費	日本国内に投下された年間(１～12月)の広告費
マスコミ四媒体広告費	新聞、雑誌、ラジオ、テレビのマスコミ四媒体に投下された広告費
新聞	全国日刊紙、業界紙の広告料および新聞広告制作費
雑誌	全国月刊誌、週刊誌、専門誌の広告料および雑誌広告制作費
ラジオ	全国民間放送の電波料および制作費とラジオCM制作費
テレビ	全国民間放送の電波料および制作費とテレビCM制作費
ＳＰ広告費	次のセールスプロモーション関連媒体の広告費
ＤＭ	ダイレクト・メールに費やされた郵便料および発送作業費
折込	全国の新聞に折り込まれたチラシの折込料
屋外	広告板、ネオン等屋外広告の制作費
交通	交通広告の掲出料
ＰＯＰ	POP(店頭陳列物)の制作費
電話帳	電話帳広告の掲出料
展示・映像他	展示会、博覧会、PR館等の制作費、広告用映画・ビデオ等の制作費および上映費など
ニューメディア広告費	ニューメディア(CATV、ビデオテックス、文字放送など)の電波料および制作費

さらには、広告の公定料金は明確であるが、実勢料金は好不況によって異なるので推定がむつかしい。

これらの問題が主な「あいまいさ」の要素となっている。しかし、一般にマクロデータは安定した数値を示し、その内訳の定義が明確であり、推計方法が毎年同じであれば、時系列データとしての不都合はないと考えてよい。

なお、本稿では電通発表の数字を使用している。可能性回帰分析の応用事例として、日本の総広告費の分析をテーマとしているが、電通が実際に行なっている分析作業は媒体担当者、営業担当者からのヒアリング調査と合わせて、媒体別業種別に詳細な分析を行なっている。本稿は手法の評価という観点であるので、細かな分析結果はここには表示していない。

3　広告費モデルとその要因

図1にみられるように、総広告費の規模は日本の経済成長に依存しながら上昇を続けている。国民総生産との対比でみると1%前後の位置を何年も持続している。特筆すべきは88、89年において対GNP比1．20%、1．30%と急上昇を示し、日本の経済成長率を上回る勢いである。これは企業の広告投資行動が変化をきたしていることを暗示しているが、それは後述することにして以下に説明要因を列挙する。

要因1は時間的要因である。総広告費はほぼ一本調子で上昇している。いくつかの節目で質的な転換を遂げており、それによってパイの拡大を続けているので、先ずこの要因の存在を仮定する。

要因2は民間消費との関係である。マスコミ媒体を使った広告は一般大衆の消費を促進する働きをねらって企業が行なう活動であり、生産財よりも消費財が中心であることからこの要因の存在が大きい。データとしては民間最終消費支出（名目）をとりあげることにする。

要因3は企業の広告費支出が景気の動向に密接な関係を持っている点である。好況時には設備投資と同じように広告投資を行ない、不況時には広告費を節減するというようなことがある。景気の先行指標になっているという見方もある。

要因4　その他の要因としては、広告の媒体の種類や数、広告料金の改訂などを考えねばならない。

また、個々の企業の広告費予算の決定がどのようになされているかに注目しなくてはならない。昔からの方式としては、売上高比率で決めたり、前年度比率で決めたりしている。しかし、その後は多くの企業が目的に応じて支出を決めるというタスクメソッドが主流になっているといわれている。しかし、売上高に対する広告費比率は業種別にみて毎年あまり変化していない。高比率なのは、医薬品、食品、小売業などで、売上げの伸びが広告費をのばし、広告費が伸びると売上げも上がるという関係があることがわかる。

要因間の相関を取ると表2のようになる。民間消費と年とは高い相関0．999を示しており、同一指標といってもよいくらいである。試みに両者をモデルの中にいれると、多重共線性と思われる結果になるので、年の要因は除外する。また要因4はその影響を明示し得ないので除外した。残ったのは要因2と3である。要因3は全産業経常利益でも設備投資額を使ってもよいが、広告費との相関分析結果から全産業経常利益をとることにした。このような説明要因選定の条件は説明力があることが第1であるが、その他の条件としては、外生変数の将来値が公表されているデータでないと予測モデルとしては採用できない。ここでは日本経済研究センターの発表している「4半期経済予測」を借用している。

表2　変数間相関表

	Y	T	X2
X1	0.979	0.999	0.864
X2	0.924	0.867	
T	0.978		

Y　総広告費
X1　名目民間最終消費支出
X2　全産業経常利益
T　時間（年）

4　予測モデル

4－1　可能性回帰モデル　　係数がファジィ数の場合

目的変数Yに総広告費、説明変数として　X1＝民間最終消費支出、X2＝全産業経常利益をとることにする。

通常の回帰モデルでは実測値とモデルによる推定値との差　$Y-\Sigma a_i X_i = \varepsilon$　は観測誤差とみなし、誤差εには独立、等分散、正規性を仮定している。一方、可能性回帰分析では、その差はシステム記述の不正確性にもとずいているとし、システム自体が揺らいでいるとみている。回帰式の係数にその不確実性を表現させようとする。

『ファジィ回帰モデル』

$$Yi = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + \cdots$$

ここで　Aiは三角型のファジィ数（α_i C_i）である。

『解法』

次のLP問題を解きファジィ係数（α_i C_i）を求める。

$$min \quad S=\Sigma C^t |X_i|$$

$$(1-h)\Sigma C_j |X_{ij}| + X_i^t \alpha \geqq y_i$$

$$(1-h)\Sigma C_j |X_{ij}| - X_i^t \alpha \geqq -y_i$$

$$C_j \geqq 0$$

h：ファジィ集合yiが観測値yiを少なくともh以上の度合で含んでいることを示す基準

『結果』

データとして80～89年のデータ（表3）を与えた結果は図2のとおりである。h=0.5 を与えている。図2は幅を持った推定値を与え、その中に実測値が位置づけられている。通常の回帰分析の結果と比べると次のようである。

可能性回帰　$Y=(-1677.9,0)+(0.0163,0)X_1$
$+(0.3623,\ 0.1149)X_2$

通常の回帰　$Y=-248.3+0.0142X_1+0.4577X_2$
$R^2=0.977$　AIC=175.2

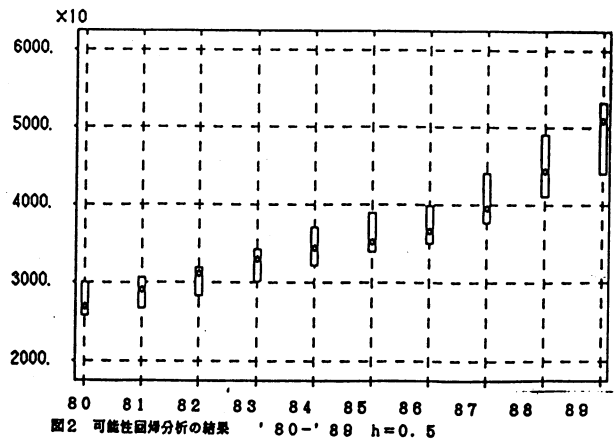


図2　可能性回帰分析の結果　'80-'89　h=0.5

表3　総広告費とその要因　　X1　単位　10億円
X2　単位　10億円
Y　単位　億円

	X1	X2	Y
80	141324.2	17986	26830
81	149384.7	16506	29049
82	159606.1	15780	30949
83	167809.3	17728	32827
84	175984.4	20907	34336
85	184764.1	21731	35049
86	191495.7	21381	36478
87	199291.4	27289	39448
88	209367.8	34284	44175
89	220282.6	39320	50715

予測値はX1、X2に将来値を入れれば算出できる。その値が適合しているかどうかをみるため、８９年の広告費を８０－８８年のデータから推定することを試みる。

表4　可能性回帰分析による予測

	実測値	ファジィ		回帰	回帰式は
80	26830	26103	29011	27748	R2 =0.983
81	29049	27334	30003	28667	AIC=150.5
82	30949	29035	31587	30150	
83	32827	30711	33577	32042	
84	34336	32532	35913	34270	
85	35049	34170	37685	35946	
86	36478	35307	38764	36959	
87	39448	37396	41808	39880	
88	44175	40017	45561	43479	
89	50715	42545	48903	46673	

可能性回帰　$Y=(-854.0,0)+(0.0175,0)X_1+(0.2032,\ 0.0809)X_2$

この式に８９年のX1、X2を入れると Y(89)=42545～48904 となり、h=0.5 では実測値が推定の範囲外に出てしまう。同様に８６、８７年までのデータを使って以後の予測値を計算してみても範囲外となる。

原因はこの時期に広告投資が増加した、というより円高不況を経て内需主導による好景気がもたらされ、企業を取り巻く環境が変化し、企業は企業自体の情報提供に力を注ぐようになった。ＣＩ活動や人材確保のための企業イメージ形成、文化活動などにみられる非商品広告が増加した。

可能性回帰といっても、過去の時系列データに依存する限りでは予測は難しい。対応策としては①入力するデータの範囲を絞る　②広告環境の変化を指数化した変数を式に導入するなどを試行した。データの範囲を８５～８９年にした結果を表５に示す。

表5　'８５－'８９データによる回帰分析

	実測値	ファジィ		回帰	回帰式は
85	35049	33293	35634	34482	R2=0.982
86	36478	35078	37382	36235	AIC=88.5
87	39448	38713	41654	40221	
88	44175	43251	46946	45174	
89	50715	47537	51774	49753	

データ数を減らすと可能性回帰分析のＣの値が大幅に縮まる。統計的回帰分析の場合には、データ数が多いほど推定区間が縮まるのとは対照的である。

４－２　データがファジィ数である場合

可能性回帰分析はデータがファジィ数である場合にも応用できる。経営者の景気見通しのような感覚的なデータが広告出稿に影響を持つと考えられる。一つの試みとして、ＤＩ（日銀の企業短期経済観測調査　主要企業の業況判断）を要因としてとりあげる。ＤＩと広告費との関係は約半年のタイムラグがあるので６カ月ずらした指標を使用する。前出のＹとＸ１はノンファジィであるが４半期データをもとに季節調整後データの４期中の最大と最小をとることにした。ただし、Ｙには総広告費ではなく４媒体広告費を使用した。

データがファジィ数である場合の計算方式については和多田がヒューリスティック・アルゴリズムを提案している。

『解法』

$$\min \quad S=\Sigma\,[\bar{a}_i(r)-\underline{a}_i(r)] \qquad r:\text{反復回数}$$
$$\bar{y}\geqq\Sigma\,\underline{a}_i(r)\bar{C}_i$$
$$\underline{y}\leqq\Sigma\,\bar{a}_i(r)\underline{C}_i$$
$$\bar{a}_i(r)\geqq\underline{a}_i(r)$$

$\bar{C}_i$、$\underline{C}_i$には$\bar{X}_i$、$\underline{X}_i$を与える。ただし、１回目は$(\bar{X}_i+\underline{X}_i)/2$を与えＬＰ計算を行う。$\bar{a}_i(r+1)$、$\underline{a}_i(r+1)$の符号が$\bar{a}_i(r)$、$\underline{a}_i(r)$の符号と一致するまで反復計算を実行する。

モデルとしてはｍｉｎ問題、ｃonjunction問題、ｍａｘ問題があるが、ここではｍｉｎ問題、ｃonjunction問題の例を示す。与えられたデータ（表６）に対して解は次の通りであった。

表6　データがファジィの場合

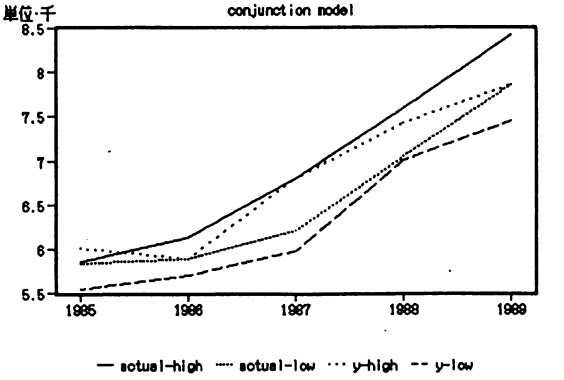
	民間消費		ＤＩ		広告費	
	high	low	high	low	high	low
85	188264	181593	9	- 8	5849	5831
86	193348	189236	-10	-14	6129	5886
87	202172	195302	33	- 8	6807	6211
88	212720	206033	53	39	7594	7045
89	226470	215751	53	48	8426	7857

ｍｉｎ　$Y=-5523.8+(0.06051,\ 0.06025)X_1+(4.65,\ 3.99)DI_{-6}$

ｃonjunction　$Y=0.0+(0.03121,\ 0.03121)X_1+(14.88,\ 14.88)DI_{-6}$

図３はｃonjunctionの場合の結果を図示したものである。このモデルでは推定値の値がメンバーシップ関数のどこかに接触すればよいという方式であるから、ファジィ数データ群に傾向線を引くといった場合に使用できる。ここではＤＩの影響は大きくは出ていない。ＤＩは指数化されているので和のモデルでなく積のモデルにするなど考えられるが、ここでは例示にとどめる。企業の広告投資が質的変貌を遂げている状況を環境変数として導入できるものがあれば使用したい。

(図3) 四媒体広告費
conjunction model



4－3　実験的回帰分析の応用

回帰モデルの計算結果を評価する際、エキスパートはまず式の適合度を判断する。さらに個々の係数a_iについても判断が必要になる。a_iはどれ位の値の範囲に入っていればよいかということである。事前に現実感覚にあった係数範囲を設定し、その範囲で最適なよい式を見いだすことが考えられる。4－1、4－2のようにLP解を求める方法では、LPの制限式の中にそれを入れてやればよい。

一方、LP解を求める方法を実際にやってみると、ファジィ性を示す係数の幅Cが全ての変数に対しては得られずC＝0となることが多い。4－1の例ではX2のみCの値が得られ、他の変数はC＝0となっている。これで問題がない場合もあるが、係数がファジィとみなしたときはC≠0であることが望ましい。

実験計画法にもとずいて計算する方法ではこの問題がクリアされる。

手順1　係数の範囲を3水準で与える。$\bar{a}_i$、$\mathring{a}_i$、$\underline{a}_i$これには可能性のある値を充分に包含するような上中下の等間隔の値を与える。反復計算の途上でこの水準値が移動するのでファジィ水準と呼ぶことにする。

手順2　直交表にもとづく計算　$Y_m-\hat{Y}_m$をすべてのデータmについて計算する。全体での差が充分小さければそのときのファジィ水準が求める値の範囲と考えてよい。しかし、変数の数nが多いとデータ毎に3"通りの計算をしなくてはならないので直交表（L_9、L_{36}など）を使用する。

手順3　検定　水準毎に変動Sを計算する。

手順4　ファジィ水準を求める。水準値を操作するいくつかのルールを決めておく。$\mathring{a}_i$の変動が小さく$\bar{a}_i$、$\underline{a}_i$が大きければ$\mathring{a}_i$の近くに解が存在するので$\bar{a}_i$、$\underline{a}_i$の幅を縮めて新しい水準を作る。これはα－カットに該当する操作である。各水準のSの値が同程度であれば主観的等価域にあると判断する。

手順5　手順2－手順4を収束するまで反復する。

シミュレーション　表7　実験的回帰によるシミュレーション

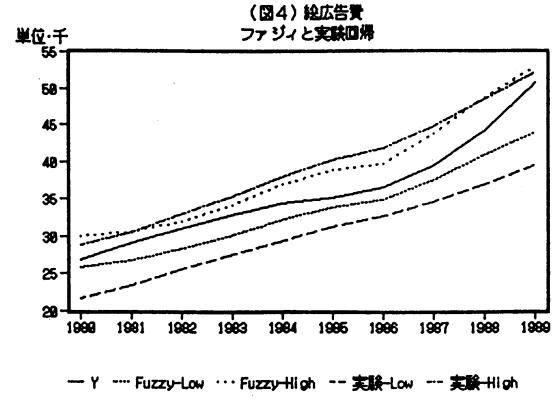
回数	X1			X2		
	low	middle	high	low	middle	high
0	0	0.05	0.1	0	0.35	0.7
1	0	0.025	0.05	0	0.175	0.35
2	0.0125	0.025	0.0375	0.088	0.175	0.263
3	0.0188	0.025	0.0313	0.088	0.131	0.175
4	0.0219	0.025	0.0281	0.088	0.131	0.175
5	0.0219	0.0234	0.0250	0.088	0.131	0.175
6	0.0219	0.0234	0.0250	0.131	0.153	0.175

総広告費の問題に対し、表7の回数0のような係数の範囲を与えた。収束するまで5回の計算の結果、次式を得た。

$$Y=-450.0+\begin{pmatrix}0.02500\\0.02344\\0.02188\end{pmatrix}X_1+\begin{pmatrix}0.175\\0.153\\0.131\end{pmatrix}X_2$$

文献3では回帰式の係数として中心点aだけをとっているが、上記のように幅を持った係数とみた方が可能性回帰の考え方に適合する。

4－1の可能性回帰の結果と実験的回帰の結果を比較してみると図4のようになり、この例では実験的回帰の方がやや広い幅を示している。



5　まとめ

以上いくつかの分析法を通して可能性回帰分析を使ってきた。本稿に記載されていないが、4半期データ、媒体別、業種別データによる分析も行っている。その結果の評価としては次のようなことがいえる。

1．　統計的回帰のように一点推定ではなく、幅のある予測ができる。その結果、一点推定の予測数字が"あたる""あたらない"という無意味な議論から解放される。もとより予測数字は企業活動に方向性を与えるものであって、"あてる"ことが目的ではないからである。

2．　よりあいまい性を残しているテーマ、主観的評価をパラメータとして導入しなくてはならないような問題に使うべきである。日本の広告費というようなマクロな分析ではあまり効果があるとはいえないが、業種別に分割したデータでみると、その業種特有の経済環境、広告環境がそれぞれあり、その場合にファジィ・パラメータを導入することにメリットがありそうである。

3．　4－3の例のように、変数のパラメータにエキスパートの予想範囲をとる。最初は一段と広くとって、それをシミュレーションによって短縮していく方法は利用しやすいと思う。

4．　統計的回帰分析には長い歴史があり、多数の計算アイテムを出力できる。たとえば、決定係数、AIC、D.W比などの適合性の尺度がいろいろと用意されている。

可能性回帰分析の場合は唯一、あいまい性に関係する指標をいかに小さくとるかという結果の比較でしかなく、今後の研究課題である。ソフトウェアも充実しなければならない。

終わりに、本稿の計算処理は電通とプラスアイシステムが開発した「ファジィ多変量解析法パッケージ」を使用している。

参考文献

(1)田中英夫、上嶋　暁、浅井喜代治：ファジィ関数による線形回帰モデル：Journal of Operations Research Society of Japan,Vol.25,No.2,PP.162-173(昭57)
(2)田中英夫、和多田淳三、林　勲：ファジィ線形回帰分析の三つの定式化：計測自動制御学会論文集,Vol.22,No.10,PP45-51(昭61)
(3)田口玄一、横山巽子：ビシネスデータの分析：丸善(S昭50)

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FC2-1

ファジイグラフの核と連結度との関係について

On the relation between the kernel and the connective degree of a fuzzy graph

森岡正臣

Masaomi MORIOKA
宮城教育大学教育学部数学教室

Department of Mathematics,Miyagi University of Education

Abstract:We can extend the definitions of the divergent and the convergent kernel in a digraph to the situation in a fuzzy graph.By this extension,the connective degrees of the fuzzy graph can be represented by the kernels ,moreover,we can extract all spanning walks whose connective degrees are equal to that of the fuzzy graph.

1．はじめに

有向グラフについては，次の結果がよく知られている。

Theorem 1. ([1])

有向グラフDが片連結 ⟷ Dは少なくとも一つの spanning walk をもつ

ここで，Dが片連結であるとは，Dの任意の２点間に少なくとも一方向からのwalk（歩道）が存在すること（このとき，点から点へ可到達であるという）であり，spanning walk（略してsp.walkとかく）とは，Dのすべての点を通るwalkのことである。

この定理はDが片連結であるための必要十分条件を与えたものであるが，Dが具体的に与えられた場合，どこに，どのようなsp.walkが存在しているのかまでは教えてくれない。そこで，そこまで教えてくれるような構成的な必要十分条件を考える必要が起きてくる。

この問題は，有向グラフ（１－０グラフ）に限らず，ファジイグラフ上にまで展開できると考えられる。すなわち，与えられたファジイグラフの中から，ファジイグラフの連結度に等しいsp.walkをすべて求めるという問題である。

本稿では，上記の定理をファジイグラフ上に拡張し，さらには，ファジイグラフの核という概念を導入することによって，この問題が解決できることを報告する。

2．ファジイグラフの連結度

有向グラフの片連結性は，次のようにファジイグラフ上へ拡張，定義されている。([2])

Definition 1.

ファジイグラフFのD_2に関する連結度を

$$m_{D_2}(F) = \min_{i\,j}\left(\hat{f}_{ij}, \hat{f}_{ji}\right) \quad \cdots(1)$$

で定義する。ここで，ファジイグラフFは

$F=[f_{ij}]$ ($1\leqq i,j\leqq n$)

$\hat{F}=[\hat{f}_{ij}]=F^{n-1}$ (max-min transitive closure)

である。

Fの点の集合を$V=\{v_{i_1},v_{i_2},\cdots,v_{i_n}\}$とする。$v_{i_k}$から$v_{i_{k+1}}$へのwalkはいくつも存在するわけだが，そのうちで，到達可能な度合が$\hat{f}_{i_k i_{k+1}}$となるwalkのことを$v_{i_k}\to v_{i_{k+1}}$とかくことにする。（一般に，$v_{i_k}\to v_{i_{k+1}}$の長さは１とは限らない。）

$v_{i_1},v_{i_2},\cdots,v_{i_n}$に対して，$f_{i_1i_2}\wedge f_{i_2i_3}\wedge\cdots\wedge f_{i_{n-1}i_n}$はsp.walk $v_{i_1}\to v_{i_2}\to\cdots\to v_{i_n}$の到達可能な度合を表している。（一般に，このsp.walkのながさはn-1以上である。）

次の定理はTheorem 1.をファジイグラフ上に拡張したものである。

Theorem 2.

$$m_{D_2}(F) = \bigvee_{i_1 i_2 \cdots i_n} (\hat{f}_{i_1 i_2} \wedge \hat{f}_{i_2 i_3} \wedge \cdots \wedge \hat{f}_{i_{n-1} i_n}) \quad \cdots(2)$$

この定理は直観的には当然と思われる結果であり，これによりFの中で$m_{D_2}(F)$なる到達可能な度合をもつすべてのsp.walkを求めることができる。しかし，このためには${}_nP_n$通りのsp.walkを対象として(2)の右辺を計算する必要があり，少々めんどうになる。

次節では，(2)の右辺をファジイグラフの発散核あるいは集中核という概念で表現し直すことができて，これによれば計算もかなりらくになることについて説明する。

3．ファジイグラフの核と連結度

有向グラフDの点 v が発散核（divergent kernel）であるとは，v から他のすべての点へ到達可能であることであり，逆に，他のすべての点から v へ到達可能であるとき v を集中核（convergent kernel）であるという。この定義をファジイグラフ上に拡張定義する。

Definition 1.

$V = \{v_1, v_2, \cdots, v_n\}$ をファジイグラフ$F = [f_{ij}]$の点の集合とする。

点$v_i \in V$が発散核になっている度合を，

$$D(v_i) = \bigwedge_{1 \le j \le n} \hat{f}_{ij} \quad \cdots(3)$$

で定義する。

集中核についても同様な定義ができるが省略する。ところで，この定義の形式的な拡張として次の定義も用意しておく。

Definition 2.

点$v_{i_k} \in V$が制限付きの発散核になっている度合を，

$$D_{i_1 i_2 \cdots i_{k-1}}(v_{i_k}) = \bigwedge_{1 \le i_1, i_2, \cdots, i_{k-1}} \hat{f}_{i_1} \quad \cdots(4)$$

で定義する。

これらの定義を用いて，(2)の右辺を書き直すことができる。

Theorem 3.

$$m_{D_2}(F) = \bigvee_{i_1 i_2 \cdots i_{n-1}} \{ D(v_{i_1}) \wedge D_{i_1}(v_{i_2}) \wedge \cdots \cdots \wedge D_{i_1 i_2 \cdots i_{n-2}}(v_{i_{n-1}}) \} \quad \cdots(5)$$

証明のポイントは，max-min transitivity を用いて

$$\hat{f}_{i_1 i_2} \wedge \hat{f}_{i_2 i_3} \wedge \cdots \wedge \hat{f}_{i_{n-1} i_n} = D(v_{i_1}) \wedge D_{i_1}(v_{i_2}) \wedge \cdots \cdots \wedge D_{i_1 i_2 \cdots i_{n-2}}(v_{i_{n-1}})$$

を導くところである。

(5)により，ファジイグラフFにおいて$m_{D_2}(F)$なる到達可能な度合をもつすべてのsp.walkを比較的簡単に求めることができるようになる。以下，このことについて説明する。

Fに対して，$m_{D_2}(F)$なる到達可能な度合をもつsp.walk

$$v_1 \to v_2 \to \cdots \to v_k \to v_{k+1} \to \cdots \to v_n$$

を考える。（このsp.walkはTheorem 3.あるいはThorem 2.により求まる。）各subwalk $v_k \to v_{k+1}$の長さは1以上である。なぜならば，v_kとv_{k+1}の間には いくつかの点が介在してv_kからv_{k+1}への到達可能な度合$\hat{f}_{kk+1}$（$\ge m_{D_2}(F)$）が得られていることもありうるからである。従って，上のsp.walkにはこの介在している点が表示されていないから，$m_{D_2}(F)$なる到達可能な度合をもつsp.walkを正確に表現しているとはいえない。正確に表現するためには，各subwalk $v_k \to v_{k+1}$において介在している点をすべて求める必要がある。

$f_{kk+1} \ge m_{D_2}(F)$ ならば $\hat{f}_{kk+1} \ge m_{D_2}(F)$ であり，上のsp.walkにおいて subwalk $v_k \to v_{k+1}$の長さは1，すなわちv_kとv_{k+1}の間には介在している点がない。従って，$f_{kk+1} < m_{D_2}(F)$ の場合について考察すれば良い。

$$\exists m \in N \ \text{ s.t. } f^{m-1}_{kk+1} < m_{D_2}(F) \text{ かつ } f^{m}_{kk+1} \ge m_{D_2}(F) \quad (2 \le m \le n-1)$$

なるmを求める。（ただし，Nは自然数の集合であり，このよ

うなmの存在は明かである。)

このmにより，subwalk $v_k \to v_{k+1}$の長さはm，すなわちv_kとv_{k+1}の間には介在している点はm-1個あることがわかる。それらを$x_1, x_2, \cdots, x_{m-1}$とおくと，subwalk $v_k \to v_{k+1}$は

$$v_k, x_1, x_2, \cdots, x_{m-1}, v_{k+1}$$

の順に隣接しているから，$x_1, x_2, \cdots, x_{m-1}$が具体的にどの点になっているかを調べれば良い。

x_{m-1}はv_{k+1}に隣接しているから，$\overset{m-1}{F}$のk行とFの(k+1)列のmax-min composition ・

$$\begin{bmatrix} f_{k1}^{(m-1)} & f_{k2}^{(m-1)} & \cdots & f_{kn}^{(m-1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{1k+1} \\ f_{2k+1} \\ \vdots \\ f_{nk+1} \end{bmatrix}$$

において，

$$f_{k1}^{(m-1)} \wedge f_{1k+1} \geqq m_{D_2}(F) \quad (1 \leqq l \leqq n) \quad \cdots(6)$$

をみたす点が少なくとも一つ存在する。簡単のため(6)をみたす点がちょうど一つ存在するとし，それがv_1であったとすれば，$x_{m-1} = v_1$ということになる。

次に，x_{m-2}はこのv_1に隣接しているわけだから，$\overset{m-2}{F}$のk行とFのl列の・

$$\begin{bmatrix} f_{k1}^{(m-2)} & f_{k2}^{(m-2)} & \cdots & f_{kn}^{(m-2)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ \vdots \\ f_{n1} \end{bmatrix}$$

において，

$$f_{kp}^{(m-2)} \wedge f_{p1} \geqq m_{D_2}(F) \quad (1 \leqq p \leqq n) \quad \cdots(7)$$

をみたす点が少なくとも一つ存在する。(7)をみたす点がちょうど一つあり，それがv_pであったとすると，$x_{m-2} = v_p$ということになる。以下，同様にして$x_{m-3}, \cdots, x_1$の順に求めることができる。

4．具体的な計算例

次のファジイグラフを考える。

$$F = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.9 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.9 & 0.8 \\ 0.7 & 0.8 & 1.0 & 0.6 \\ 0.5 & 0.0 & 0.6 & 1.0 \end{bmatrix}$$

F^2, F^3の計算結果は次の通りである。

$$F^2 = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.9 & 0.9 & 0.8 \\ 0.7 & 1.0 & 0.9 & 0.8 \\ 0.7 & 0.8 & 1.0 & 0.8 \\ 0.6 & 0.6 & 0.6 & 1.0 \end{bmatrix}$$

$$F^3 = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.9 & 0.9 & 0.8 \\ 0.7 & 1.0 & 0.9 & 0.8 \\ 0.7 & 0.8 & 1.0 & 0.8 \\ 0.6 & 0.6 & 0.6 & 1.0 \end{bmatrix}$$

$D(v_1) = 0.8$, $D(v_2) = D(v_3) = 0.7$, $D(v_4) = 0.6$である。$D(v_{i_1}) \wedge D_{i_1}(v_{i_2}) \wedge D_{i_1 i_2}(v_{i_3}) \leqq D(v_{i_1})$であるから$D(v_{i_1}) \wedge D_{i_1}(v_{i_2}) \wedge D_{i_1 i_2}(v_{i_3}) = 0.8$となるような点の配列が存在する可能性がある。もし存在すればTheorem3.により$m_{D_2}(F) = 0.8$である。実際，

$$D_1(v_2) = D_{12}(v_3) = 0.8$$

$$D_1(v_3) = D_{13}(v_2) = 0.8$$

であるから，

$$D(v_1) \wedge D_1(v_2) \wedge D_{12}(v_3) = 0.8$$

$$D(v_1) \wedge D_1(v_3) \wedge D_{13}(v_2) = 0.8$$

となり，sp.walk

$v_1 \to v_2 \to v_3 \to v_4$ と $v_1 \to v_3 \to v_2 \to v_4$が存在していることがわかる。(この段階で$m_{D_2}(F) = 0.8$がわかった。)

ところで，$f_{34}=0.6, f_{34}=0.8= m_{D_2}(F)$ であるから，v_3とv_4の間にある点が一つ介在していることがわかる。それは，Fの3行とFの4列のmax-min composition ・

$$[\ 0.7\ \underline{0.8}\ 1.0\ 0.6\ ]\cdot\begin{bmatrix}0.0\\ \underline{0.8}\\ 0.6\\ 1.0\end{bmatrix}$$

により，$f_{32}\wedge f_{24}=0.8 = m_{D_2}(F)$ であることから，v_2であるとわかる。すなわち，ファジイグラフFは$m_{D_2}(F)=0.8$の度合のsp.walk $v_1\rightarrow v_2\rightarrow v_3\rightarrow v_4$を持っているが，その隣接状況は$v_1, v_2, v_3, v_2, v_4$である。

sp.walk $v_1\rightarrow v_3\rightarrow v_2\rightarrow v_4$ に対しても同様の議論を行うと，その隣接状況は同じくv_1, v_2, v_3, v_2, v_4であることがわかる。

このようにして，与えられたファジイグラフFは$m_{D_2}(F)=0.8$の度合のsp.walkを一つ持ち，その隣接状況はv_1, v_2, v_3, v_2, v_4であることがわかった。

５．おわりに

有向グラフの核の概念をファジイグラフ上に拡張することにより，従来定義されていたファジイグラフの連結度は，そのファジイグラフの核を使って表現できること，およびこの結果を用いることにより，ファジイグラフの連結度に対応するすべてのwalkをファジイグラフから抽出できることについて報告した。

グラフ理論自体応用範囲が広いものであるから，ファジイグラフ理論の応用も多岐にわたると考えられる。現在，本報告で得られた結果を教育評価に用いられるいろいろな分析法に応用することを考えている。

参考文献

[1]M.Behzad ,G.Chartrand and L.Lesniak-Foster：GRAPHS AND DIGRAPHS;Prindle,Weber and Schmidt,1979.

[2]西田，竹田:ファジイ集合とその応用;森北出版，1978.

問い合わせ先：〒９８０　仙台市青葉区荒巻字青葉
宮城教育大学数学教室
Tel 022-222-1021　ext407
Fax 022-211-5594

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FC2-2

ファジィグラフ応用した教材分析法

Instruction and Cognition Analysis Method Applying Fuzzy Theory

勝又保雄　津田栄　山下元
Yasuo Katsumata　Ei Tsuda　Hajime Yamashita
目黒高校　国学院高校　早稲田大学
Meguro Sr.H.S.　Kokugakuin Sr.H.S.　Waseda University

Abstract : The inexact phenomena such as the human behavoir, the mental process and the cognition would be analysed by using the fuzzy theory which is updatingly applied to the natural science, social science and so on.

Generally, such fuzzy information is represented as a fuzzy graph. If we analyse it from the similarity and the connectivity points of view, we could clarify the main feature of the information and make our reasonable decision.

We would propose an analysis method of the instruction & the cognition structure of a subject matter by applying the fuzzy clustering and the ordering.

In this paper, the authers would not only explain the analysis method, but also present the practical effectiveness of it through the case study in mathematics.

1．はじめに

ファジィ理論は，人間の行動，認識などに関する確定しにくい情報（ファジィ情報）を解析し，意志決定をおこなう理論で，制御，経営などに加えて，近時，教育，心理などの分野でも広く応用されている．

一般に，ファジィ情報は，ファジィグラフ［２］で表される．従って，その構造を類似性，関連性などの観点から分析することにより，情報の特徴が抽出され，大域的に適切な意志決定が可能になる．

本稿では，教材の類似構造（勝又［12］）と関連構造（山下［８］）を総合した認知構造による教材構造の解析方法を提案すると共に，数学教材への適用事例を報告する．

2．教材の分析方法

教授者の教材構造は，学習者の認知構造を分析し，これと比較，吟味（図２.1）することにより，実証的に検証，または，改善することができる．

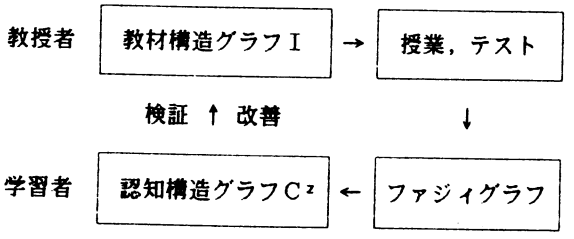


図２．１　教材の分析手順

ｍ人の学習者｛Ｓｋ｝にｎ項目のテスト｛Ｐｉ｝を実施すると，テストの得点行列Ｘ＝（ｘｋｉ）が得られる．但し，ＳｋがＰｉを正答した場合はｘｋｉ＝１，誤答した場合はｘｋｉ＝０とする．次に，テスト項目ＰｉとＰｊの同時正答者数をａ，同時誤答者数をｄ等とすると，図２.２のクロス集計表が得られる．

Pi＼Pj	1	0	合　計
1	a	b	a＋b
0	c	d	c＋d
合　計	a＋c	b＋d	n

図２．２　クロス集計表

クロス集計表から，ＰｉとＰｊの類似係数ｓｉｊとＰｉからＰｊへの関連係数ｔｉｊが定義され，これから，ファジィ類似構造グラフＳ＝（ｓｉｊ）とファジィ関連構造グラフＴ＝（ｔｉｊ）が作成される．

定義２.１　$s_{ij}=(a+d)/n \in [0,1]$

定義２.２　$t_{ij}=(a+d)/[(a+c)+(c+d)] \in [0,1]$

ただし，ｂ＝ｎのときは，$t_{ij}=1$とする．

定理２.１　$2/s_{ij}=1/t_{ij}+1/t_{ji}$

ファジィグラフSのクラスター分析により，類似度zに関する分割樹形図Pを作成する．これから，教材項目{P_i}を類別することができる．

一般に，ファジィグラフTは複雑であるので，山下の近似アルゴリズムにより，その構造を簡約化し，項目間のクリスプな関連とファジィな関連を三値的に表す近似グラフT*を作成する（山下[13]）．これから，教材項目{P_i}を順序ずけることができる．

教材の類似構造を表す分割樹形図Pと関連構造を表す近似グラフT*を総合して，教材の大域的な特性を表す認知構造グラフC^zを作成する．但し，zはクラスター（同値類）の類似のレベルを表す．

一般に，項目数が多い場合は，認知構造グラフを作成する事は容易でない．このため，分割樹形図のクラスターの関連構造を利用し，認知構造グラフを作成する方法を提案する．

クラスターA={a_i；$1 \leqq i \leqq m$}からB={bj；$1 \leqq j \leqq n$}への関連係数t_{AB}は，次式で定義される．

定義2.3　$t_{AB}=\Sigma\Sigma t_{ij}/mn \in [0,1]$

ただし，A＝Bときは，$t_{AB}=1$とする．

クラスターの関連構造を利用することにより，認知構造グラフは，次の手順で作成される．

（1）分割樹形図Pに関するレベルzのクラスター{A_k}を抽出する．

（2）クラスター{A_k}のファジィ関連構造グラフU^zから，近似グラフU*を作成する．

（3）クラスター{A_k}，近似グラフU*，Tの近似行列T*から，認知構造グラフC^zを作成する．

教材構造の分析に関するデータ解析を正確，かつ，迅速に処理するために，NEC／PC9801による支援システムCARAT（滝沢[4]，図2.3）が開発され，筆者等の間で利用されている．

3．教材の分析事例

教材構造は，教材項目相互の論理関係を分析して作成される教材構造グラフIと，テストデータを分析て作成される認知構造グラフC^zを比較して解析される．

高校数学－順列の数－の教材構造は，（ア）基本型，（イ）円卓型，（ウ）数珠型，および，（A）単純順列，（B）重複順列などの特性により分類される．これから，その教材構造は，図3.1のグラフIとなる．

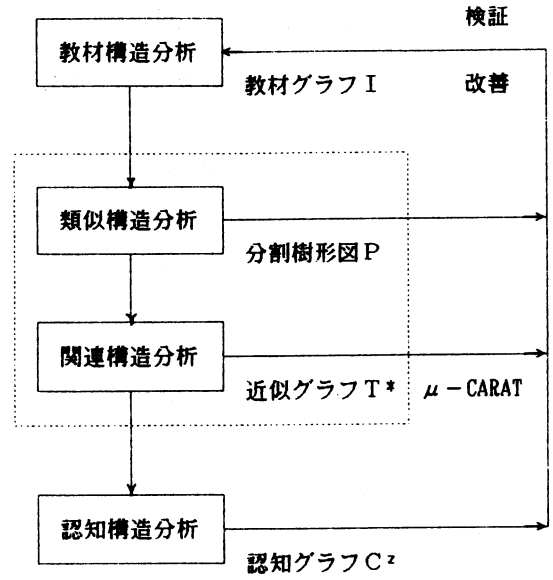


図2.3　教材分析システム

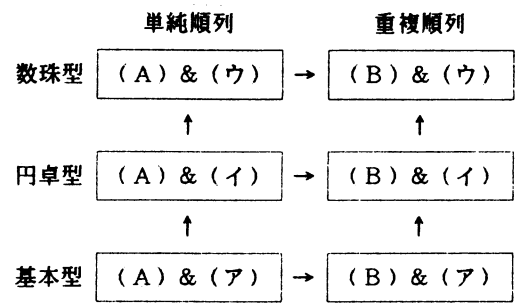


図3.1　グラフ I

教材構造グラフI（図3.1）から，教材順序［基本型：1→2］→［円卓型：3→4］→［数珠型：5→6］，単純順列：1→3→5］→［重複順列：2→4→6］，その他が設計される．

グラフIに基づいて授業し，また，それぞれの教材項目に対応するテスト（図3.2）を実施した．

（1）SPRITEの基本順列の数を求めよ．
（2）COFFEEの基本順列の数を求めよ．
（3）SPRITEの円卓順列の数を求めよ．
（4）COFFEEの円卓順列の数を求めよ．
（5）SPRITEの数珠順列の数を求めよ．
（6）COFFEEの数珠順列の数を求めよ．

図3.2　テスト問題

テスト（図3.2）を採点して，テストの得点行列X（図3.3）を作成する．

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
S1	1	1	1	1	1	0
S2	1	1	1	1	1	0
S3	X	X	X	X	X	X
S4	1	1	1	0	1	0
S5	1	1	1	1	1	1
S6	0	0	0	0	0	0
S7	1	1	1	1	1	1
S8	1	0	1	0	1	0
S9	1	1	1	0	1	0
S10	1	1	1	1	1	1
S11	1	1	1	1	1	1
S12	1	1	1	1	1	0
S13	1	1	1	1	1	1
S14	1	1	1	0	1	0
S15	1	1	1	1	1	1
S16	1	1	1	1	1	0
S17	1	1	1	1	1	1
S18	1	0	1	0	1	0
S19	1	1	1	1	1	0
S20	1	1	1	1	1	0
S21	1	1	1	1	1	0
S22	1	1	1	1	1	0
S23	1	1	1	1	1	1
S24	1	1	1	0	1	0
S25	1	1	1	0	1	0
S26	1	1	1	1	1	0
S27	X	X	X	X	X	X
S28	1	1	1	0	1	0
S29	1	1	1	1	1	0
S30	1	1	1	0	1	0
S31	1	1	1	1	1	0
S32	1	1	1	1	0	0
S33	1	1	1	1	1	1
S34	1	1	1	1	1	0
S35	1	1	1	1	1	1
S36	1	1	1	1	1	1
S37	1	1	1	1	1	1
S38	1	1	1	1	1	0
S39	1	1	1	1	1	1
S40	1	1	1	0	1	0
S41	1	1	1	1	1	1
S42	1	1	1	1	1	1

図３．３　得点行列 X

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0.90 & 1.00 & 0.70 & 0.98 & 0.38 \\ 0.90 & 1 & 0.90 & 0.75 & 0.88 & 0.43 \\ 1.00 & 0.90 & 1 & 0.70 & 0.98 & 0.38 \\ 0.70 & 0.75 & 0.70 & 1 & 0.68 & 0.63 \\ 0.98 & 0.88 & 0.98 & 0.68 & 1 & 0.40 \\ 0.38 & 0.43 & 0.38 & 0.63 & 0.40 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0.95 & 1.00 & 0.93 & 1.00 & 1.00 \\ 0.86 & 1 & 0.86 & 0.94 & 0.85 & 1.00 \\ 1.00 & 0.95 & 1 & 0.93 & 1.00 & 0.94 \\ 0.56 & 0.63 & 0.56 & 1 & 0.55 & 1.00 \\ 0.95 & 0.90 & 0.95 & 0.87 & 1 & 1.00 \\ 0.23 & 0.27 & 0.23 & 0.45 & 0.25 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T^* = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \alpha & 1 & \alpha & 1 & \alpha & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

図３．４　行列 S，T，T*

次に，テストの得点行列X（図３．３）から，ファジィ類似構造行列S，ファジィ関連構造行列T，行列Tの近似三値行列T*（図３．４）を作成する．

ファジィ行列Sの推移包$\hat{S}$から，分割樹形図P（図３．５）を作成する．

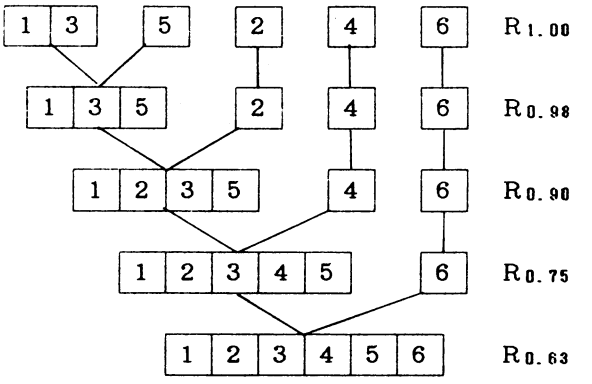


図３．５　グラフ P

認知構造グラフは，分割樹形図P，ファジィ行列T，Tの近似行列T* を用いて，次の手順で作成される．

（１）分割樹形図Pのレベルｚ＝0.98のクラスター抽出する（図３．６）．

（２）ファジィ関連構造グラフU^z（図３．７）から，近似グラフU*を作成する（図３．８）．

（３）クラスター，近似グラフU*，Tの近似行列T*から，認知構造グラフC^{z}を作成する（図３．９）．

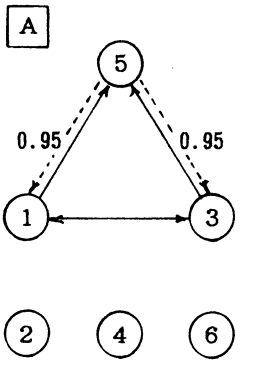


図３．６　クラスター

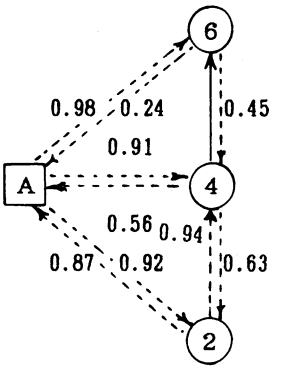


図３．７　グラフ U^z

グラフC^{z}から，教材の認知構造に関して，次のことが考察される．

（ａ）C^{z}に同値類｛１，３，５｝が存在することから，性質（A）|（B）が，性質（ア）|（イ）|（ウ）より強いことが判断される．

（ｂ）C^{z}に弧１→２，３→４，５→６が存在し，経路１→３→５と２→４→６が存在することから，順序(A)→(B)と（ア）→(イ)→(ウ）が検証される．

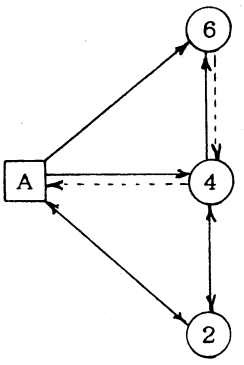


図3.8 グラフ U*

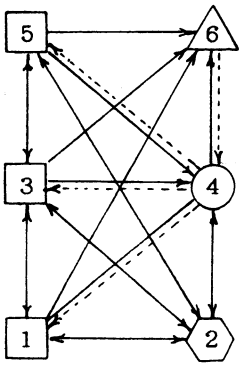


図3.9 グラフ C^z

（c）C^z に発散核が1，集中核が6のスパンニング経路1→3→5→2→4→6が存在することから，教材系列（A：1→3→5）→（B：2→4→6）が提唱される．

ここで，現行の教科書の教材構造は，この分析結果と一致することから，その妥当性が検証された．

適用事例が示すように，認知構造を分析することは，教材構造の検証，改善に有用であり，また，その結果は，ＣＡＩのコース設計にも利用される．

3．むすび

本稿では，ファジィ理論を応用した教材の認知構造の分析法として，分割樹形図に関するクラスターの関連構造を利用した構成法を提案し，あわせて，数学に関する適用事例を報告した．

分析事例が示すように認知構造を吟味することは，教材構造の検証／改善に有用であり，また，その結果は，ＣＡＩのコース設計にも利用される．なお，事例は数学を題材としているが，ＣＡＲＡＴシステム支援の本分析法は，任意の教科，教材にも適用することができる．

末筆ながら，本研究に関してお世話になった早稲田大学の洲之内治男教授，滝沢武信助教授，玉川大学の横井正宏助教授，川村女子大学の西村和子助教授，宮城教育大学の森岡正臣助教授，及び，カリフォルニア大学のＬ．ザデー教授に感謝する．

参考文献

[1] Harary：Graph Theory, Addison－Weseley, 1969.
[2] 西田：ファジイ集合とその応用，森北出版，1978.
[3] 浅居：ファジイシステム理論入門，オーム社，1978.
[4] 滝沢，山下，横井：コンピュータによるテスト編集管理システム，情報処理学会大会，1978～1989.
[5] 山下，洲之内，他：パーシャルファジィグラフを応用した教材構造分析，教育工学会大会 5E－2，1985.
[6] 柳井：多変量解析ハンドブック，現代数学社，1986.
[7] 山下，森岡 ： On Global Structure of Fuzzy Graph, Analysis of Fuzzy Information I, CRC Press, 1987.
[8] 山下，勝又，津田：ファジィグラフの近似システムと応用，IFSA／JC シンポジゥム S－5，1987.
[9] 洲之内，山下，祝原，森岡：教材の構造解析，科学教育研究 Vol.10－1，1987.
[10] 山下：Fuzzy Clustering & Ordering in Instruction Analysis, 7th NAFIPS Congress B7－3, 1988.
[11] 津田，勝又，山下： Fuzzy Clustering and Ordering, Int'l Workshop on Fuzzy System Application C－8, 1988.
[12] 勝又，津田，山下：ファジィクラスタリングを応用した教材分析，IFSA／JCシンポジゥム OR－4，1988.
[13] 山下：Approximation Algorithm of Fuzzy Graph and its Application, 3rd IFSA Congress TH-5, 1989.
[14] 津田，勝又，山下，滝沢，西村：Similarity Index & Connectivity Index in a Fuzzy Graph, 7th NAFIPS Congress 4－288, 1990.
[15] 山下：ファジィ理論を応用した教材分析法，電子情報通信学会技術研究報告 ET90－47，1990.

［付録：ファジィグラフの近似グラフ］

ファジィグラフＴのｐ－グラフをT^p，グラフＴとT^pの距離を$d(T,T^p)$とする．

$$T^p=(t^p_{ij}),\quad t^p_{ij}=\begin{cases}1 & (t_{ij}>p+0.5)\\ 0 & (t_{ij}<p-0.5)\\ t_{ij} & (\text{その他})\end{cases}$$

$$d(T,T^p)=2\Sigma\,|t_{ij}-t^p_{ij}|\,/(n^2-n)$$

$d(T,T^p)<\varepsilon$のとき，T^pをＴのε－類似グラフという．ただし，εはファジィ決定による数値で，通常，0.20，0.27などとされる（山下［7］）．

$\pi=\mathrm{Min}\{p\,;\,d(T,T^p)<\varepsilon\}$とするとき，$T^*$をＴの$\varepsilon$－近似グラフという．

$$T^*=(t^*_{ij}),\quad t^*_{ij}=\begin{cases}1 & (t_{ij}>\pi+0.5)\\ 0 & (t_{ij}<\pi-0.5)\\ \alpha & (\text{その他})\end{cases}$$

T^*は，Ｔの構造を近似的に三値化したグラフで，t_{ij}の1，0はクリスプな関係，αはファジィな関係を表す．

ファジィグラフの近似アルゴリズムは，次のようになる．

（a）p←0としてT^pを作り，（b）に移る．

（b）$d(T,T^p)<\varepsilon$であれば（d）に移り，そうでなければ（c）に移る．

（c）p←p＋δ（＞0）としてT^*を作り，（b）に移る．

（d）T^pからT^*を作る．

FC2-3

核酸配列分析へのファジィマッチング関数の応用

Application of a fuzzy matching function to DNA sequence analysis

三宅　輝久、宮本　定明、中山　和彦
Teruhisa MIYAKE, Sadaaki MIYAMOTO and Kazuhiko NAKAYAMA
筑波大学　電子・情報工学系
Institute of Information Sciences and Electronics, Univ. of Tsukuba

ABSTRACT: Finding similarities in the nucleotic acid sequences, called homology searching, is a useful method to analyze molecular genetics data. From the view point of fuzzy set theory, similarity values calculated by homology searching can be regarded as membership values in a fuzzy set of DNA sequences. In this paper, a method in which a fuzzy matching function is used to calculate similarity values is proposed and application to DNA databank search is reported.

1．はじめに

分子遺伝学の分野では、遺伝情報を担っている遺伝子の核酸配列の分析やアミノ酸配列の分析のためにホモロジーサーチという手法が用いられている。ホモロジーサーチは、2つの配列についてどの程度似ているかを示す類似度と最も類似している部分列を出力することを目的としている。しかしながら、従来行われてきたホモロジーサーチの方法では、あらかじめ定められたパラメータに対応して、結果が出力されるため、異なったパラメータを用いて求められた類似度の値を比較することができなかった。一方、パラメータを固定化して、いく組かのホモロジーサーチを行っても、それら全てに最適なパラメータは存在しないため良い結果は得られなかった。本報告では、ホモロジーサーチをファジィ理論の立場から見直し、核酸配列間にマッチング関数を用いてファジィ関係を計算することを提案し、このファジィ関係を類似度としてＤＮＡデータバンクを検索する方法について紹介する。また、小規模なデータバンクに対して実験的に適用した例について報告する。

2．ホモロジーサーチ

新しく同定された核酸配列やアミノ酸配列は、既知の配列と比較し、同様の部分があるか、どの程度類似しているかを調べられる。この類似性分析は、ホモロジーサーチと呼ばれる。核酸配列やアミノ酸配列の長さは、数百万要素にもおよぶため、実際の分析の対象は、その一部断片であるが、それでも長さは、数千にも達する。核酸配列の内、短いものの例を図1に示す。

長い配列の場合、人間の手で分析することは不可能に近い。

そのため、コンピュータを用いてホモロジーサーチを行うアルゴリズムが幾つか提案され、それらを用いたプログラムが開発されている。それらのアルゴリズムの内、最も有名なものは、Needleman と Wunsch のアルゴリズム[1]とその改良版とも言えるSellers のアルゴリズム[2]であろう。これらは、Fitch とSmith により1983年にインプリメントされた[3]。また、同様のアルゴリズムに基づいてGoadとKanehisaはfaシステム[4]を開発した。他にも、Brutlag らのSEQ システム[5]やWilburらのシステム[6]等、多数のプログラムが開発されてきた。Needleman と Wunsch のアルゴリズムでは、比較する2つの配列をＸ軸とＹ軸にとり、端点からＸ軸の要素とＹ軸の要素が一致しているかどうかにより、定まった手順に従って順次加算した値（スコア）を要素とした行列（スコア行列）を作成する。見方をかえれば、ある要素のスコアは、端点からその要素へ到る多くの経路について、経路に従って加算したスコアの最大値となっている。従って、スコア行列中の最大値を持つ要素は、経路に従って加算したスコアが、スコア行列に含まれる経路の中で最大値をとる経路の終点となっている。この経路は、2つの配列の比較において、最も共通した部分が多く含まれる配列という意味でOptimal Alignment と呼ばれる。終点から始

```
1        10        20        30        40        50        60        70        80  85
AGCTTATCAC CACCTGTAAC AACTTTTTTT GTATAAGTCC CCAAGCGCTT CACCGTGCCA CAGCCCTGCT TTTGGCCGTC AAGCT
```

図1　核酸配列の例　Geryon.quinque.repetitive(DNA)

点までを逆にたどることにより、実際のOptimal Alignmentを求めることができる。また、その最大のスコア値そのものが２つの配列の類似度を表す値となる。しかしながら、スコアの値は、利用者が与えた、　要素の一致(match)、不一致(mismatch)、ずれ(gap)の３つのパラメータの値に基づいて計算されるため、このアルゴリズムに基づいたプログラムにおいては、結果がパラメータの値に依存して変化するという欠点を持っている。特に類似度を表す最大のスコア値は、パラメータの値が異なれば比較しても意味がないものである。これらのパラメータは、比較する配列の性質に依存して最適値が異なるため、パラメータ値の選択には十分な経験が必要でありホモロジーサーチの利用は、初心者には難しいものであった。

３．マッチング関数

文献情報の検索において、キーワードの部分列の類似度を計算するマッチング関数を先に提案し、ファジィ情報検索の一機能として利用した[7]。ホモロジーサーチにおいて比較される２つの配列は、ヌクレオチドやアミノ酸の種類をアルファベットとして作られた２つの文字列とみることができる。言い換えれば、２つの配列の類似度を求めることは、２つの文字列の一致の度合いを求めることと等価である。従って、ホモロジーサーチの場合においても、検索キーワードと索引語のマッチングの場合と同様に、部分列の一致に基づいたマッチング関数を用いて類似度を求めることが考えられる。

マッチング関数においては、文字列を、それを構成する部分列の集合と考え、２つの文字列の部分列の内、完全一致しているものの割合を基にマッチングの値を計算する。マッチング関数としては、よく知られているものがいくつかあるが、ホモロジーサーチにおいては、一般的に、比較する２つの配列の長さは異なり、一方が他方に完全に含まれている場合も有り得ることを考慮して、ここではOVERLAP 係数として知られる次のものを採用した。

$$\frac{|A \cap B|}{\min[|A|, |B|]} \qquad (1)$$

（ただし、Ａ，Ｂは集合，｜Ａ｜は集合Ａの要素の数とする。）

比較する２つの配列を、Ｓ１，Ｓ２とし、SUB(X)を配列Ｘ自身を含むＸの全ての部分列の集合とし、次のようにファジィマッチング関数ｍを定義する。

$$m(S1, S2) = \frac{|SUB(S1) \cap SUB(S2)|}{\min[|SUB(S1)|, |SUB(S2)|]} \qquad (2)$$

SUB(S1)∩SUB(S2) は、 S1 の部分列と S2 の部分列の内、両者が完全一致する部分列の集合である。

３．マッチング関数の計算

ホモロジーサーチにおいてマッチングの対象となる２つの配列の完全一致する部分列を見出すためには、それぞれの配列の長さが同じ部分列同士を比べればよい。２つの配列の長さは通常異なるから、短い方の配列の長さ以下の部分列を比べることになる。長さＬの配列の部分列の数はＬ＊（Ｌ＋１）／２、この内長さＭ（Ｍ≦Ｌ）の部分列の数はＬ－Ｍ＋１であるから、２つの配列の長さをそれぞれL_1，L_2（$L_1 \leq L_2$）とすると単純に比較を行った場合の比較回数Ｃは、次のようになる。

$$C = \sum_{i=1}^{L_1} (L_1 - i + 1) * (L_2 - i + 1) \qquad (3)$$

Ｃは、$L_1 \fallingdotseq L_2$の場合には、$O(L_1^3/3)$のオーダーとなり配列が長い場合には現実的とは言えない。そこで、それぞれの配列の部分列についてソーティングを行い、同じものをまとめると共に順序をそろえることにより、比較回数を大幅に削減することができる。

４．従来のホモロジーサーチとの違い

マッチング関数を使用した場合は、従来のホモロジーサーチとは異なり、出力は類似度の値のみであり、Optimal Alignment を直接得ることはできない。　Optimal Alignment を必要とする場合は、従来の方法によらざるを得ない。しかし、マッチング関数の値は、従来のホモロジーサーチで求められた類似度とは異なり、パラメータ等に依存していない。そのため、複数のマッチングの結果を比べることができる。これにより、従来のホモロジーサーチが、不得意であった分野への応用が可能となる。

５．ＤＮＡデータバンクのファジィ検索への応用

過去にその配列が決定された核酸配列は、新たに解明された配列と比較・分析するために収集され、ＤＮＡデータバンクとして提供されている。ここで考えたマッチング関数を、ＤＮＡデータバンクのファジィ検索に応用することができる。ＤＮＡデータバンクの構成を図２に示す。

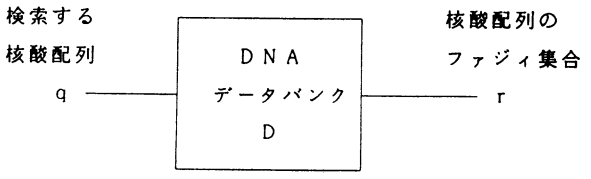


図２　ＤＮＡデータバンクの構成

検索を行う核酸配列ｑは、データバンクＤ中の核酸配列 d_i と比較され、核酸配列のファジィ集合ｒを出力する。マッチング関数ｍを用いた場合の出力ｒは、

$$r = D\,m\,q = \Sigma\, m(d_i, q)/d_i \qquad (4)$$

となる。

出力ｒを、核酸配列の類似度（グレード）の順番にソートし、グレードの高いものから出力してやれば、ｑに似た配列を必要な数だけ得ることができる。

６．ＤＮＡデータバンクの実験システム

ＤＮＡデータバンクとして良く知られたものに、米国ロスアラモス国立研究所が編集・配布しているGenBankや、西独European Molecular Biology Laboratory が編集・配布しているＥＭＢＬがある。これらはともに１万以上の核酸配列からなっているが、ここでは実験的にＥＭＢＬから表１に示す２０の配列を抽出し、小規模なデータバンクを構成した。

表１　実験システムで使用した核酸配列

AD2B95	ADENO.ADENO2.90.100; DNA; 3766 BP.
AD2R1D	ADENO.ADENO2.ECOR1DFRAGMENT; DNA; 2678 BP.
AD2R1F	ADENO.ADENO2.ECOR1FFRAGMENT; DNA; 1743 BP.
AD2TR1	ADENO.ADENO2.LEFTTERMINALREPEAT; DNA; 157 BP.
AD2TR2	ADENO.ADENO2.RIGHTTERMINALREPEAT; DNA; 160 BP.
AD2VAR	ADENO.ADENO2.VIRUSASSOCIATEDRNA; DNA; 552 BP.
AD5H3G	ADENO.ADENO5.HIND3G; DNA; 1236 BP.
AD5TRX	ADENO.ADENO5.TERMINALREPEAT; DNA; 1078 BP.
AD5VAI	ADENO.ADENO5.VAI; DNA; 90 BP.
AD5XX1	ADENO.ADENO5.(DBP.100K); DNA; 3495 BP.
AD5XXX	ADENO.ADENO5.DNABINDINGPROTEIN; DNA; 918 BP.
AD7TR1	ADENO.ADENO7.LEFTTERMINALREPEAT; DNA; 188 BP.
AD7TR2	ADENO.ADENO7.RIGHTTERMINALREPEAT; DNA; 190 BP.
ADCXXX	ADENO.ADENOC.TRANSFORMINGREGION; DNA; 1120 BP.
ADXH3G	ADENO.ADENO12.HIND3G; DNA; 2320 BP.
ADXTR1	ADENO.ADENO12.LEFTTERMINALREPEAT; DNA; 200 BP.
ADXTR2	ADENO.ADENO12.RIGHTTERMINALREPEAT; DNA; 189 BP.
ATTXXX	AGROBACT.TUMEFAC.T; DNA; 216 BP.
BMFIBR	BOMBYX.MORI.FIBROIN; DNA; 2048 BP.
BMRNA1	BOMBYX.MORI.TRNA; DNA; 119 BP.

これらの配列は、平均９４８、最大３７６６、最小９０の塩基からなっている。検索する核酸配列は、これら２０の配列の全てとマッチングを行い、グレードが最大の配列から順番に出力される。検索時間を短縮するためにデータバンク中の配列には、配列毎にあらかじめソートされた部分列の集合からなるファイル（部分列ファイル）を用意している。部分列ファイルの例を図３に示す。

検索の際には、核酸配列ｑについてソートされた部分列の集合を作成し、部分列ファイルと照合し、マッチングの値を計算する。得られたマッチングの値によりソートし、値が高い配列から順番に出力する。実験システムの構成を図４に示す。実験システムはＦＡＣＯＭ　Ｍ７８０／２０上で開発されバッチ処理の形で使用される。

```
 37 A                :
  7 AA               :
  2 AAC              :
  1 AACA             1 AACACATGTAAGCGCCGG
    AACAC            1 AACG
    AACACA           1 AACGG
    AACACAT                :
    AACACATG               :
    AACACATGT              :
    AACACATGTA       1 TTTTGGATTGAA...CCGG
    AACACATGTAA
    AACACATGTAAG
```

図３　部分列ファイルの例

検索する核酸配列は、あらかじめファイルに入力され前処理ルーチンによって部分列に分解された後に、ソートされ、同じものはまとめられ、作業用部分列ファイルに格納される。作業用部分列ファイルの内容は、マッチングルーチンにより、それぞれの配列に対応した部分列ファイルと比較され、一致した部分列の数が数えられ、マッチング関数の値（グレード）が計算される。全ての配列についてグレードが計算されたならば、出力ルーチンによってグレードの大きい配列から順番に出力される。実験システムの検索例を、図５にしめす。

７．おわりに

マッチング関数を用いた場合、従来のホモロジーサーチと比べてOptimal Alignment を出力できないという欠点がある。そのため、Optimal Alignment を得ることが分析の目的である場合には使用することはできない。しかしながら、出力された配列のどの部分がより類似して

いるかを示すLocal Alignment を出力することは、配列の各部分に対して部分的なマッチングを行うことにより可能である。

また、実際に長い核酸配列同士が完全に一致することはほとんどないから、初めから一定以上の長さの部分列に対する処理は行わないで、部分的なマッチングのみを行い、部分的なマッチングの最大値を配列全体のグレードとすることは、処理の高速化を図る上で意味があると考えている。

現状では、ＤＮＡデータバンクのファジィ検索は、配列の数が増えると、処理量が多くなる問題点があるが、アルゴリズムの改良とファジィシソーラスの応用等のノウハウの蓄積により、検索効率と処理の高速化を計ることによって、実用システムを実現することができると考えている。

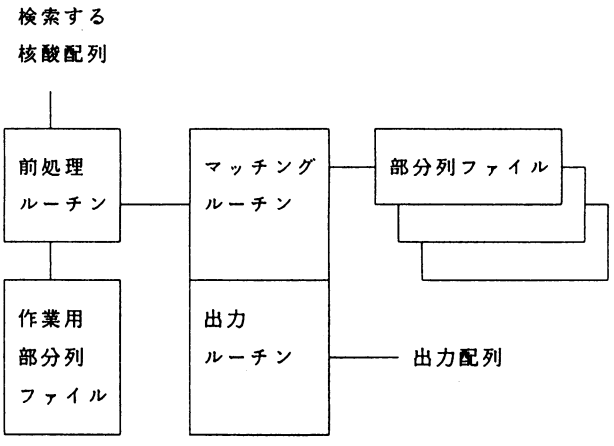


図４　実験システムの構成

```
**********  DNA DATABANK SEARCH **********

----------  SEARCHING SEQUENCE ----------

ECSTRX     ESCHER.COLI.STR;  DNA;  299 BP.

AATCCGCGAA TGCCGTCCGC TGTCCAAGAC TAAATCCTGG ACGCTGGTTC GCGTTGTAGA
GAAAGCGGTT CTGTAATACA GTACACTCTC TCAATACGAA TAAACGGCTC AGAAATGAGC
CGTTTATTTT TTCTACCCAT ATCCTTGAAG CGGTGTTATA ATGCCGCGCC CTCGATATGG
GGATTTTTAA CGACCTGATT TTCGGGTCTC AGTAGTAGTT GACATTAGCG GAGCCTAAAA
TGATCCAAGA ACAGACTATG CTGAACGTCG CCGACAACTC CGGTGCACGT CGCGTAATG


**********   SEARCH RESULT **********

NO. 1      SIMILARITY VALUE= 0.2268620
AD5VAI     ADENO.ADENO5.VAI;  DNA;  90 BP.

NO. 2      SIMILARITY VALUE= 0.2268620
AD5XX1     ADENO.ADENO5.(DBP.100K);  DNA;  3495 BP.

NO. 3      SIMILARITY VALUE= 0.0802225
AD2TR1     ADENO.ADENO2.LEFTTERMINALREPEAT;  DNA;  157 BP.

NO. 4      SIMILARITY VALUE= 0.0775621
AD2TR2     ADENO.ADENO2.RIGHTTERMINALREPEAT;  DNA;  160 BP.

NO. 5      SIMILARITY VALUE= 0.0591017
AD7TR1     ADENO.ADENO7.LEFTTERMINALREPEAT;  DNA;  188 BP.

NO. 6      SIMILARITY VALUE= 0.0576998
ADXTR2     ADENO.ADENO12.RIGHTTERMINALREPEAT;  DNA;  189 BP.

NO. 7      SIMILARITY VALUE= 0.0574263
AD7TR2     ADENO.ADENO7.RIGHTTERMINALREPEAT;  DNA;  190 BP.

NO. 8      SIMILARITY VALUE= 0.0526368
ADXTR1     ADENO.ADENO12.LEFTTERMINALREPEAT;  DNA;  200 BP.

NO. 9      SIMILARITY VALUE= 0.0439068
ATTXXX     AGROBACT.TUMEFAC.T;  DNA;  216 BP.

NO.10      SIMILARITY VALUE= 0.0387514
AD2895     ADENO.ADENO2.90.100;  DNA;  3766 BP.
```

図５　実験システムの検索例

参考文献

1. Needleman S. B. and c. d. Wunsch,　A general method applicable to the search for Similarities in the aminoacid sequence of two proteins, J. Med. Biol., 40(1970), 443-453
2. Sellers P. H.,　On the theory and computation of evolutionary distances,　SIAM　J. Appl. Math. 26(1974), 787-793
3. Fitch, W. and T. Smith,　Optimal Sequence Alignment, Proc. natn. Acad. Sci. U.S.A., 80(1983), 1382-1386
4. Goad, W. B. and M. I. Kanehisa,　Pattern recognition in Nucleic Acid Sequences I. A General Method for Finding Local Homologies and Symmetry, Nucl. Acids Res., 10(1982), 247-263
5. Brutlag D. L.,　J. Clayton, P. Friedland and L. H. Kedes, SEQ: a nucleotide sequence analysis and recombination system, Nucl. Acids Res., 10(1982), 279-294
6. Wilbur, W. J. and D. J. Lipman, Rapid Similarity Searches of Nucleic Acid and Protein Databanks, Proc. natn. Acad. Sci. U.S.A., 80(1983), 726-730
7. 三宅、宮本、中山、ファジィ情報検索システムのためのマッチング関数、第５回ファジィシステムシンポジウム講演論文集(1989), 439-442

問い合わせ先：〒305 つくば市天王台1 —1 —1
筑波大学　電子・情報工学系
三宅　輝久
TEL: 0298-53-6222
FAX: 0298-53-2983

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FC2-4

ファジィ理論を応用したソシオメトリー分析 II
Sociometry Analysis Applying Fuzzy Theory

津田 栄 Ei Tsuda 国学院高校 Kokugakuin Sr.H.S.
勝又保雄 Yasuo Katsumata 目黒高校 Meguro Sr.H.S.
山下 元 Hajime Yamashita 早稲田大学 Waseda University

Abstract : It would be more practical to represent the human relations by using a fuzzy graph rather than the crisp form such as a hard cluster.

According to the data obtained from the several questionairs, we could measure the connectivity degree among the members and construct the fuzzy graph among members.

By applying the fuzzy clusterings and the orderings, we have developed an analysis method of the sociogram which is one of the measurement and the evaluation method on a group structure.

In this paper, we would not only discuss the analysis method, but also present its practical effectiveness through a case study.

1．はじめに

ファジィ理論は，人間の行動，認識などに関するあいまいな情報を分析し，意志決定を行う理論で，制御，経営などに加えて，心理，教育等の分野に広く応用されている．

ソシオメトリー(MORENO [1]) は，集団成員の関連構造，即ち，相互の選好や排斥の度合を定量的に分析する社会測定法であるが，その状態を明確に表すことは仲々困難である．ここで，ファジィグラフを応用することにより，人間関係や集団構造の特性を，かなり適切に抽出できる．

本稿では，ファジィグラフを応用したソシオグラムの構成法を論ずると共に，学校教育に関する適用事例を通じて，その効用について述べる．

2．ソシオグラムの構成方法

L人の集団に，M人（1＜M＜L）を選択するN項目のアンケートを行うと，成員iがjを選択する回数a_{ij}を要素とする応答行列A＝（a_{ij}），$0 \leqq a_{ij} \leqq N$，が得られる．

次に，山下［9］により，友交のファジネスs_{ij}，選好のファジネスt_{ij} を提案する．

（1）$2/s_{ij} = N/a_{ij} + N/a_{ji}$ $(0 \leqq s_{ij} \leqq 1)$から，成員iとjの友交の度合のファジィ行列（グラフ）S＝(s_{ij})，$s_{ij} = s_{ji}$，を定義する．

（2）$t_{ij} = a_{ij}/N$ $(0 \leqq t_{ij} \leqq 1)$から，成員iがjを選好する度合のファジィ行列（グラフ）T＝(t_{ij})，$t_{ij} \neq t_{ji}$，を定義する．

集団成員に関する情報は，（I）ファジィ友交グラフSのクラスター分析による分割樹形図Pと（II）ファジィ選好グラフTの近似分析による近似グラフT^*に集約され，さらに，これを総合して，ファジィソシオグラムF^zが構成される．

一般に，集団成員数Lが大である場合には，（I）と（II）を総合する作業は簡単ではない．そこで，筆者らは，クラスターに関するファジィ選好グラフを用いて，組織的にファジィソシオグラムF^zを構成する方法を，以下に提案する．

クラスター分析による分割樹形図Pは，レベルzを基準とした友交関係のクラスターの分岐状態を示すグラフである．クラスターC＝$\{c_i ; 1 \leqq i \leqq m\}$からD＝$\{d_j ; 1 \leqq j \leqq n\}$への選好関係$u_{cd}$ を，次式で定義する．

定義2.1 $u^m_{cd} = \Sigma u^m_{id}/|m|$, $u^n_{id} = \Sigma t^n_{ij}/|n|$

定理2.1 $m=1, n=1 \rightarrow u_{cd} = t_{ij}$

$m, n \uparrow +\infty \rightarrow u_{cd} \uparrow \mathrm{Max}\{t_{ij}\}$

$m, n \downarrow -\infty \rightarrow u_{cd} \downarrow \mathrm{Min}\{t_{ij}\}$

レベルzのクラスターをノードとするファジィグラフ $U^z = (u_{cd})$ を近似（山下［10］）すると，近似グラフU^* が得られる．これと，ファジィ行列Tを用いて，ファジィソシオグラムF^z が構成される．

例えば，８人の集団に，２人を選択する４項目のアンケートから，選好の応答行列A（図2.1）を得たとする．このとき，ファジィソシオグラムF^z は，次の手順（1）～（6）で作成される．

$$\begin{pmatrix} * & 3 & 0 & 3 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 2 & * & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & * & 3 & 0 & 4 & 1 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & * & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 1 & 3 & 0 & 0 & * & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & * & 4 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 3 & 0 & 2 & * & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 4 & 0 & 1 & * \end{pmatrix}$$

図２．１ 応答行列Ａ

（１）ファジィ行列Ｓとファジィ行列Ｔを作成する．

$$\begin{pmatrix} 1 & 0.60 & 0.00 & 0.86 & 0.00 & 0.00 & 0.60 & 0.00 \\ 0.60 & 1 & 0.00 & 0.00 & 0.75 & 0.00 & 0.00 & 0.75 \\ 0.00 & 0.00 & 1 & 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.86 & 0.00 & 0.00 & 1 & 0.00 & 0.00 & 0.86 & 0.00 \\ 0.00 & 0.75 & 0.00 & 0.00 & 1 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 1 & 0.67 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.86 & 0.00 & 0.67 & 1 & 0.00 \\ 0.00 & 0.75 & 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 1 \end{pmatrix}$$

図２．２ ファジィ行列Ｓ

$$\begin{pmatrix} 1 & 0.75 & 0.00 & 0.75 & 0.00 & 0.00 & 0.50 & 0.00 \\ 0.50 & 1 & 0.00 & 0.00 & 0.75 & 0.00 & 0.00 & 0.75 \\ 0.00 & 0.00 & 1 & 0.75 & 0.00 & 1.00 & 0.25 & 0.00 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 1 & 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.25 & 0.75 & 1.00 & 0.00 & 1 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 1 & 1.00 & 0.00 \\ 0.75 & 0.00 & 0.00 & 0.75 & 0.00 & 0.50 & 1 & 0.00 \\ 0.00 & 0.75 & 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.25 & 1 \end{pmatrix}$$

図２．３ ファジィ行列Ｔ

（２）ファジィ行列Ｓから，分割樹形図Ｐを作成する．

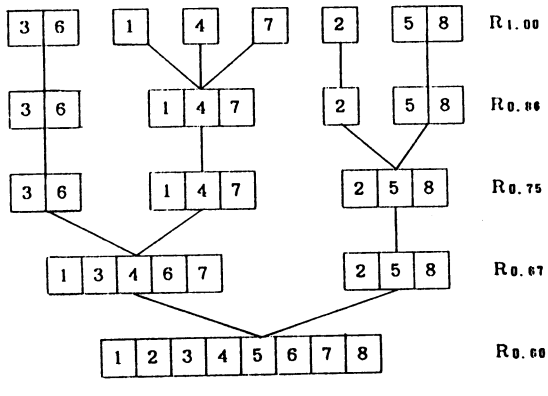


図２．４ 分割樹形図Ｐ

（３）ＰのR0.75 のクラスターＡ，Ｂ，Ｃを抽出する．

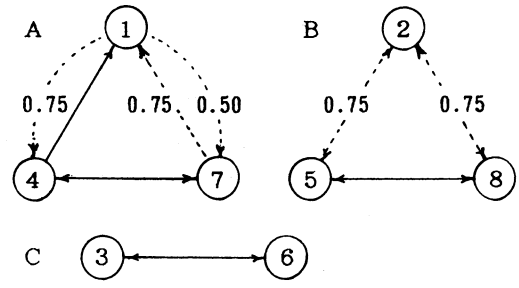


図２．５ クラスターＡ，Ｂ，Ｃ

（４）Ａ，Ｂ，Ｃに関するファジィグラフU²を作成する．
（５）ファジィグラフU² の近似グラフU*を作成する．

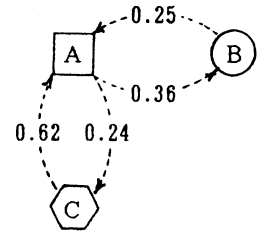


図２．６ グラフU²

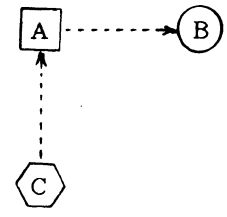


図２．７ グラフU*

（６）U* と行列Ｔから，ソシオグラムＦ²を作成する．

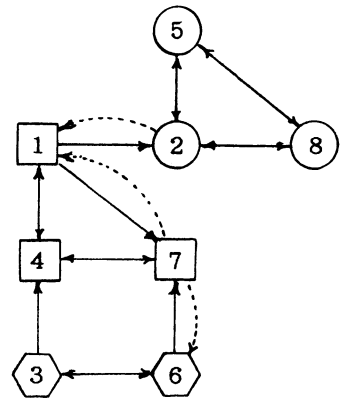


図２．８ ファジィソシオグラムＦ²

ファジィソシオグラムＦ² から，集団成員の大域的な関係が看視できる．

ファジィソシオグラムＦ² は，ファジィグラフU² の近似グラフU* にクラスターＲ² の要素を代入し，次に，それぞれの要素を，ファジィ選好行列Ｔの近似行列Ｔ* で関連させたグラフである．

なお，ファジィソシオグラムＦ² をＴの近似行列Ｔ* から直接作成する方法と比較すると，ここで述べた手順による方法は，組織的であり，また，容易である．

３．ソシオグラムの分析事例

ファジィ理論を応用したソシオグラムの事例として，高等学校での人間関係の分析について述べる．

適用事例は，女子高校生１７人のクラスで，グループ活動に関して４人を選択する４項目のアンケートを実施した結果である．

（１）アンケートの応答行列から，ファジィ行列Ｓとファジィ行列Ｔを作成する．

（２）ファジィ行列Ｓをクラスター分析し，分割樹形図Ｐを作成する（図３．１：クラスター$R_{1.00}$，$R_{0.86}$，$R_{0.00}$）．

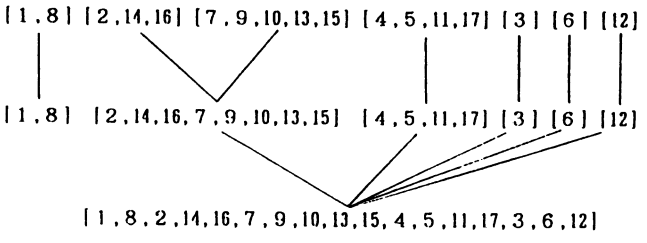


図３．１　分割樹形図Ｐ

（３）分割樹形図Ｐのクラスター集合を検討し，$R_{1.00}$のクラスター{１，８}，{２，14,16}，{４，11,15,17}，{７，９，10，13,15}を抽出する．

ここで，クラスターのグラフ構造を分析する．通常は，結合する経路の長さが２以内の要素を同値類とみなす．

クラスター{７，９，10,13,15}に関して，要素９と13は長さ３の経路で結合している．このため，{７，９，10}と{13，15}に分割し，Ａ～Ｅとする（図３．２）．

Ａ＝{１，８}　　Ｂ＝{２，14,16}

Ｃ＝{４，11,15,17}　　Ｄ＝{７，９，10}

Ｅ＝{13,15}

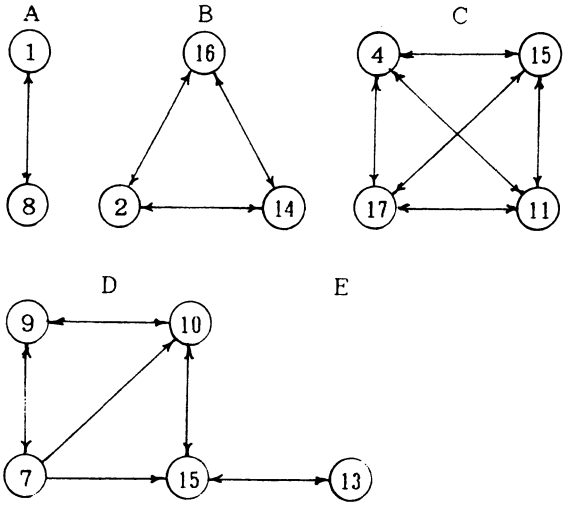


図３．２　クラスターＡ，Ｂ，Ｃ，Ｄ，Ｅ

（４）クラスターＡ，Ｂ，Ｃ，Ｄ，Ｅの関連構造を解析し，ファジィグラフU^zを作成する（図３．３）．

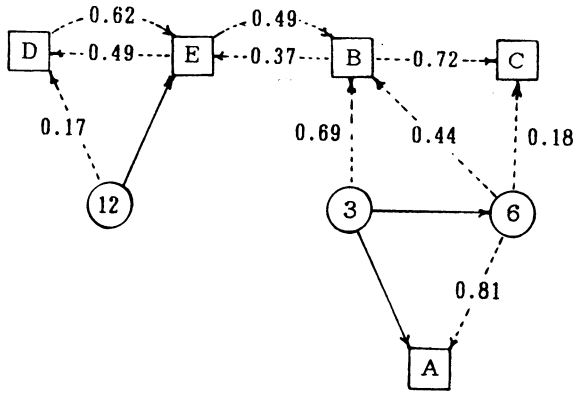


図３．３　ファジィグラフU^z

（５）ファジィグラフU^zを近似分析し，近似グラフU^*を作成する（図３．４）．

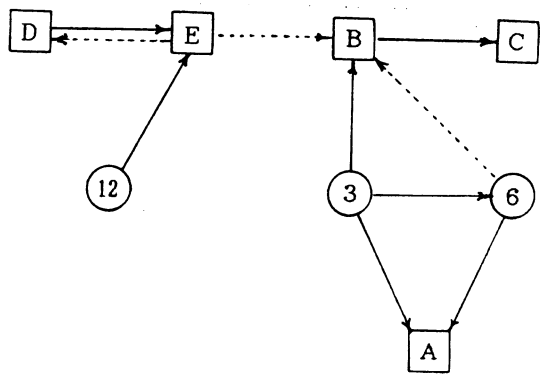


図３．４　近似グラフU^*

（６）U^zの近似グラフU^*にクラスターＡ～Ｅの要素を代入し，その要素をファジィ行列Ｔの近似行列T^*で関連させ，ファジィソシオグラムF^zを作成する（図３．５）．

ファジィソシオグラムF^zから，クラス成員の大域的な関係が看視できる．

実際，17はクラス委員で，人望があり，オピニオンリーダーである．

13と15はギター部員，４，５，11，17はダンス部員で大変仲が良い．また，１，３，６，８は陸上部員である．これから，クラブ活動と人間関係の影響がよく解る．

その他，小グループや孤立成員の集団における状態なども判断される．

適用事例が示すように，ファジィソシオグラムから成員の人間関係がかなり明確になり，クラス運営に必要な情報が種々得られる．

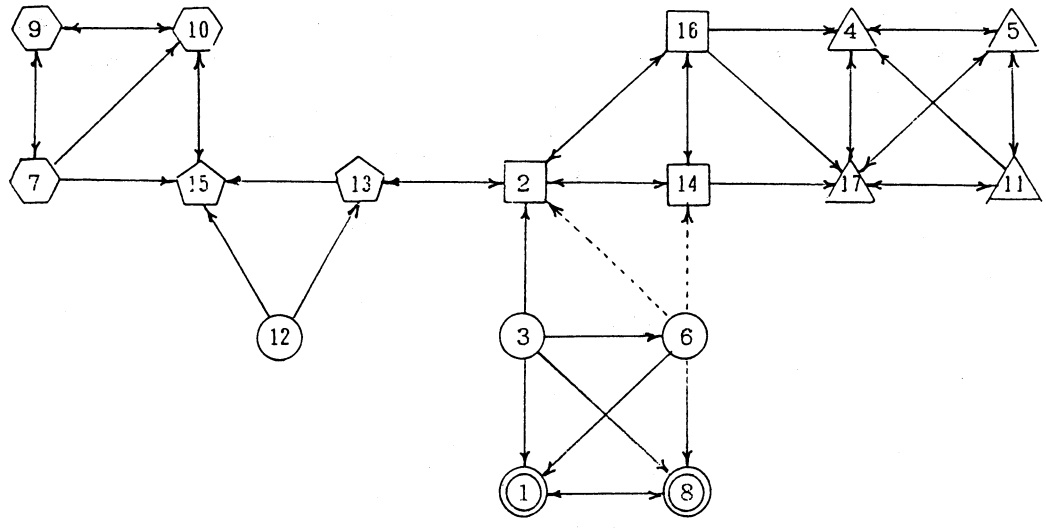


図3.5　ファジィソシオグラムF^z

4．むすび

本稿では，ファジィグラフを応用したソシオグラムの構成法を提案すると共に，実際的な適用事例を通じて，その効用を示した．

また，適用事例は学校教育に関するものであるが，本分析法は，社会集団の構造や系列の分析などにも適用される．

末筆ながら，本研究に関してお世話になった早稲田大学の洲之内治男教授，滝沢武信助教授，川村女子大学の西村和子助教授，拓殖大学の竹谷誠助教授，および，カリフォルニア大学のL．ザデー教授に感謝する．

参考文献

[1] Moreno：The Sociometry Reader, Free Press, 1960.

[2] 西田：ファジィ集合とその応用，森北出版，1978.

[4] Romesburg：Cluster Analysis for Researcher, Life-time Learnig Publication, 1984.

[5] 洲之内，山下，他：Crisp Relation & Fuzzy Relation of Fuzzy Graph, 4th NAFIPS Congress FR－b, 1985.

[6] 柳井：多変量解析ハンドブック，現代数学社，1986.

[7] 山下，森岡： On Global Structure of a Fuzzy Graph Analysis of Fuzzy Information I, CRC Press, 1987.

[8] 津田，勝又，山下：Fuzzy Clustering and Ordering, Int'l Workshop on Fuzzy System Application C－8, 1988.

[9] 山下，勝又，津田：ファジィ理論を応用したソシオメトリー分析，ファジィ学会大会 B1－2，1989.

[10] 山下： Approximation Algorithm of Fuzzy Graph and its Application, 3rd IFSA Congress TH-5, 1989.

[11] 竹谷，森本，岡田：ソシオメトリックテストの測定法と活用法の一提案，教育工学雑誌 Vol.12－4，1989.

[12] 山下，西村，勝又，津田：ファジィグラフを応用したソシオグラム分析，電子情報通信学会技術研究報告 ET 89－109，1989.

[13] 山下，勝又，津田：ファジィグラフの解析と応用，日本数学会秋季大会応用数学 13，1989.

[14] 西村，山下：Sociometric Analysis Applying Fuzzy Theory, 25th ETIC S－67, 1990.

[15] 勝又,山下,津田，西村：Sociogram Analysis Applying Graphs, 9th NAFIPS Congress 4－288, 1990.

[16] 山下，滝沢，西村，勝又，津田：Sociogram Analysis Applying Fuzzy Theory, 22nd Int'l Congress of Applied Psychology PS－22, 1990.

[付録]

$y^n=\Sigma x_i^n/|n|$，$x_1<x_2<\cdots<x_n$ とする．

$n>0$の場合は，

$$y=x_n\sqrt[n]{\{(x_1/x_n)^n+(x_2/x_n)^n+\cdots+1\}}/\sqrt[n]{|n|}$$

より，$n\uparrow+\infty$のとき，$y\uparrow x_n=\mathrm{Max}\{x_i\}$ となる．

$n<0$の場合は，

$$y=x_1\sqrt[n]{\{1+(x_2/x_1)^n+\cdots+(x_n/x_1)^n\}}/\sqrt[n]{|n|}$$

より，$n\downarrow-\infty$のとき，$y\downarrow x_1=\mathrm{Min}\{x_i\}$ となる．

従って，

$$u_{cd}=\Sigma u_{id}/|m|,\quad u_{id}=\Sigma t_{ij}/|n|$$

とすると，

$m, n\uparrow+\infty \rightarrow u_{cd}\uparrow \mathrm{Max}\{t_{ij}\}$

$m, n\downarrow-\infty \rightarrow u_{cd}\downarrow \mathrm{Min}\{t_{ij}\}$

となる．

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FC3-1

ファジィ・ベイズ意思決定法則における一研究

A study on Fuzzy-Bayes decision rule

植村　芳樹
Uemura Yoshiki

奈良工業高等専門学校　情報工学科
Nara national college of technology

We consider Fuzzy-Bayes decision rule under Fuzzy situations that are not orthogonal. It is natural to look upon the state which the decision maker can not imagine as the indifferent state.In order to avoide the risk caused by introducing the concept of the indifferent state,we introduce the concept of the reserved judgement.
We explane the influence of the optimum action by introducing the reserved judgement under the distinction problem.

1．はじめに

実社会における意思決定問題は、多くのあいまいさを持った状況のもとで行われる。確率的決定法としてベイズ決定理論が、ひんぱんに使用されている。状況としてあいまいなものを考えこれをファジィ状況と呼び、この状況のもとで意思決定を行うことが考えられている。田中ら［1］，［2］，［3］は、「状態空間とファジィ状態空間との関係」と「観測空間とファジィ観測空間との関係」において、状態の直和の概念を導入しファジィ状況における意思決定理論（ファジィ・ベイズ決定理論）を定式化した。この直和の概念は、上記関係を表すメンバシップ関数の直交条件に反映される。

本論文では、直和の概念を除去しよりあいまいな状況を考える。このような状況は、意思決定者がファジィ状態を設定する場合に直和ではないけれども、現在わかっているファジィ状態についての意思決定を行いたいような状況である。この場合、設定できるものをファジィ状態とし、設定しきれない部分を無差別(indifferent)状態として意思決定を行おうというものである。この無差別状態における確率については、メンバシップ関数の設定においてある条件を付ければ計算できるが一般には無理である。メンバシップシップ関数を一種の測度関数と見なし、設定されているファジィ状態に対して事前の重みと解釈することでベイズ流の意思決定方法に適用できる。

このあいまいな状況において、意思決定者が設定している行動だけを決定することは、たいへん危険を生じる場合がある。この為、決定に判定保留(reserved judgement)の概念を導入する。

2．ファジィ・ベイズ決定法則

今、ベイズ決定問題を〈S，A，L_1，E，Θ〉によって表すことにする。Sは状態の集合、Aは決定、L_1は損失関数、EはΘ（母数空間)上の事前確率分布である。つぎにファジィ・ベイズ決定問題を〈F，A，L_2，E，Θ〉によって表すことにし、FはΘ上のファジィ状態の集合である。

特にファジィ・ベイズ意思決定問題は、ベイズ意思決定問題における損失関数L_1（a，θ）を決定することが非常に困難であり、一方状態をファジィ化にすることによりファジィ状態と決定との損失関数L_2（a，f）を決定しやすい問題に対して効力を発揮する。

2．1　直和条件下のファジィ・ベイズ決定法則

ファジィ・ベイズ決定法則として次のようなものが、ベイズ決定法則の拡張として考えられてい

る。すなわち、観測値x_jが与えられたときの事後確率は、

$$P(F_k \mid x_j) = \Sigma_i \mu_{Fk}(\theta_i)\, f(x_j \mid \theta_i)\, \pi(\theta_i) / f(x_j)$$

としてあたえられる。ここで、$f(x_j)$はx_jの周辺確率で次のように表される。

$$f(x_j) = \Sigma_i\ f(x_j \mid \theta_i)\, \pi(\theta_i)$$

次にx_jが与えられたときの損失関数値は、上記事後確率を用いて次のように表される。

$$L(a_i \mid x_j) = \Sigma_k L(a_i, f_k)\, P(F_k \mid x_j)$$

各xjにおいて、上記の損失関数値のなかで最小値$L(a^* \mid x_j)$をとるa^*が最適行動となる。

3．無差別（indiffernt）状態の導入

ここでは、直和の概念を除去しよりあいまいな状況を考える。この状況は、設定できるものをファジィ状態とし、設定しきれない部分を無差別状態として意思決定を行おうというものである。

例として、テストの成績の問題について考察する。今、状態θを［0，１００］とし、ファジィ状態F_1を｛点数が上位｝な集合，ファジィ状態F_2を｛点数が下位｝の集合とする。状態θと各ファジィ状態とのメンバシップ関数を各々$\mu_{F1}(\theta)$，$\mu_{F2}(\theta)$とし、図１のように意思決定者によって設定されているとする。

本例について、無差別状態を導入したメンバシップ関数を図１に示す。

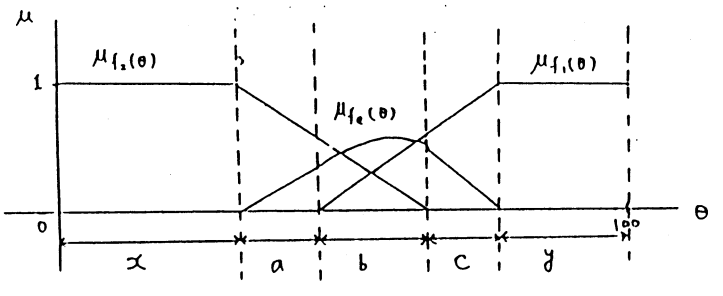


図１　無差別状態のメンバシップ関数

この場合状態空間θのとる値によって、無差別状態の意味付けができる。

図１における区間xと区間yは、$\mu_{F0}(\theta) = 0$であり無差別状態の程度が０である。これは、上位か下位に完全に分離可能であることを示している。区間ａについては、「上位でないことはわかっているが、下位であるか判別できない。」という条件付き無差別状態領域である。区間ｂについては、「上位でも下位でもない。上位か下位か判別できない。」という無差別領域である。区間ｃについては、「下位でないことはわかっているが、上位であるか判別できない。」という条件付き無差別領域である。

４．意思決定方法

メンバシップ関数を一種の測度関数と考える。この場合、ファジィ状態（無差別状態以外）の事前情報は、重みとして解釈され、この重みをW_{1k}とおく。同様に事後情報も、重みとして解釈される。この重みをW_{2k}とする。ここで、無差別状態についての事前情報及び損失は考えないことにする。

さて、このような無差別状態が状態空間θに対する度合が高い場合、意思決定者が設定している行動をとることに危険が生じる場合がある。この為、設定した行動に判定保留という行動を追加してこの危険を回避することを想定する。もちろん全く意思決定者が設定した行動に対して、危険が無い場合はこの判定保留は考えない。

以上のことから、意思決定方法を提案する。この様子を表１に示す。

表１　提案する意思決定法則

事前の重み	ファジィ状態	事後の重み	決定
W_{11}	F_1	W_{21}	
⋮	⋮	⋮	
W_{1i}	F_i	W_{2i}	$L(F_i, d_j)$
⋮	⋮	⋮	
W_{1k}	F_k	W_{2k}	

d_1 … d_j … d_n　d_0

ここで、

①$F_1 \cup \cdots \cup F_k \cup F_e = \Theta$

（ただし、$F_e = \phi$であってもよい）

②$L(F_e, a_j)$　$j = 1, \cdots, k, e$

は考えない。

③$m(F_k) = \mu_{Fk}$　$\mu_{F1} + \cdots + \mu_{Fk} + \mu_{Fe} < \infty$

特に

$\Sigma_k \mu_{Fk}(\theta_i) <= 1$のとき

$P(F_1) + \cdots + P(F_k) + P(F_e) = 1$

④$W_{1k} = \Sigma_i \pi(\theta_i) \mu_{Fk}(\theta_i)$

⑤$W_{2k} = \Sigma_i \mu_{Fk}(\theta_i) P(x_j \mid \theta_i) \pi(\theta_i) / P(x_j)$

⑥　$MIN_i \{L(a_i \mid x_j) = \Sigma_i L(a_i, f_k) W_{2k}\}$ なるa_iを最適行動とする

5．判別問題に対する適用例

ファジィ状態及び行動が、有限点から成る場合を考え、ファジィ状態をF_i（$i = 1, \cdots, n$）行動をa_j（$j = 1, \cdots, n$）とする。観測値$X = x_1$が観測されたとき、行動のどれであるか判別する問題を考える。本論文では、0－1タイプの損失関数の拡張として次の様なものを考える。

$$L(F_i, a_j) = L_{ij},\ i \neq j;\quad i, j = 1, \cdots, n$$

$$0 \qquad i = j$$

ここで、$0 <= L_{ij} <= 1$

また、

$L(F_i, a_e) = L_i$　$i = 1, \cdots, n$

とする。ここで、$0 <= L_i <= 1$

5．1　i，j＝2の場合

次の結果が直ちに導ける。

（i）　$(L_1 / L_{12}) + (L_2 / L_{21}) < 1$のとき、決定ルールは、

$a^* = a_1$　if　$W_{22} / W_{21} < \lambda_1$

$a^* = a_2$　if　$W_{22} / W_{21} > \lambda_2$

$a^* = a_e$　if　$\lambda_1 < W_{22} / W_{21} < \lambda_2$

である。

ここで、

$\lambda_1 = L_1 / (L_{2e} - L_2)$，

$\lambda_2 = (L_{12} - L_1) / L_1$

（ii）　$(L_1 / L_{12}) + (L_2 / L_{21}) => 1$

のとき

$\lambda_1 = \lambda_2 = L_{12} / L_{21}$が成立し、すべての$X$に対して、$a^* = a_e$は存在しない。

ゆえに決定ルールは、

$a^* = a_1$　if　$W_{22} / W_{21} < L_{12} / L_{21}$

$a^* = a_2$　if　$W_{22} / W_{21} > L_{12} / L_{21}$

である。

5．2　数値例

意思決定問題として、テスト結果に基ずく合否の判定問題を考える。状態として、テストの成績の5点刻みの値$\Theta = \{\theta_i\} = \{5, 10, 15, \cdots, 100\}$とし、観測空間としてテスト結果の4点刻みの値$X = \{x_i\} = \{4, 8, 12, \cdots, 96\}$が設定されているものとする。また、$\Theta$上の事前分布Eと条件付分布$f(x_j \mid \theta_i)$は各々表2，表3のように与えられているとする。

ファジィ状態として2つのものを考える。F_1 ＝｛成績が上位｝，F_2＝｛成績が下位｝とする。

状態θとファジィ状態の関係を表すメンバシップ関数は、表4のように与えられている。　次に行動として、a_1＝｛合格｝，a_2＝｛不合格｝，a_e＝｛判定保留｝を考え、ファジィ状態との関係を表す損失関数は、表5のように与えられているとする。

表2　θ上の事前分布E

θ_i	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}
$\pi(\theta_i)$	0.0125	0.0125	0.025	0.025	0.05	0.05	0.0725	0.0725	0.08	0.1	0.1

θ_{12}	θ_{13}	θ_{14}	θ_{15}	θ_{16}	θ_{17}	θ_{18}	θ_{19}	θ_{20}
0.08	0.0725	0.0725	0.05	0.05	0.025	0.025	0.0125	0.0125

表3　条件付確率$f(x_j \mid \theta_i)$

θ_i \ x_j	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	・・・	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}
θ_1	0.1	0.2	0.4	0.2	0.1							
θ_2		0.1	0.2	0.4	0.2	0.1						
・												
・												
・												
θ_{24}									0.1	0.2	0.4	0.2	0.1

表4　損失関数 $L(f_i, a_j)$

	合格 (a_1)	不合格 (a_2)	判定保留 (f_3)
上位 (F_1)	0	0.8	0.2
下位 (F_2)	0.9	0	0.3

表5　例1のメンバシップ関数

θ_i	$\theta_1 \cdots \theta_8$	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	$\theta_{14} \cdots \theta_{18}$
$\mu_{F1}(\theta_i)$	0 … 0	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	0.9	1	1 … 1
$\mu_{F2}(\theta_i)$	1 … 1	1	0.9	0.8	0.7	0.4	0	0	0 … 0

以上の問題について、ファジィ・ベイズ意思決定法則を適用した結果を表6に示す。

表6　計算結果

x_i	W_{12}/W_{11}	$L(a_1 \mid x_i)$	$L(a_2 \mid x_i)$	$L(a_3 \mid x_i)$	最適行動
$x_1 \sim x_8$	∞	0.9	0.0	0.3	a_2
x_9	30.66	0.9	0.025	0.306	a_2
x_{10}	10.54	0.868	0.074	0.314	a_2
x_{11}	4.752	0.858	0.160	0.326	a_2
x_{12}	2.725	0.790	0.257	0.327	a_2
x_{13}	1.655	0.686	0.368	0.321	a_3
x_{14}	0.991	0.545	0.488	0.304	a_3
x_{15}	0.520	0.359	0.603	0.270	a_3
x_{16}	0.206	0.161	0.693	0.220	a_1
x_{17}	0.056	0.048	0.761	0.206	a_1
$x_{18} \sim x_{24}$	0.0	0.0	0.8	0.2	a_1

ここで、$\lambda_1 = 0.333$, $\lambda_2 = 2.000$

この結果より、直和でないファジィ状態についてメンバシップ関数を測度関数とみなすことによりベイズ流の決定ができ、また5．1の結果が適用できることがわかる。

6．おわりに

本論文では、状態をファジィ化する段階でファジィ状態の直和の概念を除去しより一般な問題に取り組んだ。まず、ファジィ状態に分類するときに生じるあいまいな状態について無差別状態の概念を導入した。さらに無差別状態を導入することによる行動の決定に対する危険を回避するため判定保留の概念を導入した。

最後に、このファジィ・ベイズ決定法則を判別問題に適用し、判定保留を伴う0－1タイプの損失関数に対する決定法則を考察した。

7．今後の課題

本論文では、状態と決定との損失関数を設定することが困難な問題について検討した。

このような問題については、ファジィ状態と決定の損失関数表からベイズ流の決定法則の適用を開始する。

今後、ファジィ化する前の状態と決定との損失関数が設定されているとして、ファジィ化することの損失関数の変換に対する意味付けを行っていく予定である。

［謝辞］

本論文を作成するにあたり親切にご指導くださった、神戸商科大学　商経学部　管理科学科　教授　田坂誠男氏に深く感謝する。

［参考文献］

1．浅井喜代治，C．V．ネゴイタ編：あいまいシステム理論入門，オーム社（1978）

2．浅井喜代治（他）編：ファジィシステム理論入門，オーム社（1987）

3．Tanaka,H.,Okuda,T.and Asai,k.:Fuzzy Information and Decision in Statistical Model,Advances in Fuzzy Sets Theory and Applications,eds.Gupta,M,M.,Ragade,R.K.and Yager,R,R.,pp.303-320,North-Holland(1979)

4．Zadeh,L,A.:Probability Measures of Fuzzy Events,journal of Mathematical Analysis and Applications,22,pp421-427 (1968)

5．松原望：意思決定の基礎，朝倉書店（1988）

6．田坂誠男：多重決定の諸問題，神戸商科大学60周年記念論文集

7．植村芳樹：ファジィ・ベイズ意思決定法則の一考察，第6回ファジィOR研究会資料

［連絡先］

奈良県大和郡山市矢田町22（tel 07435-2-5213）

FC3-2

ファジィ関係式の区間値記号解法
Solution of Fuzzy Equation By The Interval Method

韓　生廉　関口　隆
Sheng Lian Han and Takashi SEkiguchi
横浜国立大学工学部電子情報工学科
Division of Electrical and Computer Engineering, Yokohama National University

Abstract : Fuzzy relatoin eqations were firstly proposed by Sanchez in 1976. Aafter this , Various researchers have proposed different method of solution. In this paper , based on the method of solution defined by Tsukamoto and Tashiro , we propose the Interval method, to the cases of this Tsukamoto method when the matrix W becomes empty set or among the various solutions , one of the solutions is contained in another, we introduce a greater/less comparision Sign to a matrix.
The proposed Interval method efficiently gives solution of the equations. In addition , by examining the matrix of signs, if is possible to determine The existace or non-existance of solutions.

1. はじめに

１９７６年Sanchezは，ファジィ関係Ｐ⊂Ｘ×Ｙ，Ｑ⊂Ｘ×Ｚが与えられたとき，つぎようなｍａｘ・ｍｉｎ合成演算ＲｏＰ＝Ｑを満足するファジィ関係Ｒ⊂Ｘ×Ｚを考え，これに対する解法を与えた[1]．その後，多くの研究者によって，ファジィ関係式の解法に関する報告がなされた．[2)-7)]

本論文は，塚本らの解法を基にするものである．塚本法により求められたｋ個のｍ×ｎ行列$W^k=\{w^k_{ij}\}$のうち，空集合となるＷがあり，ある解が他の解に包含される場合があることに対して，ここではまず，大小を比較する記号を行列に導入する．つぎに，規定されたルールに基づいてその記号行列から区間値行列Ｗへ転換することにより，ファジィ関係式の解を効率よく求められることを示す．さらに，記号行列の性質によりファジィ関係式解の存在性をわかりやすく判別できることを示す．

2. 数学的準備

ファジィ関係式

$$A \circ R = B \qquad (2\text{-}1)$$

ただし，$A=(a_1 \ldots a_m)$，$B=(b_1 \ldots b_n)$，

$R=(r_{ij} \mid i=1,\ldots,m, j=1,\ldots,n)$

において，ファジィ集合Ｂおよびファジィ関係Ｒの要素が[0,1]区間の１つの数値として与えられたとき，ＡｏＲ＝Ｂを満足するすべてのファジィ集合Ａを求める方法をファジィ関係式の解法，あるいはファジィ関係の逆問題と呼ぶ．

ここでは，次のようなファジィ関係式

$$\begin{bmatrix} r_{11} \ldots r_{1n} \\ \ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots \\ r_{m1} \ldots r_{mn} \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ . \\ . \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ . \\ . \\ b_m \end{bmatrix} \qquad (2\text{-}2)$$

を考える．

[定義2-1]：

ファジィ関係式(2-2)の行列Ｒはすでに

$b_1 \geq b_2 \geq \ldots b_i \geq b_j \geq \ldots \geq b_n$

のように各行を並べたとする．ｍ×ｎ記号行列$T=[t_{ij}]$ $(i=1,\ldots,m,\ j=1,\ldots,n)$の要素$t_{ij}$をつぎのように定める．

1) $r_{ij} > b_i$ ならば，t_{ij} = ‘＞’

2) $r_{ij} = b_i$ ならば，t_{ij} = ‘＝’

3) $r_{ij} < b_i$ ならば，t_{ij} = ‘＜’

ただし，‘＝’は定義することを意味する．

[定義2-2]：

$b_i \in B$を[0,1]区間の実数値とする．記号行列のＴから区間値行列Ｗへ転換するとき，

‘＞’，‘＝’および‘＜’をそれぞれつぎのような区間値となる．

1) ‘＞’ = $\begin{bmatrix} b_i \\ \\ [0, b_i] \end{bmatrix}$

2) ‘＝’ = $\begin{bmatrix} [b_i, 1] \\ \\ [0, 1] \end{bmatrix}$

3) ‘＜’ = [0,1]

3. 区間値記号法

区間値記号というのは，用いられる各記号は，すべて[0,1]区間の区間値[ｐ，ｑ](0≦ｐ≦ｑ≦1)であることをいう．

3.1. 区間値記号法のアルゴリズムとその説明

(1) $b_1 \geq b_2 \geq \ldots \geq bi \geq bj \geq \ldots \geq b_n$の順にｍ×ｎ行列Ｒの各行を入れ換える．

(2)[定義2-1]により，ファジィ関係式(2-2)のｍ×ｎ記号行列Ｔを定める．

(3) 記号行列Ｔについて，下記の3.2節に示すルールの順位に従って，ｍ×ｎ区間値行列Ｗを定める．

(4) [定義2-2] に基づいて，求められた各区間値行列の各列について積集合を求めることにより(2-2)の解A^kを求める．

$A^k=\{a_1^k,\ldots,a_n^k\}$，

$a^k_j = \bigwedge_i w_{ij}$

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

ｋはファジィ関係式(2-2)の解の数である．

3.2. ルール

[ルール1]：

$b_i > b_p$とする．記号行列Ｔの要素t_{pk}は

t_{pk} = ‘＞’ ならば，

(a) $\forall i \in I$，$w_{ik}=[0, b_i]$

$\forall j \in J$，$w_{jk}=[0,1]$ と定め，

(b) 第i行と第j行の他の‘＞’と‘＝’について，1つだけをb_iあるいは$[b_i, 1]$と定め，他のすべてを[0,bi]あるいは[0,1]と定める．ただし，

$I=\{i \mid t_{ik}=\text{‘＞’}, i<p\}$

$J=\{j \mid t_{jk}=\text{‘＝’}, j<p\}$ である．

※ t_{pk} = ‘＞’ となるときに，もし，行列Ｗの要素w_{ik}, w_{jk}を$w_{ik}=b_i, w_{jk}=[b_j, 1]$ と定めると，w_{pk}はどんな値を取っても，

$b_p<b_i$ および $b_p<b_j$により，i についてのw_{ik}の積集合

$\bigwedge_i w_{ik}=\phi$ (空集合)

$i=1,2,..,m$

となるので，w_{ik}とw_{jk}をそれぞれ$w_{ik}=[0,b_i]$, $w_{jk}=[0,1]$と定めることにする．

(b)のように定めるのは，つぎファジィ関係連立方程式

$$\begin{cases} r_{ik}\wedge a_k=b_i & (1)\\ r_{i1}\wedge a_1\leq b_i,\ldots,r_{in}\wedge a_n\leq b_i & (2)\\ r_{ik}=b_i \quad or \quad r_{ik}=[b_i,1] & (3)\end{cases}$$

を解くことに相当するからである．

[ルール2]：

$\exists k\in\{1,2,\ldots,n\}$

$j\neq k, t_{ij}=$ ‘<’ , $j=k, t_{ij}=$ ‘>’

となるとき，Wの要素w_{ik}を $w_{ik}=b_i$

と定める．

※ ファジイ関係式(2-2)の第i個方程式

$\bigvee(r_{i1}\wedge a_1\ldots r_{in}\wedge a_n)=b_i$ (2-2-1)

について，

$r_{ij}<b_i, r_{ik}>b_i, k\neq j$

ならば，連立方程式

$$\begin{cases} r_{ij}\wedge a_j=b_i \\ \quad j \\ r_{ij}<b_i\end{cases}$$

は解が存在しないので，(2-2-1)の解は，

$r_{ik}\wedge a_k=b_i$

の解である．これは$w_{ik}=b_i$となる．

[ルール3]：

$\exists k\in\{1,2,\ldots,n\}$, $j\neq k, t_{ij}=$ ‘<’

$j=k, t_{ij}=$ ‘=’ となるとき，Wの要素w_{ik}を

$w_{ik}=[b_i,1]$ と定める．

※ 説明はルール２の説明と同じなので，ここで略す．

[ルール4]：

$b_i>b_p$とする．上記のルールにより，

$\exists k\in\{1,2,\ldots,n\}$, $w_{ik}=b_i$ or $w_{ik}=[b_i,1]$

と定めたとき，

$\forall p\in P$, $w_{pk}=[b_p,1]$ と定め，ただし，

$P=\{p\mid t_{pk}=$ ‘=’ , $p>i\}$

である．または $j\neq k$, $t_{pj}=$ ‘=’ ならば， $w_{pj}=[0,1]$

と定め， $t_{pj}=$ ‘>’ ならば， $w_{pj}=[b_p,1]$と定める．

※ $w_{ik}=[b_i,1]$ と定めたとする．

$t_{pk}=$ ‘=’ により，

$w_{pk}=[b_p,1]$と定めると，Wの第ｋ列要素の 積集合a_kは，

$a_k=\bigwedge_i w_{ik}$,

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

によって求めるので，$a_k\subseteq[b_i,1]$ならば，必ず$a_k\subseteq[b_p,1]$が成立する．同様に，$w_{ik}=b_i$と定めたとすると，$t_{pk}=$ ‘=’ により$w_{pk}=[b_p,1]$と定めると，W第ｋ列要素の積集合a_kは$a_k\subseteq b_i$ならば，必ず$a_k\subseteq[b_p,1]$が成立する．

またはWの第p行について，

$w_{pk}=[b_p,1]$となったとき，$w_{pj}=[0,1]$(あるいは$[0,b_p]$)と定めるのは，次のようなファジィ関係連立方程式

$$\begin{cases} r_{pk}\wedge a_k=b_p\\ r_{p1}\wedge a_1\leq b_p,\ldots,r_{pn}\wedge a_{pn}\leq b_p\\ r_{pk}=b_p\end{cases}$$

を解くことに相当するからである．

[ルール5]：

$b_i>b_p$とする． $w_{ik}=[0,1]$ or $w_{ik}=[0,b_i]$

ならば， $\forall p\in P$, $w_{pk}=[0,1]$と定める．ただし，

$P=\{p\mid t_{pk}=$ ‘=’ , $p>i\}$ である．

※ $w_{ik}=[0,1]$ or $w_{ik}=[0,b_i]$ と定めた場合に，Wの第k列の積集合 a_kは， $a_k\subseteq[0,1]$ or $a_k\subseteq[0,b_i]$となる．このとき，もし $w_{pk}=b_p$と定めると，Wの第k列の積集合a_kは必ず

$a_k\subseteq[0,1]$ or $a_k\subseteq[0,b_i]$ を満足する．

[ルール6]：

$b_i=b_p=b_h$とする．上記のルールにより，

$w_{ik}=b_i$ or $w_{ik}=[b_i,1]$ となるときに，

$\forall p\in P, w_{pk}=[b_p,1]$と定め， $\forall h\in H$, $w_{hk}=b_h$ と定める．

ただし， $P=\{p\mid t_{pk}=$ ‘=’ , $p>i\}$

$H=\{h\mid t_{hk}=$ ‘>’ , $q>i\}$

である．

※ $w_{ik}=[b_i,1]$ or $w_{ik}=b_i$と定めた場合に，Wの第ｋ列要素の積集合a_kは， $a_k\subseteq[b_i,1]$ or $a_k\subseteq b_i$ ならば，

$b_i=b_p=b_h$により，

$a_k\in[b_p,1]$ or $a_k\in b_p$

$a_k\in[b_h,1]$ or $a_k\in b_h$

が満たされるので，

$w_{pk}=[b_p,1]$ or $w_{hk}=b_h$

と定める．

[ルール7]：

$\exists k\in\{1,2,\ldots,n\}$

$w_{ik}=b_i$ or $w_{ik}=[b_i,1]$

と定めたとする．

$\forall p\in P, \forall q\in Q$, $w_{ip}=[0,b_i]$ or $w_{iq}=[0,1]$

と定める．ただし，

$P=\{p\mid t_{ip}=$ ‘>’ , $p\neq k\}$

$Q=\{q\mid t_{iq}=$ ‘=’ , $q\neq k\}$

※ 説明は[ルール4]の説明と同じなので，略す．

[ルール8]

Wのある第i行について，上記のルールで定められない要素w_{ik}がｃ個あるとする．

$k\in\{1,2,\ldots,n\}$．このとき，k について

$w_{ik}=b_i$ or $w_{ik}=[b_i,1]$と定め，

$\forall p\in P$, $w_{ip}=[0,b_i]$ と定め，

$\forall q\in Q$, $w_{iq}=[0,1]$と定めるようにｃ個区間値行列$W_i{}^c$が求められる(ｃは第i行の未定の ‘>’ と ‘=’ の数である)．

※ 以上のように設定するのは，つぎのファジィ関係連立方程式

$$\begin{cases} r_{ij}\ \ a_j=b_i\\ r_{i1}\ \ a_1\leq b_1,\ldots,r_{ir}\ \ a_r\leq b_1\ldots,\\ r_{ij}>b_i\ (or\ r_{ij}=b_i)\end{cases}$$

を解くことに相当するからである．

3.3.記号行列の性質

3.3.1. 記号行列Ｔとその性質

記号行列Ｔは[定義2-1]により定められたつぎのようなｍ×ｎ行列である．

$$T=\begin{bmatrix} t_{11}\ t_{12}\ \ldots t_{1n}\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\\ t_{m1}\ t_{m2}\ldots t_{mn}\end{bmatrix}$$

$$t_{ij}=\begin{cases} \text{‘>’}, & r_{ij}>b_i\\ \text{‘=’}, & r_{ij}<b_i\\ \text{‘<’}, & r_{ij}=b_i\end{cases}$$

性質１：

ファジィ関係式(2-2)の記号行列Ｔについて

$\exists i\in\{1,2,\ldots,m\}$, $\forall j\in\{1,2,\ldots,n\}$

$t_{ij}\Rightarrow$ ‘<’ ならば，(2-2)の解は存在しない．

仮に，解が存在し，それらの１つを

$A_i=(a^i{}_1\ a^i{}_2\ \ldots\ a^i{}_n)^T$ とする．

$r_{ij}<a^i{}_j$ならば，$r_{ij}\wedge a^i{}_j=r_{ij}$

$r_{ij}>a^i{}_j$ならば，$r_{ij}\wedge a^i{}_j=a^i{}_j$

$t_{ij}=$ '<' により, $r_{ij}<b_i$,

$$\bigvee_j (r_{ij}\wedge a^i_j) < b_i$$

となるので,

$$\bigvee_j (r_{ij}\wedge a^i_j) = b_i$$

が成立できない.このことは解が存在するという仮定と矛盾が生じたので,ファジィ関係式(2-2)の解存在しない.

性質２：

$b_i>b_p$とする.ファジィ関係式(2-2)の記号行列Tについて $\exists k\in\{1,2,...,n\}$, $j\neq k$, $t_{ij}=$ '<', $j=k$, $t_{ij}=$ '>' となったとき,$p>i$ようなt_{pk}は, $t_{pk}=$ '>' ならば,ファジィ関係式(2-2)の解は存在しない.

仮に,解が存在し,それらの１つを

$A_i=(a^i_1\ a^i_2\ ...\ a^i_n)^T$ とする.

t_{ik}は '>', t_{ij}は '<' となったとき, $r_{ik}>b_i$, $r_{ij}<b_i$ である.

$$\bigvee_j (r_{ij}\wedge a^i_j) = b_i$$

を満足するようなa^i_jは $a^i_j=b_i$となる. しかし, $t_{pj}=$ '>' により

$$\bigvee_j (r_{pj}\wedge a^i_j) = b_p$$

が成立できないので,(2-2)の解は存在しない.

性質３：

$b_i>b_p$とする.ファジィ関係式(2-2)の記号行列Tについて

$\exists k\in\{1,2,...,n\}$, $j\neq k$, $t_{ij}=$ '<', $j=k$, $t_{ij}=$ '=' となったとき,$p>i$ようなt_{pk}は, $t_{pk}=$ '>' ならば,(2-2)の解は存在しない.

※説明は性質２の説明と同じなので,これを略す.

3.3.2. 区間値行列Wの性質

区間値行列Wは,つぎのようなm×n行列である.

$$W^c=\begin{bmatrix} w^c_{11} & w^c_{12} & \cdots & w^c_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ w^c_{m1} & w^c_{m2} & \cdots & w^c_{mn} \end{bmatrix}$$

$$w_{ij}=\begin{cases} b_i \\ [0,b_i] \\ [b_i,1] \\ [0,1] \end{cases}$$

cは整数で(2-2)の解の個数である.

性質４：

区間値記号法で求められたk個解は互いに包含されない.

※簡単のために行列Wのある第i行の未定の要　素が２つがあるとする.ルール８に基づいて,行列W^1とW^2が求められる.

A_1とA_2をそれぞれ行列W^1とW^2から求められたファジィ関係式(2-1)の解とし,かつ$A_1\subset A_2$と仮定する.

ルール８によりW^1とW^2は３つの状態が可能となる.

それらを行列で表すと,つぎのようになる.

1°　$w_{ij}{}^1=b_i$,　$w_{ik}{}^1=[0,b_i]$

$w_{ij}{}^2=[0,b_i]$, $w_{ik}{}^2=b^i$

$$W^1=\begin{bmatrix} \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots\ b_i & \cdots\ [0,b_i] & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix}\begin{matrix} \cdot \\ \cdot \\ b_i \\ \cdot \\ \cdot \end{matrix}$$

（列：j　k）

$$W^2=\begin{bmatrix} \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdot\ [0,b_i] & \cdots\ b_i & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix}\begin{matrix} \cdot \\ \cdot \\ b_i \\ \\ \end{matrix}$$

2°　$w_{ij}{}^1=b_i$,　$w_{ik}{}^1=[0,1]$

$w_{ij}{}^2=[0,b_i]$, $w_{ik}{}^2=[b_i,1]$

（列：j　k）

$$W^1=\begin{bmatrix} \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots\ b_i & \cdots\ [0,1] & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix}\begin{matrix} \cdot \\ \cdot \\ b_i \\ \cdot \\ \cdot \end{matrix}$$

$$W^2=\begin{bmatrix} \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots\ [0,b_i] & \cdot\ [b_i,1] & \cdot \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix}\begin{matrix} \cdot \\ \cdot \\ b_i \\ \\ \end{matrix}$$

3°　$w_{ij}{}^1=[b_i,1]$, $w_{ik}{}^1=[0,1]$

$w_{ij}{}^2=[0,1]$,　$w_{ik}{}^2=[b_i,1]$

（列：j　k）

$$W^1=\begin{bmatrix} \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots\ [b_i,1] & \cdot\ [0,1] & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix}\begin{matrix} \cdot \\ \cdot \\ b_i \\ \cdot \\ \cdot \end{matrix}$$

$$W^2=\begin{bmatrix} \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots\ [0,1] & \cdots\ [b_i,1] & \cdot \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix}\begin{matrix} \cdot \\ \cdot \\ b_i \\ \\ \end{matrix}$$

※ 1° について説明する.各ルールにより,$p<i$ ような t_{ij}, t_{ik}は

$t_{ij}=$ '>'　or　$t_{ik}=$ '='

ならば,必ず w_{ij}, w_{ik}は

$w_{ij}=[0,b_i]$　or　$w_{ik}=[0,1]$

と定め,$q<i$ ような t_{ij}, t_{ik}は '>' が存在しない.

$t_{ij}=$ '='　or　$t_{ik}=$ '='

ならば,必ず w_{ij}, w_{ik}は

$w_{ij}=[0,1]$　or　$w_{ik}=[0,1]$

と定める.

W^1, W^2の第j列と第k列の積集合をそれぞれ $a^1{}_j$, $a^1{}_k$, $a^2{}_j$, $a^2{}_k$とすると, $a^1{}_j=b_i$, $a^1{}_k=[b_i,1]$, $a^2{}_j=[b_i,1]$, $a^2{}_k=b_i$ となる.すなわち, $a^1{}_j\subset a^2{}_j$, $a^1{}_k\subset a^2{}_k$. これは, $A_1\subset A_2$という仮定と矛盾が生じたので, $A_1\subset A_2$が不可能である.

2° と3° の説明は1° とだいたい同じなので,ここでは略すことにする.

４.考察

ここでは,簡単な数値例を取り上げる.

$$\begin{vmatrix} 0.7 & 0.6 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.5 \\ 0.3 & 0.4 & 0.1 \end{vmatrix} \circ \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.6 \\ 0.4 \\ 0.3 \end{vmatrix}$$

定義により記号行列Ｔはつぎのようになる.

$$T=\begin{vmatrix} > & = & < \\ = & < & > \\ = & > & < \end{vmatrix}$$

となる．つぎは上記のルールに基づいて，行列W^cを求める．

ルール１により，$w_{12}=[0,b_i]$，

ルール６により，$w_{11}=b_i$，

ルール４により，$w_{21}=[b_i,1]$

$w_{31}=[b_i,1]$

ルール６により，$w_{23}=[0,b_i]$

$w_{32}=[0,1]$

となり，したがって，W^cは

$$W^c=\begin{bmatrix} b_i & [0,1] & [0,1] \\ [b_i,1][0,1] & & [0,b_i] \\ [b_i,1][0,b_i] & [0,1] & \end{bmatrix}$$

となる．解Ａは

$$A=\begin{bmatrix} 0.6 & [0,1] & [0,1] \\ [0.4,1] & [0,1] & [0,0.4] \\ [0.3,1] & [0,0.3] & [0,0.4] \end{bmatrix}$$

各列の積集合を求めると，

Ａ＝(0.6,[0,0.3],[0,0.4]) となる．

この例を塚本法で求めると，

$$U=\begin{vmatrix} 0.7\omega 0.6 & 0.4\omega 0.4 & 0.3\omega 0.3 \\ 0.6\omega 0.6 & 0.2\omega 0.4 & 0.4\omega 0.3 \\ 0\ \omega 0.6 & 0.5\omega 0.4 & 0.1\omega 0.3 \end{vmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix} 0.6 & [0.4,1] & [0.3,1] \\ [0.6,1] & \phi & 0.3 \\ \phi & 0.4 & \phi \end{bmatrix}$$

$$V=\begin{vmatrix} 0.7\omega 0.6 & 0.4\omega 0.4 & 0.3\omega 0.3 \\ 0.6\omega 0.6 & 0.2\omega 0.4 & 0.4\omega 0.3 \\ 0\ \omega 0.6 & 0.5\omega 0.4 & 0.1\omega 0.3 \end{vmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix} [0,0.6] & [0,1] & [0,1] \\ [0,1] & [0,1] & [0,0.3] \\ [0,1] & [0,0.4] & [0,1] \end{bmatrix}$$

$W^{111}=$

$$\begin{bmatrix} 0.6 & [0.4,1] & [0.3,1] \\ [0,1] & [0,1] & [0,0.3] \\ [0,1] & [0,0.4] & [0,1] \end{bmatrix}$$

$\rightarrow$(0.6,[0,0.3],[0,0.4])

$W^{112}=$

$$\begin{bmatrix} 0.6 & [0.4,1] & [0,1] \\ [0,1] & [0,1] & 0.3 \\ [0,1] & [0,0.4] & [0,1] \end{bmatrix}$$

$\rightarrow$(0.6,0.3,[0,0.4])

$W^{131}=$

$$\begin{bmatrix} 0.6 & [0,1] & [0.3,1] \\ [0,1] & [0,1] & [0,0.3] \\ [0,1] & 0.4 & [0,1] \end{bmatrix}$$

$\rightarrow$(0.6,[0,0.3],0.4)

$W^{132}=$

$$\begin{bmatrix} 0.6 & [0,1] & [0,1] \\ [0,1] & [0,1] & 0.3 \\ [0,1] & 0.4 & [0,1] \end{bmatrix}$$

$\rightarrow$(0.6,0.3,0.4)

$W^{211}=\phi$，$W^{212}=\phi$，

$W^{231}=\phi$，$W^{232}=\phi$．

ここでは，行列Ｕの第１，２，３列のϕでない要素の数はそれぞれ２であるので，Ｗの個数ｋは

ｋ＝２×２×２＝８．

である．各Ｗはつぎのような関係

$W^{111}\supset W^{112}$，$W^{111}\supset W^{131}\supset W^{132}$

があるので，解Ａは

Ａ＝W^{111}

＝(0.6,[0,0.3],[0,0.4])

となる．

１つ１つの解を示す必要はない場合に対して，本解法はより簡単なものとなるといえる．特に，Ｔからより直観的にファジィ関係式(2-2)の解の存在性を判別することができる．

５．おわりに

本提案ではファジィ関係式の解法の１つアルゴリズムを示しただけでなく，記号行列により直観的にファジィ関係式の解の存在性を判断することを示した．この解法は(5-1)のようなファジィ関係式

$$\begin{bmatrix} r_{11}\cdots r_{1n} \\ \cdots\cdots \\ \cdots\cdots \\ r_{m1}\cdots r_{mn} \end{bmatrix}\circ\begin{bmatrix} a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ a_n \end{bmatrix}=[B]$$

$$[B]=\begin{bmatrix} [b^1{}_1,b^1{}_2] \\ \cdot \\ \cdot \\ [b^m{}_1,b_{m2}] \end{bmatrix}$$

の解法へ容易に拡張することができる．

参考文献：

1) E.Sanchez:Resolution of composite fuzzy relation equations,information and control,30,pp. 38-48 (1976).

2) 塚本，田代:Fuzzy逆問題の解法，計測自動制御学会論文集，第15巻，第1号 pp.21-25 (昭和54年2月).

3) C.P.Pappis,M.Sugeno:Fuzzy Relational Equations and The Inverse Problem. Fuzzy Sets and System 15,pp 79-90(1985)

4) 多項形の一般化合成Fuzzy関係式の単項形への等か変換．計測自動制御学会論文集．18,11,pp 1086-1092(1982).

5) 大里，関口:凸結合されたSup・min inf・max合成Fuzzy関係式の解法．計測自動制御学会論文集19,3,pp 212-219 (1983).

6) M. Higashi, G. J. Klir : Resolution of Finit Fuzzy Relation Equations. Fuzzy Sets and System. 13 pp 65-82 (1984).

7) M.Miyakoshi,M.Shimbo:Lower Solutions of Systems of Fuzzy Equations. Fuzzy Sets and System 19 pp 37-46 (1986).

横浜国立大学工学部電子情報工学科
関々研究室
(横浜市保土ヶ谷区常盤台156)

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FC3-3

意志決定問題におけるファジイ測度の非加法性に関する考察

A Study of Non-additivity of Fuzzy Measure in case of Decision Making Problem

松下　裕　　勝倉　裕　　大江守之
Yutaka Matsushita　Hiroshi Katukura　Moriyuki Oe
清水建設　大崎研究室
Ohsaki Research Institute of Shimizu Corporation

Abstract

In this paper , we define the overlapping coefficient ξ as a parameter measuring the degree of non-additivity of fuzzy measures , which is especially decomposable measures based on t-conorm . The parameter ξ is represented as the rate of overlapping interval of a fuzzy measure in subadditivity and of the complementary in superadditivity so that ξ may be used as a measure in both cases of non-additivity , By applying the parameter ξ to a concrete decision making problem , we may evaluate the character of a decision-maker's preference structure quantitatively and discuss whether evaluation category is well-chosen or not.

1. はじめに

ファジイ測度は、単調性のみが仮定された測度であり、曖昧な対象に対して評価、判断を行うとき有効となる。意志決定問題においてファジイ測度は主観的な重視度として用いられており、その非加法性は意志決定者の選好構造を適切に表現している。すなわち、優加法性や劣加法性が、意志決定時の必ずしも加法的とは限らない評価合成過程を捉えている。従って、優加法性や劣加法性の程度を計量できる尺度があれば、これにより選好構造の特性を説明できると考えられる。

本稿では、このような性質を示すファジイ測度のうち代数的考察が行いやすいと考えられる分解可能測度[1]を対象とし、非加法性の程度を計量する尺度(重複係数)を定義する。このとき、重複係数は劣加法性および優加法性の程度を統一的に計量できる必要があるので、劣加法性についてはファジイ測度の、優加法性についてはその補成分の重複区間に注目して定義する。以上の数学的な考察を踏まえた上で、重複係数を用いて意志決定者の選好構造の特性を評価するとともに、意志決定問題において本質的である評価項目の設定の妥当性についても検討する。

2. 分解可能測度

本稿で対象とする分解可能測度とは、非加法性をt-conormと呼ばれる演算子⊥によって次式のように表現されたファジイ測度である[1]。

$A\cap B=\varnothing$のとき、

$$g(A\cup B)=g(A)\perp g(B) \tag{1}$$

ここに、t-conorm⊥は[0,1]上の2項演算であり、加法を一般な形に拡張したものと解釈できる。

t-conorm⊥は、以下の性質を満たすとき、アルキメデス的と呼ばれる。

(i)　⊥は、[0,1]×[0,1]上で連続

(ii)　⊥は、(0,1)上の任意のaに対して$a\perp a>a$

更に、アルキメデス的なt-conorm⊥が、以下を満たすときstrictと呼ばれる。

(iii)　⊥は、(0,1)×(0,1)上で狭義単調増加

⊥が、アルキメデス的なt-conormであるならば、狭義単調増加で連続な関数$t:[0,1]\rightarrow[0,\infty]$が存在し、以下のように表現される。

$$a\perp b=t^{(-1)}(t(a)+t(b)) \tag{2}$$

ここに、$t^{(-1)}$はpseudo-inverseであり,

$$\begin{cases} t^{(-1)}(y)=t^{-1}(y) & y\leqq t(1)\text{のとき} \\ t^{(-1)}(y)=1 & y>t(1)\text{のとき} \end{cases} \tag{3}$$

である。⊥がstrictならば、$t(1)=\infty$となる。また、(2)式のtは⊥の生成関数と呼ばれる。

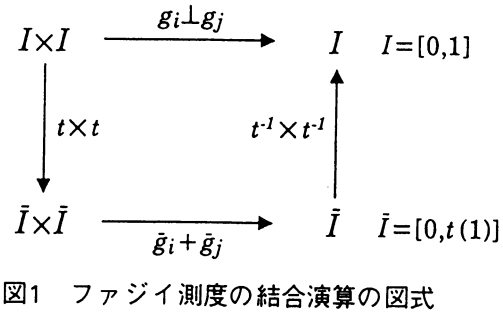


図1　ファジイ測度の結合演算の図式

⊥がstrictである場合および$t(a)+t(b)\leqq 1$の場合には、(2)式は$a\perp b=t^{-1}(t(a)+t(b))$と表され、図1に示す可換な図式が成り立つ。従って、生成関数tは同型写像となる。

菅野のファジイ測度[2]もアルキメデス的な分解可能測度であり、$t(a)+t(b)\leqq 1$のときt-conormを用いて表現すれば⊥およびtは以下のようになる。

$$a\perp b=\min(a+b+\lambda ab,\ 1),\ \lambda>-1 \tag{4}$$

$$\begin{cases} t(x)=1/\lambda\cdot\ln(1+\lambda x) \\ t^{-1}(\bar{x})=1/\lambda\cdot(\exp\lambda\bar{x}-1) \end{cases} \tag{5}$$

以下では、特にアルキメデス的なt-conormで表現され$t(a)+t(b)\leqq 1$を満たすものを考察の対象にする。

3. 重 複 係 数 ξ

3.1 菅野のファジイ測度

菅野のファジイ測度は、$A\cap B=\varnothing$のとき

$$g(A\cup B)=g(A)+g(B)+\lambda\cdot g(A)g(B) \tag{6}$$

で定義される[2]。ここにλは、$-1<\lambda<\infty$であり負で劣加法性を正で優加法性を示すが、区間が正負で$(-1,0)$と$(0,\infty)$であるため劣加法性、優加法性の程度の統一的な尺度とは考えにくい。以下では、これらの程度を統一的な尺度で評価することを考える。

$\lambda<0$のとき、劣加法性の程度を図3に示すようにファジイ測度の重複部分で評価する。このとき、$-\lambda\cdot g(A)$を考えると(6)式より以下のようになる。

$$-\lambda\cdot g(A)=\gamma_0/(\gamma_0+\gamma_2) \tag{7}$$

従って、$-\lambda\cdot g(A)$は補集合$\bar{A}$のファジイ測度$g(\bar{A})$に対する$g(A)$と$g(\bar{A})$の重複区間の比率を示す。

$\lambda>0$のとき、集合Aを計量する測度として$g(A)$の代わりに、以下のように補集合$\bar{A}$の補で考える。

$$g^*(A)=1-g(\bar{A}) \tag{8}$$

そうすれば優加法性の程度は、図4に示すようにファジイ測度$g^*(A)$の重複部分で説明できる。なお、(6)式に対応する式として、$g^*(A)$については次式が成り立ち$g(A)$と同様の形の式となる。

$$g^*(A\cup B)=g^*(A)+g^*(B)+\mu\cdot g^*(A)g^*(B) \tag{9}$$

ここに、$\mu=-\lambda/(\lambda+1)$

従って、$\lambda>0$のとき、μを考えれば$-1<\mu<0$となり優加法性の程度を、$\lambda<0$のときのλの値と対応づけて評価できる。そこで、$\lambda<0$の場合と同様に$-\mu\cdot g^*(A)$を考えれば(9)式より以下のようになる。

$$-\mu\cdot g^*(A)=\gamma_3/(\gamma_3+\gamma_2) \tag{10}$$

従って、補集合$\bar{A}$の$g^*(\bar{A})$に対する$g^*(A)$と$g^*(\bar{A})$の重複区間の比率を示す。

【定義3.1】 重複係数ξを以下のように定義すれば

$$\begin{cases} \xi=-\lambda\cdot g(A) & (\lambda<0) \\ \xi=-(-\mu\cdot g^*(A)) & (\lambda>0) \end{cases} \tag{11}$$

正で劣加法性を、負で優加法性を意味し、しかも$|\xi|<1$となるので、その程度を規格化された尺度で扱える可能性がある。

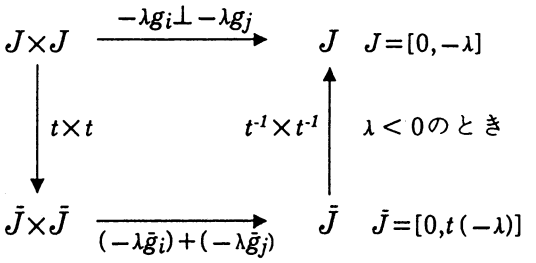


図2 $-\lambda g(A)$の結合演算の図式

【命題3.1】 重複係数ξの結合演算をt-conormで評価すれば、図2に示す可換な図式が成り立つ。従って、このときのt-conormは確率和$(=a+b-ab)$となる。

(証明) 図1の図式より、$\lambda<0$のとき、

$\bar{g}_1=1/\lambda\cdot\ln(1+\lambda g_1)$であるから

$-\lambda\bar{g}_1=-\ln(1-(-\lambda g_1))$となる。

また、$g_1\perp g_2=1/\lambda\cdot(\exp(\lambda\bar{g}_1+\lambda\bar{g}_2)-1)$より

$-\lambda\cdot(g_1\perp g_2)=1-\exp\{-((-\lambda\bar{g}_1)+(-\lambda\bar{g}_2))\}$

従って、準同型写像は以下のようになる。

$t(x)=-\ln(1-x)$

$t^{-1}(\bar{x})=1-\exp(-\bar{x})$

$\lambda>0$についてもμを用いれば同様である。 ■

以上の証明において$t^{-1}(\bar{x})$は、ポアソン過程の超過確率に対応していることから、重複係数ξは確率測度に近い概念を有していることが類推される。

3.2 分解可能測度

以下では、菅野のファジイ測度以外の分解可能測度についても重複係数を定義することを検討する。

Weber[1]は、測度の補の成分として次式に示すconjugateとcomplementを扱っており,

$$a^*=1-a \tag{12}$$

$$a'=1\doteq a \tag{13}$$

ここに、$1\doteq a=t^{-1}(t(1)-t(a))$である。

対応するファジイ測度$g^*(A)$、$g'(A)$を(8)式および(14)式で定義している。

$$g'(A)=1\doteq g(\bar{A}) \tag{14}$$

conjugateは加法性を満たす測度(確率測度)の場合の補、complementはt-conormを用いて加法を拡張した場合の補と考えられる。

これらの補成分は、以下の性質を持つ[1]。

$t\circ g(A)+t\circ g(\bar{A}) \leqq t(1)$ならば、

(i) $g(\bar{A}) = (g(A))'$

(ii) g:⊥分解可能 $\Leftrightarrow$ g^*:(⊥')*分解可能

ここに、$\perp^*(a,b)=1-\perp(1-a,1-b)$

$\perp'(a,b)=(\perp(a',b'))'$である。

(i)より$(g(A))' = g'(\bar{A})$であるから$g = g'$となり、ファジイ測度gとそのcomplementな測度g'は等しい。なお、(i)を満たすファジイ測度を擬似確率測度と呼ぶこともある[3]。また、(ii)より、劣加法性の程度をgに注目するならば、優加法性の程度はg^*の重複区間に注目して評価できる。図3、4に示すように、conjugateとcomplementによりファジイ測度を区間に区切れば、A、$\bar{A}$の区間およびAと$\bar{A}$の重複区間として加法性を満たす測度に分解できる[4]。例えば、劣加法性の場合、重複区間は以下のようになる。

$$\begin{aligned} g(A)+g(\bar{A})-\{g(A)\perp g(\bar{A})\} &= g(A)+g(\bar{A})-1 \\ &= g(\bar{A})-(1-g(A)) \\ &= g(\bar{A})-g^*(\bar{A}) \end{aligned}$$

これを$\bar{A}$の区間に対する重複区間の比率という意味にするため、$g(\bar{A})$で割ることにより以下の定義を得る。従って、これは確率測度に近い概念を有していると考えられる。

【定義3.2】 劣加法性と優加法性の程度を計量する尺度として重複係数ξを以下のように定義する。

$$\begin{cases} \xi = \{(g(A))'-(g(A))^*\}/(g(A))' & \text{(劣加法性)} \\ \quad = 1-g^*(\bar{A})/g'(\bar{A}) & (15) \\ \xi = -\{(g(A))^*-(g(A))'\}/(g(A))^* & \text{(優加法性)} \\ \quad = -(1-g'(\bar{A})/g^*(\bar{A})) \end{cases}$$

【定義3.3】 重複係数ξの結合演算をt-conormによって表現するとき、菅野のファジイ測度の場合との類似から確率和を用いるものとする。

【命題3.2】 gが正規化($\Sigma t\circ g(A_i) = t(1)$)されている場合、菅野のパラメータλに対応するものを以下の式で表現できる。

$$\begin{cases} \lambda = -\{1-\Sigma g^*(\bar{A}_i)/g'(\bar{A}_i)\} \\ \mu = -\{1-\Sigma g'(\bar{A}_i)/g^*(\bar{A}_i)\} \end{cases} \quad (16)$$

4. 応 用 例

4.1 意志決定問題

ファジイ測度の非加法性は、評価項目間の相互作用を表している。劣加法性は、項目AとBに共通性があることを示しており、ある項目を満たす特徴のある対象を選ぶ(代替的意志決定[5])可能性が強いと解釈される。優加法性は、項目の補成分すなわち否定部分に共通性があり、項目AやBが単独に満たされても満足せず両方が同時に満たされた対象を選ぶ(補完的意志決定[5])可能性が強いことを表していると考えられる。ここで、重複係数ξは非加法性の程度を計量する尺度であり、このような意志決定者の選好構造の特性を定量的に評価できる可能性がある。ただし、|ξ|が1に近い場合は正負いずれの場合も共通部分が大部分をしめ、評価項目設定の妥当性に疑問が持たれる。

4.2 数値計算例

宇宙開発の分野において研究者の研究テーマ選出に関する意志決定過程を、項目の重視度に注目して捉える試みを行う。このとき、評価項目としてA 実現性、B ユニーク性、C 理想,夢、D 情報整理の程度を設定し、各項目に対する満足度の組合せを与えたときの被験者の総合評価値からファジイ測度を同定することによって重視度を評価する。

図5に、(i)劣加法性、(ii)優加法性に該当する被験者の重視度のレーダチャートを示す。実線は全ての満足度の組合せにおける平均的な重視度を、破線および点線はその組合せの中で最も被験者が代替的、補完的な意志決定を行ったものを示す。表1に、各被験者の、重複係数ξの値を3つの線種別に示す。

図5より、(i)の被験者はレーダチャートの描く図形が大きく、(ii)の被験者は小さい。表1より、重複係数ξはこれらの図形の形すなわち選好構造の特性を数値として表現しており、(i)と(ii)の被験者における選好構造の差異、および様々な満足度の組合せにおけるその変化の具合を読み取れる。

特に、(ii)において最も補完的な意志決定を行った場合の項目Dのξは−0.41であり、被験者がD以外の項目をみているときもDが満たされていることを前提としていると考えられる。従って、(ii)の被験者にとって、評価項目設定の妥当性についての疑問が生じる。すなわち、他の項目をDの内容も加味した総合的なものに変更するか、項目A,B,CよりDを上位の概念として設定する必要があると思われる。

5. ま と め

本稿では、分解可能測度と呼ばれるファジイ測度を対象にして、測度の非加法性の程度を劣加法性と優加法性において統一的に計量できる尺度として重複係数を定義した。このとき、菅野のファジイ測度から出発しパラメータλの意味を考察することにより、アルキメデス的な分解可能測度一般についても

重複係数の定義を行えた。また、意志決定問題において重複係数による考察を行った結果、重複係数により、意志決定者と対象の様々な組合せにおいて生じる選好構造特性の変化や差異を数値として評価できること、および設定された評価項目が被験者にとって妥当であったかどうかの考察も行えることがわかった。

【参　考　文　献】

1)　S.Weber ; ⊥-Decomposable measures and integrals for Archimedean t-conorms ⊥ , J. Math. Anal. Appl. Vol.101 , pp.114-138 (1984)

2)　菅野 ; Fuzzy測度とFuzzy積分 , 計測自動制御学会論文集 Vol.8, No.2 , pp.218-226 (1972)

3)　D.Dubois , H.Prade ; A Class of Fuzzy Measures Based on Triangular Norms , Int.J.General Syst. Vol.8, No.1 , pp.43-61(1982)

4)　T.Murofushi , M.Sugeno ; An interpretation of fuzzy measure and the Choquet integral as an integral with respect to a fuzzy measure , Fuzzy Sets and SystemsVol.29 , pp.201-227 (1989)

5)　市橋 , 田中 , 浅居 : ファジイ積分とその多属性意志決定問題への応用 , 計測自動制御学会論文集Vol.22 , No.5 , pp.557-562 (1986)

$g(A)$: 集合Aに対するファジイ測度

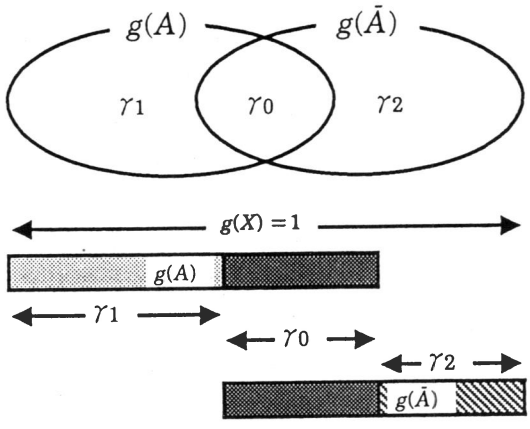


図3　劣加法性のファジイ測度gによる説明

$g^*(A)$: 補集合$\bar{A}$に対するファジイ測度$g(\bar{A})$の補の成分。$(1-g(\bar{A}))$

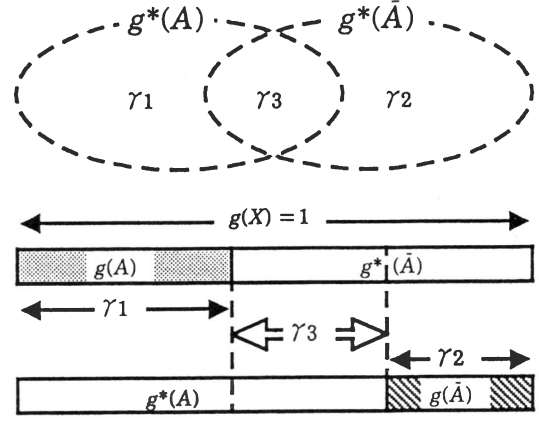
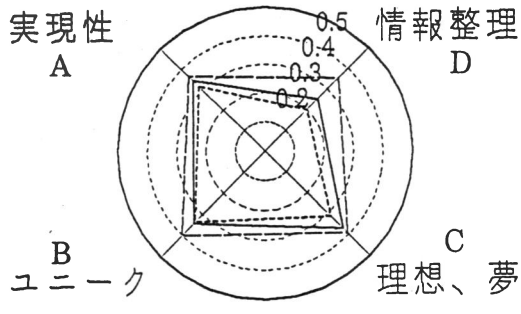
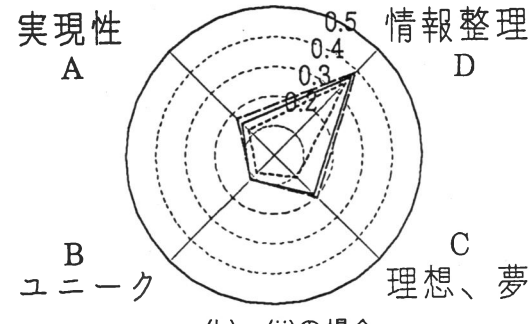


図4　優加法性のファジイ測度g^*による説明



(a)　(i)の場合



(b)　(ii)の場合

図5　重視度のレーダチャート

表1　各項目に対する重複係数ξの値

(a)　(i)の場合

	A	B	C	D
平均	0.19	0.19	0.20	0.14
代替的	0.26	0.29	0.28	0.25
補完的	0.11	0.12	0.13	0.08

(b)　(ii)の場合

	A	B	C	D
平均	−0.09	−0.07	−0.11	−0.20
代替的	−0.05	−0.04	−0.05	−0.10
補完的	−0.20	−0.15	−0.18	−0.41

問合せ先 :　〒100　千代田区内幸町2−2−2フコク生命ビル　清水建設大崎研究室
松　下　　裕　　Tel 508−8101　Fax 508−2196

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FC4-1

言語にかかわるあいまいさの分類と１～２の応用例
～ファジィ評価と文脈の視覚化～

北垣郁雄
Ikuo KITAGAKI
職業訓練大学校
The Institute of Vocational Training

Membership function is used for the expression of fuzzy words in a physical matter. In order to discuss the fuzziness in words more widely, it is desirable to consider what kinds of fuzziness there are in words/sentence. This material deals with six kinds of fuzziness arranged in order, which is grade, scale structure, concept, context, story and (speaker's) situation. And, as the examples, we discuss a fuzzy evaluation and a visualization method of context.

１．はじめに

日常レベルで考えるに、発せられたある話し言葉について、各々の単語の意味範囲を改めて特定しようとすると困難なことが多い。また、文脈などもあいまいであることが少なくないが、度の過ぎたあいまいさであれば、途中で話し手に質問を発することにより、その意味をより限定しようとするであろうが、そのような場合を除けば、ある程度のあいまいさが存在しても大きな誤解を生じない。つまり、話し手も聴き手も、ある程度の表現上のあいまいさを承知のうえで、情報授受を行っていることになる。言葉の情報処理過程を考えるに、おそらくは、発せられた単語の時系列から、ストーリとしての状況を作り上げてゆき、途中であいまいな単語が発せられたら、逆に、形成された状況や文脈からその単語の概念を特定する、という時系列的作業の連続であろう。

このように、日常会話の理解では、個々の単語、文脈、状況などが相補的にその役割を果たしている。つまり、”言語”を究極の目的とするあいまいさの研究においては、少なくとも、従前のメンバーシップ関数で表現し得るあいまいさだけでは、充分説明しきれないものがある。ちなみに、図１の(a)と(b)はいずれも「若い」なるメンバーシップ関数であるが、その大きな差異は、ストーリに直接依存するものである。

以上のような考察から、”言語”のファジィ論的研究では、その手始めに、いかなる種類のあいまいさが存在するか、についての共通理解が求められるものと思われる。そして本研究では、あいまいさの種類の列挙とそれらの大局的な関係を、一つの規範モデルとして提案している。また、そのうちのいくつかの要因に着眼した応用例をのべている。

２．言語にかかわるあいまいさについて[1]

1.あいまいさの種類　帰属度、尺度構成、概念、文脈、ストーリ、（発話の）状況の６つをとりあげる（図２）。

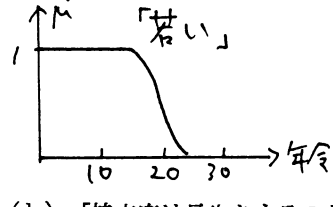
【帰属度のあいまいさ】　通常扱われるファジィ集合そのものを指し、所定の尺度に対する度合としてメンバシップ関数で示される。図３(a)のλ－μ平面上に描写される。

例：石が重い、油圧が高い

【尺度構成のあいまいさ】　当該の言語が、所定の尺度に対する帰属度として特徴づけられても、その設定方法自体に様々な可能性を想定できる場合が、この種のあいまいさである。たとえば、「大きい箱」は、あいまいな表現であるが、「大きい」を特徴づける尺度には、体積のほか縦・横・高さの和や面積なども想定し得る（図（b））。概ね幾何学的用語がこれに相当する。そのほかに次の例があげられよう。

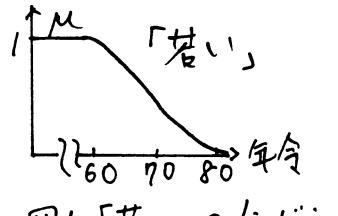
例：まっすぐな道、道路のへこみ、ギザギザした面、うるさい

（a）「チャスラフスカとコマネチの平均台は、いずれも見事なものであった。しかし、細かく比較すると、やはり若いということの重大さを痛感させるものがある」



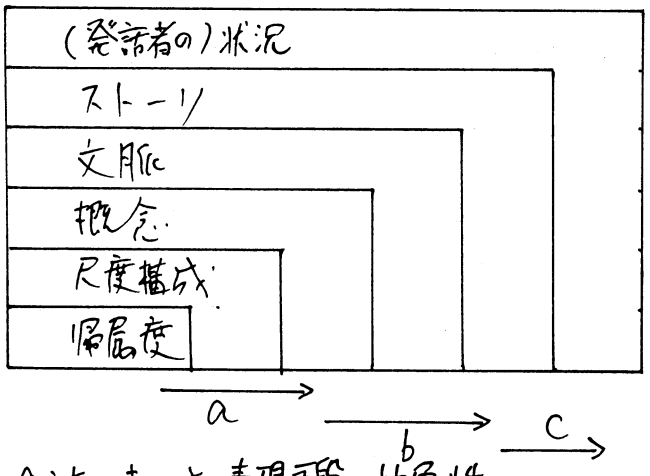
ストーリ　の保有情報：
体操、平均台、演技の完璧さ

（b）「桂文楽は長生きするのも芸のうち、とよくいっていたものだ。節度ある生活を送り、・・・。そもそも生の尊厳とは、・・・。それからすると、三遊亭金馬は還暦には達していたとはいえ、まだまだ若かったといわざるを得ない」



ストーリの保有情報：
芸、落語、生、死

図1.「若い」のメンバシップ関数



a：あいまいさの表現手段の抽象性
b：あいまいさの検討の対象となる文章の規模
c：発話の背後関係

図2 言語のあいまいさ

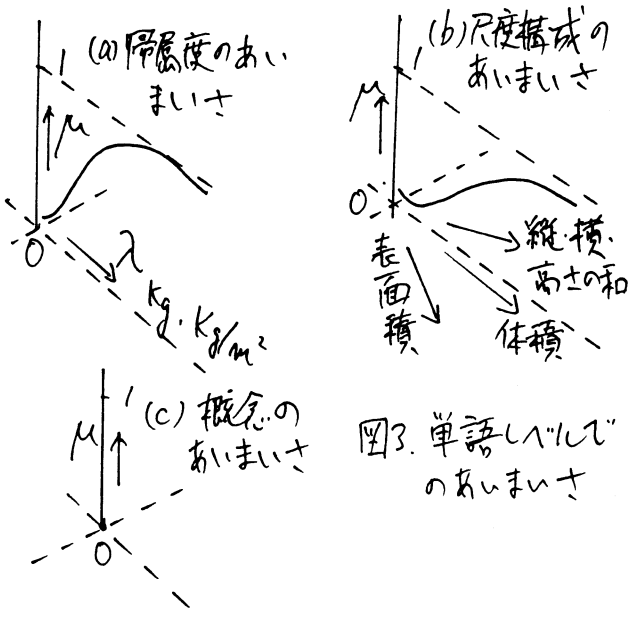


図3. 単語レベルでのあいまいさ

【概念のあいまいさ】　多人数による多数決的尺度を除いては、尺度を想定し得ないのがこのあいまいさで、図(c)のように図表現的には殆ど意味をなさない。
例：理想的、慎重を期す、ダサイ、頭が重い
【文脈のあいまいさ】　一貫性の欠如、論理の飛躍によるあいまいさ、文中の代名詞の不明確性によるあいまいさである。
【ストーリのあいまいさ】　その時々の話題のあいまいさである。図1の(a)と(b)では話題が異なる。
【（発話者の）状況のあいまいさ】　当該の議論の背景や発話者の語調とか表情にかかわるあいまいさで、おもに非言語情報である。

図2では、6つのあいまいさの関係をa，b，cなる変数で表し関係づけているが、このように、”帰属度”から”状況”に向けて、その関係を特徴づける尺度は必ずしも同一ではない。

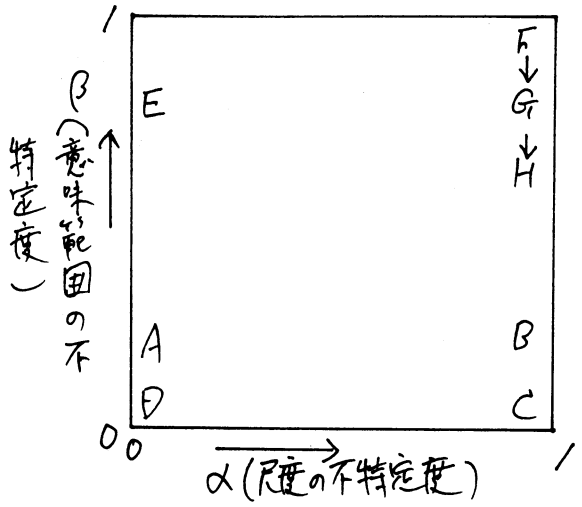


図4. 不特定平面

2.意味ー尺度の不特定平面　のちに、文脈の視覚化を図るため、この不特定平面を作成する。例として、「うるさい」を考えてみよう。これは、物理的な音の大きさの問題のほか、小声でも内容の不愉快さから言うこともある。つまり、尺度構成のあいまいさにはやはり度合が存在する。一方、「うるさい」のは誰か、といういわば意味の不特定さからくるあいまいさもある。

これを踏まえて、図4の不特定平面Rを作成する。一つの平面が、ほぼ一つの単語に対応すると考えてよい。横軸αの値は、その言葉の指し示す意味によって定まる（これにもあいまいさが残存する）と思われる。一方、縦軸のβは、これが1に近いと一般に良質な表現とはされない。つまり、βは説明不足とか文脈などのあいまいさに起因して定まると想定される。

平面Rの4隅をはじめいくつかの例A～Hを、以下に示しておく。このうち、F～Hは「理想的」の意味内容の説明を重ねるにつれて、そのβの値が次第に小さくなってゆく様子を示している。

A：「石が重い」
B：「頭が重い」
C：「…。そのことで僕は頭が重い」
D：「ポンプAに関し…。このポンプの油圧が高い」
E：「圧力が高いので…」
F：「理想的だと思っているんだよ。
G：　彼女の容貌のことだがね。
H：　むろん君にとっての話だよ」

このうち、Eは「高い」のが「圧力」であることはわかるが、何の圧力かがつかめないので、その意味の不明確さを反映して、これに（1ではなく）1に近い値を割り当てている。AとBについても、ほぼ同様である。

実際には、聴き手は、βが1に近いような単語に対しては、その前後の不特定平面で、βが1に近くないいくつかの単語の情報をもとに、そのβの値をより0に近づけるよう試みる

はずである。つまり我々は、当該の単語の意味内容を、その近辺の多くの単語の関連から瞬時のうちに特定し、また意味を相補いつつ、発話理解していると思われる。

ただし、βが0に近ければ近いほど無条件に良質ということにはならない。なぜなら、そのために、説明が長くなってしまい、一般には冗長な表現となり易いからである。

3．ファジィ評価(2)

ファジィ積分によるアンケートの回答処理では、重要度関数を設定する必要があるが、筆者のファジィ評価システムでは、重要度関数としてアンケート項目の相関を重視したρ－ファジィ測度を用いている。ρ－ファジィ測度の算法のなかには、ある項目x_kがほかの項目群x_j（$k \neq j$）と内容的にどの程度類似するかのいわば類似度が導入されているが、その”類似性”に尺度構成のあいまいさを導入している。

すなわちそこでは、項目群の重要度を、基本的には各項目の寄与分の総和として求めているが、項目x_kの寄与分をその他の項目（項目群$X_{\bar{k}}$とする）と内容的に類似すればするほど低い値をとるように定めるようにしている。その際、比較の対象として$X_{\bar{k}}$の中で最も類似する一つの項目だけをとりあげて、それら2者の関係において類似性を算出するという考え方もあれば、$X_{\bar{k}}$の全項目について、各類似性の算術平均を尺度とみなす考え方もある。あるいは、それらの中間的な考え方も存在し得る。

このように、比較の対象としてとりあげる項目数に関しての様々な考え方が、尺度構成のあいまいさを生み出すことになる。結果的には、図5に示すように上界重要度と下界重要度が算出されるわけである。

詳細は略すが、ファジィ評価では、回答者は序列尺度に対する上界／下界回答値hを記入するようにしているが、図の上半分と下半分が、それぞれ回答値の上界、下界に対する処理の様子を示している。そして、いずれの図も、右下りのグラフが、横軸の項目番号に対する回答値を示し、右上りのグラフが重要度関数g（・）を示す。そして、2種類のg（・）がほぼ並行して表示されているが、それらが先にのべた上界／下界重要度である。

4．文脈の視覚化(3)

文脈のあいまいさが、関係的非論理性と内容的不明確性の2つの要因で特徴づけられると考え、先の意味－尺度の不特定平面をもとに文脈の視覚化を図る。その際、文脈がどの程度あいまいであるかは、いずれの要因に対しても、心理的尺度として定めるものとする。

1.発話の単位と状態殻S　　発話の単位は、行動・状態に関する一つの意味的なまとまりである。これを、次の文例1で事例的に示す。

文例1：太郎「僕がけさ早く学校にいったら、多くの同級生がほうきで教室を掃除していた」

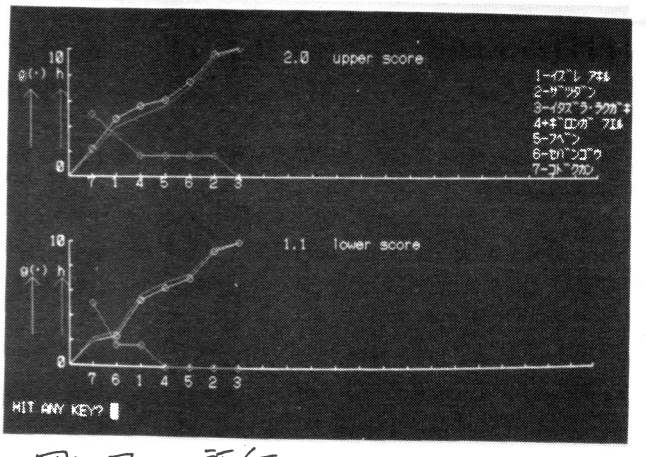


図5．ファジィ評価

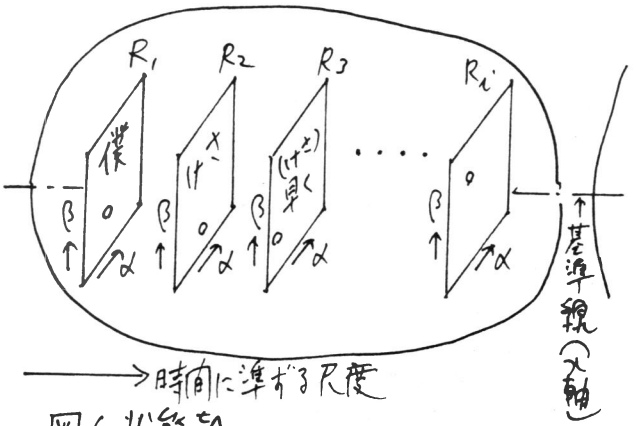


図6．状態殻

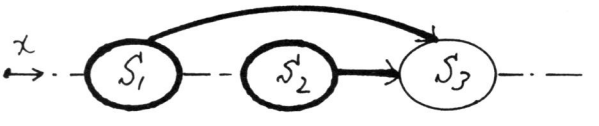


図7 モデルの描き方（文例2）

さて、各発話単位を状態殻Sと表記する。状態殻Sの実体は、図6に示すように不特定平面Rを横に積み並べたものである。

2.完全に可解な発話モデル　　記述ルールの概略を以下に示すが、描写面には基準線（x軸）が固定されているものとする。

ルール1：行動・状態の単位は、同じ大きさの楕円状の殻S（状態殻）で表し、その長軸（中心軸と呼ぶ）は、すべて基準線に一致させる。

ルール2：接続詞あるいは脈絡からみて、順序性のある殻同士は、矢印で結ぶ。その際、関連が強いと思われる矢印は太く表記する（帰結の根拠として、仮定の強さとして）。状態殻同士の関連とは、具体的な論理的関係、想起、記述の単なる時系列などである。また、どの状態殻にも、その属性として存在モードがあるとする。ここで、存在モードには、断定、

必然、体験などの”強い”もの、希望、可能、思慮、想起などの”弱い”もののほか、見聞、推理、予測などの中間的なものがある。

ルール３：”強い”存在モードの状態殻は、それに応じて太い楕円で表す。

次の文例２は、完全に可解な発話といえるが、上記のルールに基づくと図７のように描写される。文例中、記号Ｃは”関係”をあらわし、C_2≒記述の単なる時系列、C_3≒因果、となろう。

文例２：「強い台風が日本に近づきつつあるそうだ。いま、僕の家のへいが、倒れそうだ。したがって、この台風でへいが倒れるかも知れない」

(S_1（見聞）、C_2、S_2（予定）、C_3、S_3（予測）)

性質１：いくつかの状態殻の包絡線は、文脈殻Ｕを表す。その包絡線と連結された中心軸は、文脈を象徴する（図８）。

そのほか、ストーリ殻Ｖ，発話の状況殻Ｗは、いずれも図示のように四角くあらわす。図８に、完全に可解な発話モデルの描写例を示す。すなわち包絡線は直線をなし、ストーリ殻と状況殻の上辺には何の局所的凹凸も存在しない。

3.不可解な発話の殻モデル　　不可解な発話モデルの記述ルールの一部を示す。

【関係的非論理性】

ルール４：ある状態殻Ｓが別の状態殻からの帰結、演繹であったり、時空間的／話題的順序性を有するとみなされるとき、その関係が不可解であればあるほど、Ｓの中心軸を基準線から大きく偏心させる。

性質２：ストーリ殻Ｖ（および状況殻Ｗ）の形状は、ルール４などによる位置／形状の変化に呼応して、”類似”の方向に歪む。

文例３（図９）

「いま、ここは台風に襲われつつある。したがって、この川は氾濫する」　　(S_1（事実）、S_2（断定）)

【内容的不明確性】

ルール５：状態殻は、意味内容の不明確さなどに呼応して、短径をより長く描写する。

ルール６：内容的不明確性を有する状態殻は、許容範囲内で当該の内容をどのように設定しても関係的非論理性が消滅しない場合は、その度合に応じて基準線から偏心させる。

文例４（図１０）

S_1「ホテルＡはホテルＢより料金が高い」

S_2「僕は朝寝坊なので」

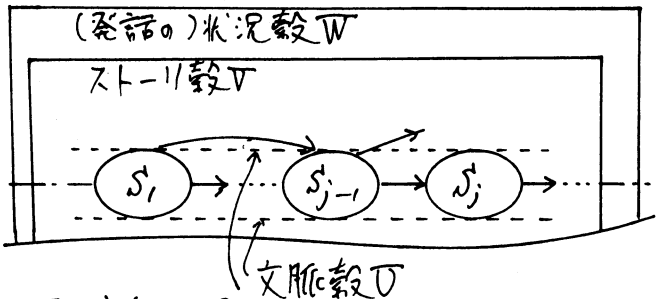


図8. 完全に可解な発話モデル

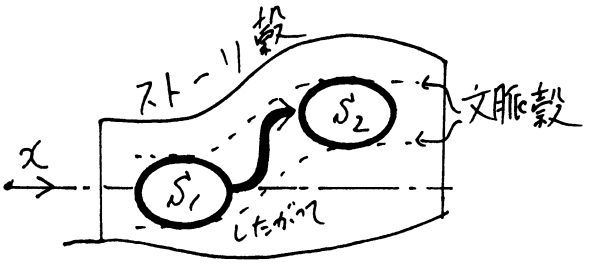


図9. 関係的非論理性

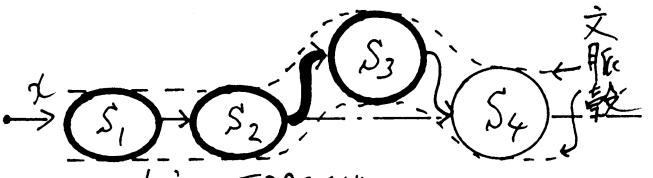


図10. 内容的不明確性

S_3「そちらのホテルにした」

S_4「またそこは、駅に近いそうだ」

文献

(1)北垣：あいまい情報（宇都宮、坂元監修：教育情報科学３より）、第一法規出版、1988

(2)北垣：意識調査にかかわるデータ・・・、第４回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、235/240,1988

(3)北垣：ファジィ論的殻モデル・・・、電子情報通信学会教育工学研究会、ET89-67,7/12,1989

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FC4-2

ファジィ集合の言語近似

- シフト型ファジィ修飾語の検討 -

Linguistic Approximation of Fuzzy Set - An Approach to Shift Hedges -

江澤 義典* 馬野 元秀** 井本 博之***
Yoshinori Ezawa Motohide Umano Hiroyuki Imoto

* 関西大学 工学部
Faculty of Engineering, Kansai University
** 大阪大学 大型計算機センター
Computation Center, Osaka University
*** 関西大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engneering, Kansai University

ABSTRACT

In recent years, a lot of systems based on fuzzy set theory have been developed. But it is often difficult for end users to interpret the output of numerical membership functions from those systems. We have already developed the system for linguistic approximation using so called linguistic hedges. In this paper, "shift hedges" are newly defined as mapping on the universe of discourse. A linguistic approximation system using shift hedges is implemented in Fuzzy-Set Manipulation System in Common Lisp where search method is revised to have better linguistic approximation. This system is running on a SONY's NEWS workstation.

1. はじめに

近年、ファジィ理論に基づいたシステムの開発が盛んに行なわれている。しかし、システムからの出力がファジィ集合(メンバーシップ関数)の形で表現されていると、その意味を直感的に把握するのは難しいことが多い。そこで、我々は与えられたファジィ集合に対応する言葉を、ファジィ語とファジィ修飾語を用いて自動的に生成するシステムを検討し、以前に報告した[1]。本報告では、台集合上を平行移動させる写像として定義されるファジィ修飾語(シフト型ファジィ修飾語)を導入し、その実現方法と効果を検討した。また、アルゴリズムの拡張も合わせて行ない、より良い言語近似の実現を図った。なお、本システムは SONY のワークステーション NEWS 上の Kyoto Common Lisp 上でファジィ集合処理システム[2]を用いて記述されている。

2. ファジィ集合の言語近似

あいまいな概念を表わす単語(形容詞など)に対応するファジィ集合が既知であるとき、その単語をファジィ語と呼ぶ[1]。また、メンバーシップ関数間の写像に対応する単語 (副詞など)が既知であるとき、その単語をファジィ修飾語[3,4]と呼ぶ。そして、与えられたファジィ集合に対して一致度の高い「言葉」を「ファジィ近似語」という。ここでは、ファジィ近似語の候補として、いくつかのファジィ修飾語を伴ったファジィ語を生成し、一致度が最大となるものを、与えられたファジィ集合のファジィ近似語と考える。そして、このファジィ近似語を求めることを言語近似と呼ぶ。

2.1. ファジィ修飾語

ファジィ修飾語は、それが修飾しているファジィ集合に対して演算を行ない、元のファジィ集合を少し変形したファジィ集合を生成する。Zadeh や Lakoff はメンバーシップ関数値間の写像として、ファジィ修飾語をとらえ、いくつかの副詞に対応する写像の定義を与えた[3,5]。

一方、順序集合 U=[0, 1] で定義された[6]メンバーシップ関数μ_Aを持つファジィ集合Aを k だけ右に平行移

動したファジィ集合Bのメンバーシップ関数μ_Bは

$$\mu_B(x) = \begin{cases} \mu_A(x-k) & x-k \in U \\ \mu_A(0) & x-k < 0 \\ \mu_A(1) & x-k > 1 \end{cases} \quad (1)$$

と表現される。ここでは、このようにメンバーシップ関数の形を変化させずに、台集合上を平行移動させる写像に対応するファジィ修飾語を「シフト型ファジィ修飾語」と呼ぶ。

2.2. シフト型ファジィ修飾語の効果

シフト型ファジィ集合の効果には、集中移動(concentration shift)、拡大移動(dilation shift)、類似移動(similarity shift)が考えられる。集中移動は、その効果を受けたファジィ集合が、元のファジィ集合に対して部分集合となり、拡大移動は逆に、元のファジィ集合に対し、その効果を受けたファジィ集合が部分集合となる効果をもたらす(図1 参照)。また、類似移動は、ファジィ集合の持つあいまいな程度を変化させずに、あいまいさが存在する空間を変化させる効果を持つ(図2 参照)。全体集合 U におけるファジィ集合 Aを集中移動したものを S-CON(A)、拡大移動したものを S-DIL(A)、 類似移動したものを S-SIM(A) と表すと、シフト型ファジィ修飾語は表1 のようにまとめられる。

表 1. シフト型ファジィ修飾語の効果

ﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数の形	左シフト	右シフト
S 関数	S-DIL(A)	S-CON(A)
Z 関数	S-CON(A)	S-DIL(A)
π 関数・逆π 関数	S-SIM(A)	S-SIM(A)

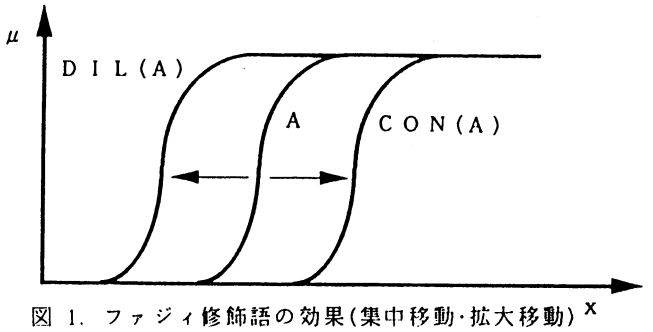


図 1. ファジィ修飾語の効果(集中移動･拡大移動)

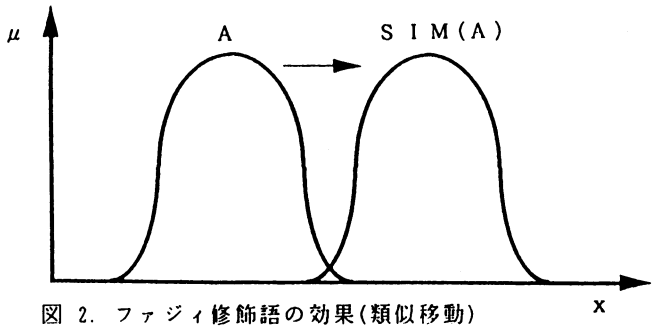


図 2. ファジィ修飾語の効果(類似移動)

2.3. 言語近似のアルゴリズム

ファジィ近似語を得るために、以前のシステムでは、与えられたファジィ集合との一致度が最も高いファジィ語を1つだけ選択した後、それにファジィ修飾語を付加し、最もよく一致するファジィ修飾語を付加した語を選び、それに、さらにファジィ修飾語を付加していく方法をとっていた。しかし、これでは最適なファジィ近似語が得られない場合があった。そこで、本システムでは各段階で一致度が最も高いものを1つだけ選ぶのではなく、複数個選択できるようにした。具体的には以下のようになる(図3 参照)。

① 既知のファジィ語と与えられたファジィ集合の一致度を計算し、一致度の高い順に並べ、上位 n 個を候補集合とする。

② それぞれの候補に既知のファジィ修飾語を付加し、新しい候補を作成する。これと与えられたファジィ集合との一致度を計算し、一致度の高い順に並べ替え、先の候補集合に追加し、上位 n 個を新しい候補集合とする。

③ 新たな候補集合の最も高い一致度が、先の候補集合の最も高い一致度よりも、大きい場合は、②を繰り返す。そうでない場合は、候補集合の最も一致度の高い候補を、与えられたファジィ集合のファジィ近似語とする。

また、ファジィ修飾語が多数付加された表現(例えば、とても とても とても とても 小さい など)は、通常用いられないと考えられるので、ファジィ修飾語が不必要に多く付加されないよう、一致度抑制係数を設定してある。すなわち、ファジィ修飾語が付加されるたびに一致度を一定の割合で減じ、一致度の無意味な上昇を抑制する。

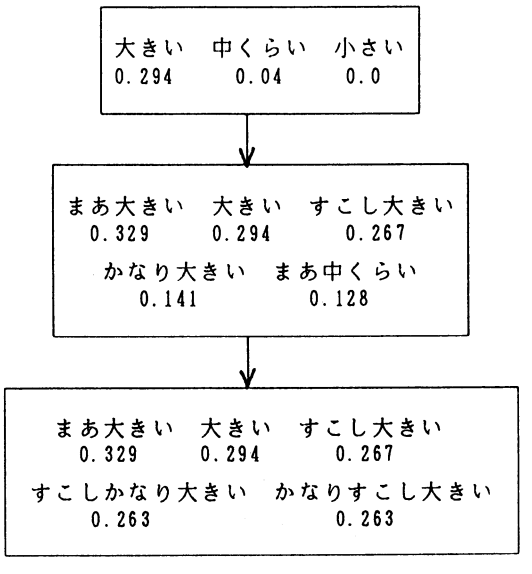


図 3. 最適言語近似表現探索の流れ

2.4. 一致度の計算

二つのファジィ集合がどれくらい一致しているかの度合いを定義する方法はいろいろと考えられる。ここでは、二つのファジィ集合がまったく同一の場合に一致度が 1 となり、二つのファジィ集合の共通部分がまったくない場合に、一致度 0 となるように考える[1,7]。具体的には、ファジィ集合 A, B の共通集合の濃度と和集合の濃度の比を一致度とする。

$$\text{一致度} = |A \cap B| \,/\, |A \cup B| \qquad (2)$$

ここで、|x| はファジィ集合 x の濃度を示す[6]。

3. 言語近似システム

前節のアルゴリズムに基づいた、言語近似を行なうシステムを作成した。

3.1. ファジィ語の登録

ファジイ語はあらかじめファイルとして用意し、言語近似を行なう前に関数 ldterm (load term) を用いてシステムに登録する。否定概念なども扱えるように、それらのファジィ語を考える全体集合も合わせて登録する。また、一般にある単語を考えるとき、その関連語(否定語や中間の語など)も合わせて考えることが多いので、関連語も合わせてファジイ語に設定する関数 mkterm (make term) も作成した。これは、あるファジィ集合 A を与えると、その否定概念を表わす「A_ない」と、中間の概念を表わす「中くらい_A」を生成する。ユーザが 「A_ない」、「中くらい_A」にあたる適当な「言葉」を指定すればファジィ語として登録できる。ここで用いた否定概念と中間の概念は、以下のように定義している。

$$\text{否定の概念} \quad 1 - \mu(x) \qquad (3)$$

$$\text{中間の概念} \quad \mathrm{NORM}(\mu(x) \wedge (1 - \mu(x))) \qquad (4)$$

ここで、NORM は正規化(ファジィ集合の最大グレードが 1 となるように、各グレードに最大グレードの逆数をかける)を表す[6]。

【ファジィ語の登録例】

```
>(ldterm "fs.dat")      ; ファジィ語の読み込み
"fs.dat"

>(shterm)               ; 登録中のファジィ語と
small                   ;       全体集合を確認
(1/0, 0.9/1, 0.4/2, 0.1/3)
u
(0, 10)
1                       ; 登録中のファジィ語の数

>(mkterm chiisai)       ; 「小さい」の関連語を作成
Please enter the name for not = chiisakunai
(0.1/1, 0.6/2, 0.9/3, 1/4, 1/5,
                    1/6, 1/7, 1/8, 1/9, 1/10)
Please enter the name for half = chuukurai_chiisai
(0.25/1, 1/2, 0.25/3)
"new terms are generated"
```

3.2. ファジィ修飾語の登録

ファジィ修飾語は Lisp の関数として表記し定義する。ここでは、ファジィ集合 X に対して、以下の計算式を用いてファジィ修飾語の設定をしている。

(1) S形メンバーシップ関数を持つ場合

$$\text{totemo\_X} = \mu(x - 2\delta) \qquad (5)$$

$$\text{kanari\_X} = \mu(x - \delta) \qquad (6)$$

$$\text{maa\_X} = \mu(x + \delta) \qquad (7)$$

$$\text{sukoshi\_X} = \mu(x + 2\delta) \qquad (8)$$

ここで、δ はメンバーシップ関数をシフトさせる基本量を表す。Z形の場合は変化量の正負を逆に考える。

(2) π 形、逆π 形メンバーシップ関数を持つ場合

$$\text{maa.p\_X} = \mu(x - \delta) \qquad (9)$$

$$\text{maa.m\_X} = \mu(x + \delta) \qquad (10)$$

4. 実行例

例えば、速度に関するファジィ語「遅い」、「普通」、「速い」を考える。そして、これらの言葉を表すファジィ集合を

$$\text{全体集合 } U = (0, 120) \qquad (11)$$

$$\text{遅い} = \{1/0, 1/10, 1/20, 0.9/30, 0.6/40, 0.4/50, 0.1/60\} \qquad (12)$$

$$\text{普通} = \{0.1/30, 0.6/40, 1/50, 1/60, 0.6/70, 0.1/80\} \qquad (13)$$

$$\text{速い} = \{0.1/60, 0.4/70, 0.6/80, 0.9/90, 1/100, 1/110, 1/120\} \qquad (14)$$

であると考えたとき、次のファジィ集合を表現する言葉を考える。

$$A = \{0.1/20, 0.6/30, 1/40, 1/50, 0.6/60, 0.1/70\} \qquad (15)$$

$$B = \{0.1/50, 0.6/60, 1/70, 1/80, 1/90, 1/100, 0.1/110\} \qquad (16)$$

ファジィ集合 A は、既知のファジィ集合「遅い」とも「普通」とも「速い」とも異なるが、ファジィ集合「普通」とメンバーシップ関数の形が同じであり、「普通」を左へ平行移動したものと考えられる。また、ファジィ集合 B は「速い」もしくは「遅くない」に近いと考えられる。これらを例にして、本システムを実行させてみよう。ここでは、ファジィ

近似語の候補として、一致度の上位 20 個を選択している。

【言語近似の実行例】

```
>(ldterm "speed.dat")     ; ファジィ語の登録
"speed.dat"

>(mkterm osoi)            ;「遅い」の関連語を作成
Please enter the name for anti = osokunai
{0.1/30, 0.4/40, 0.6/50, 0.9/60, 1/70, 1/80, 1/90,
                                  1/100, 1/110, 1/120}
Please enter the name for half = no
"new terms are generated"

>(mkterm hayai)           ;「速い」の関連語を作成
Please enter the name for anti = hayakunai
{1/0, 1/10, 1/20, 1/30, 1/40, 1/50, 0.9/60, 0.6/70,
                                  0.4/80, 0.1/90}
Please enter the name for half = no
"new terms are generated"

>(shterm)                  ; 登録中のファジィ語を確認
hayakunai = {1/0, 1/10, 1/20, 1/30, 1/40, 1/50,
              0.9/60, 0.6/70, 0.4/80, 0.1/90}
osokunai = {0.1/30, 0.4/40, 0.6/50, 0.9/60, 1/70,
              1/80, 1/90, 1/100, 1/110, 1/120}
hayai = {0.1/60, 0.4/70, 0.6/80, 0.9/90, 1/100,
                                  1/110, 1/120}
futsuu = {0.1/30, 0.6/40, 1/50, 1/60,
                          0.6/70, 0.1/80}
osoi = {1/0, 1/10, 1/20, 0.9/30, 0.6/40,
                          0.4/50, 0.1/60}
u
(0, 120)
5                          ; 登録中のファジィ語の数

>(la {0.1/20, 0.6/30, 1/40, 1/50, 0.6/60, 0.1/70})
(maa.m-futsuu 0.40)

>(display-num 5)           ; 上位 5 個を表示させる
5

>(la {0.1/50, 0.6/60, 1/70, 1/80, 1/90,
                          1/100, 0.1/110}
(osokunai 0.26)
(sukoshi-hayai 0.24)
(sukoshi-hayakunai 0.23)
(maa-hayai 0.21)
(maa.p-futsuu 0.20)
```

5. おわりに

本報告では、台集合上を平行移動する写像として定義した、「シフト型ファジィ修飾語」について述べた。ファジィ集合の持つあいまいさの程度を変化させずに、あいまいさの存在する空間を移動させることにより、従来のファジィ修飾語では言語近似し難かったファジィ集合を言語近似できるようになった。今後の課題として、多様なファジィ集合を言語近似するために、シフト型ファジィ修飾語のさらに適切な定義方法について検討する必要があると思われる。

[謝辞]

本研究を行なうに当たり、いろいろとご配慮を頂いている、関西大学の伊藤郁男教授、久保井不二男教授に深く感謝致します。

[参考文献]

[1] 馬野・江澤・井本 :「ファジィ集合の日本語による言語近似」, 情報処理学会第39回全国大会, pp.57-58 (1989)

[2] 馬野 :「Lisp によるファジィ集合処理システム」, 第3回ファジィ・システム・シンポジウム, pp.162-172 (1987)

[3] L.A.Zadeh : "A Fuzzy-Set Theoretic Interpretation of Linguistic Hedges", J. of Cybern., Vol.2, pp.4-34 (1971)

[4] 馬野 :「ファジィ修飾語の効果の図的表示」, 情報処理学会第28回全国大会, pp.1169-1170 (1984)

[5] G.Lakoff : "Hedges: A Study in Meaning Criteria and the Logic of Fuzzy Concept", J. of Philos., Vol.2, pp.458-508 (1973)

[6] 水本 :「ファジィ理論とその応用」, サイエンス社, (1988)

[7] 井本 :「Lisp による言語近似プログラムの作成」, 関西大学・工学部・卒業論文 (1989)

[問い合わせ先]

〒564 吹田市山手町 3-3-35
関西大学工学部管理工学科 情報処理工学研究室
井本 博之
TEL : 06-388-1121 (ext. 5821)
FAX : 06-330-3154
JUNET : imoto@iecs.kansai-u.ac.jp

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

FC4-3

言語的確率表現用語の心理学的研究

A psychological study of linguistic probability terms.

竹村和久
Kazuhisa TAKEMURA
光華女子短期大学情報処理研究室
Institute of Information Processing, KOHKA Women's College.

Most people, including expert forecasters, generally prefer communicating their uncertain options with nonnumerical terms such as probable, very likely, and so forth, rather than with numerical probabilities (Beyth-Maron, 1982). The vague meaning of probability terms can be expressed as menbership functions over [0,1] probability interval. A fuzzy rating procedure was used in a psychological experiment to empirically establish and assess menbership functions for several probability terms.

問　　題

これまでの判断についての心理学的研究は、我々人間がバイアスを含んだ判断をしやすいことを示している。このような判断におけるバイアスは、日常生活におけるどちらかというと取るに足りない判断だけでなく、専門家の行なう重要な判断においても生じることがわかっている。たとえば、Kahneman et al.[1]は、確率情報に関する専門家もある状況では、確率情報に関する根本的な判断の錯誤をすることを示したし、Tversky, & Kahneman[2]は、医者や臨床家までも医療手段の選択や判断において状況依存的なバイアスが生じる可能性を示した。

我々の社会生活においてこのような判断の錯誤やバイアスが存在することは、非常に問題のあることかもしれない。特に、原子力発電所における放射能放出事故確率の判断などのような我々の生活に重大な意味を持つような事柄にバイアスや錯誤が生じるとすると非常に問題であろう。このような例は、非常に極端な例ではあるが、我々の社会生活におけるリスク知覚などを研究するためにも、不確実性における判断現象の研究をすることは意義のあることであると考えられる。

ところで、判断現象の心理学的研究をする場合、我々が多くの状況で、不確実であいまいな情報にしか接していないことに注目する必要がある。このような情報の不確実性や曖昧性は、従来確率による表現を利用することによって検討されてきた。しかし、確率概念による検討では不確実性や曖昧性の十分な把握ができないともいわれている。[3]また、確率は、通常数値で表現されているが、専門家も非専門家も、数値表現よりも言語表現を用いて確率を表現する傾向がある。[4]それゆえ、判断の心理学的研究を行う場合、言語表現に基づく確率の推論過程の検討を行うことの重要性が示唆される。

本研究は、繁桝ら[5]やWallsten et al.[6]のようにある特定の尺度モデルによってメンバーシップ関数を推定する方法を取らず、ファジー評定法[7]を用いて、確率の程度の言語表現と数値とがどのような心理的対応関係があるのかを検討した。実験1では、たとえば、”非常に高い確率”というような曖昧な言語情報に対応する確率を尺度上の1点に位置づけるのではなく、ある広がりをもって捉えた。また、実験2、実験3では、実験1のように抽象的な確率情報を用いるのではなく、天気予報における降水確率、受験の合格確率、病原菌による発病確率を取り扱ったの3つの具体的状況をとりあげて、確率情報を評定させ、状況による評定の差異がみられるかを検討した。

実　験　1

方　法

被験者　本実験の被験者は、私立大学生128名（男子42名、女子86名）であった。実験者の教示を徹底させるために小集団による実験が行なわれ、被験者は、5名から15名程度の集団で実験に参加した。

質問紙と手続　質問紙は、以下の2つの部分に大別できる。(1)確率表現用語の3点確率推定、(2)確率表現用語の11点確率による直接所属度推定である。

(1)確率表現用語の3点確率推定　この方法は、竹内[8]が評価用語の分析において用いたファジィ評定の方法である。ここでは、”極めて高い確率”、”非常に高い確率”、”かなり高い確率”、”やや高い確率”、”中くらいの確率”、”やや低い確率”、”かなり低い確率”、”非常に低い確率”、”極めて低い確率”の9種類の確率表現用語がそれぞれ、どのくらいの数値の確率を表わしているかを推定させる。最も適切と思う確率の数値とだいたいの許容範囲（上限と下限）を0%から100%までの値で被験者に記入させた。

(2) 確率表現用語の11点確率による直接所属度推定　ここでは、”極めて高い確率”、から”極めて低い確率”までの9種類の確率表現用語がそれぞれ、0%から100%までの11点の確率をそれぞれどの程度表わしているかを推定させた。被験者は、所属の程度を、100点（絶対そう思う）から0点（全くそう思わない）までの値を用いて、11点の確率に対して評定した。

結果と考察

まず、確率表現用語の３点確率推定の結果をTable 1に示した括弧内の値は、集団での平均値と標準偏差値（括弧内）である。これに示されているように、”極めて高い確率”から”極めて低い確率”に移行するに従って、推定される確率は下降してゆくことがわかる。また、推定の上限と下限の幅を比較すると、”中くらいの確率”、”やや高い確率”、”やや低い確率”のような中程度の確率を示す表現の方が、極端な確率を示す表現に比して、やや広くなっている。このことは、中程度の確率を示す表現の方が、極端な確率を示す表現に比して、曖昧に解釈されることを示唆している。

つぎに、確率表現用語の11点確率による直接所属度推定の結果をFig.1にこれらの結果を図示した。これに示されているように、これらの分布は、かなりなだらかな曲線を描いている。また、これらの分布は、中程度の確率を示す表現の方が、極端な確率を示す表現に比して、やや曖昧に解釈されることを示唆しており、確率表現用語の３点確率推定の結果と一致している。

本実験の問題点は、実験の手続で抽象的な確率情報が与えられただけで、具体的な状況での確率情報の処理が検討されていないことである。次の実験では、種々の具体的な状況における確率表現用語を検討する。

Table 1

確率表現用語の３点確率推定の平均値と標準偏差値（単位：%）

確率表現用語	適切な値	上限	下限
極めて高い確率	94.4 (3.7)	98.4 (2.9)	89.4 (5.2)
非常に高い確率	89.3 (5.2)	94.4 (4.4)	83.8 (6.8)
かなり高い確率	82.5 (6.6)	88.3 (6.3)	76.1 (7.7)
やや高い確率	71.5 (7.5)	78.1 (7.9)	65.2 (8.2)
中くらいの確率	53.5 (5.8)	60.5 (7.0)	47.3 (7.5)
やや低い確率	41.1 (15.6)	45.2 (7.1)	33.5 (8.2)
かなり低い確率	23.8 (8.5)	30.4 (8.6)	17.9 (8.6)
非常に低い確率	13.3 (7.0)	18.1 (8.0)	8.6 (6.2)
極めて低い確率	6.6 (8.8)	9.8 (6.1)	2.0 (4.0)

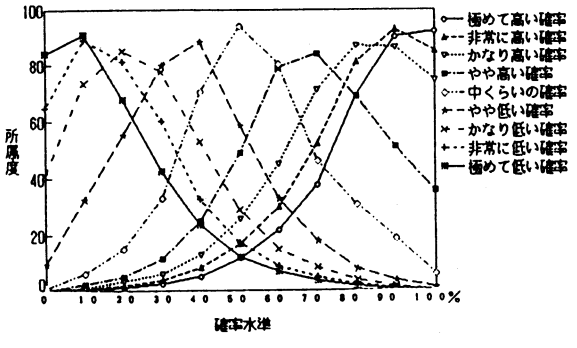


Fig. 1. 確率表現用語の所属度推定の平均値

実　験　2

方　法

被験者　本実験の被験者は、私立大学生154名（男子47名、女子107名）であった。被験者を以下の３群に分けた。すなわち、天気予報における降水確率の質問紙に回答する群（50名、男子17名、女子33名）、受験の合格確率の質問紙に回答する群（52名：男子16名、女子36名）、病原菌による発病確率の質問紙に回答する群（52名：男子14名、女子38名）である。実験者の教示を徹底させるために小集団による実験が行なわれ、被験者は、５名から15名程度の集団で実験に参加した。

質問紙と手続　質問紙は、天気予報における降水確率の質問紙、受験の合格確率の質問紙、病原菌による発病確率の質問紙の３種類があるが、(1)確率表現用語の３点確率推定、(2)確率表現用語の11点確率による直接所属度推定の形式に関してはすべて同じである。

(1)確率表現用語の３点確率推定　ここでは、”極めて高い確率”、”非常に高い確率”、”かなり高い確率”、”やや高い確率”、”中くらいの確率”、”やや低い確率”、”かなり低い確率”、”非常に低い確率”、”極めて低い確率”の９種類の確率表現用語がそれぞれ、どのくらいの数値の確率を表わしているかを推定させる。最も適切と思う確率の数値とだいたいの許容範囲（上限と下限）を0%から100%までの値で被験者に記入させた。

(2) 確率表現用語の11点確率による直接所属度推定　ここでは、”極めて高い確率”、から”極めて低い確率”までの９種類の確率表現用語がそれぞれ、0%から100%までの11点の確率をそれぞれどの程度表わしているかを推定させた。被験者は、所属の程度を、100点（絶対そう思う）から0点（全くそう思わない）までの値を用いて、11点の確率に対して評定した。

結果と考察

まず、確率表現用語の３点確率推定の結果をTable 2.1からTable 2.3に示した。値は、集団での平均値と標準偏差値（括弧内）である。これに示されているように、降水確率、合格確率、発病確率の所属度関数を比較すると、各確率表現のとる値は、ほとんど変らない。

つぎに、確率表現用語の11点確率による直接所属度推定の結果をFig. 2.1からFig. 2.3にこれらの結果を図示した。これに示されているように、これらの分布は、中程度の確率を示す表現の方が、極端な確率を示す表現に比して、やや曖昧に解釈されることを示唆しており、確率表現用語の３点確率推定の結果と一致している。

降水確率、合格確率、発病確率の所属度関数を比較すると、Table2.1からTable 2.3、Fig. 2.1からFig. 2.3に示されているように、これらの分布はかなり類似した形状をしており、各確率表現のとる所属度もほとんど変らないことがわかる。このことは、確率表現に関する所属度関数がある程度状況普遍的であることを示唆している。

Table 2. 1
降水確率表現用語の3点確率推定（%）

確率表現用語	適切な値	上限	下限
極めて高い確率	93.0 (5.5)	97.5 (4.3)	86.9 (7.0)
非常に高い確率	86.6 (6.3)	93.2 (5.7)	79.7 (7.3)
かなり高い確率	78.5 (7.3)	86.7 (7.9)	72.1 (7.8)
やや高い確率	66.9 (8.8)	74.7 (9.2)	60.0 (9.8)
中くらいの確率	52.8 (7.7)	60.5 (8.3)	45.6 (8.6)
やや低い確率	38.9 (6.7)	45.9 (8.6)	31.4 (9.2)
かなり低い確率	23.4 (8.5)	31.7 (13.7)	17.0 (8.7)
非常に低い確率	13.4 (5.8)	21.3 (14.0)	8.6 (5.2)
極めて低い確率	5.4 (3.4)	12.1 (14.1)	1.4 (2.2)

Table 2. 2
合格確率表現用語の3点確率推定（%）

確率表現用語	適切な値	上限	下限
極めて高い確率	93.4 (3.6)	98.8 (1.9)	87.4 (5.2)
非常に高い確率	88.9 (4.7)	95.0 (5.1)	82.1 (6.4)
かなり高い確率	82.5 (5.7)	89.4 (6.3)	75.3 (6.1)
やや高い確率	72.0 (7.2)	79.4 (7.4)	63.9 (7.9)
中くらいの確率	58.2 (7.2)	66.7 (7.2)	50.3 (9.9)
やや低い確率	42.8 (8.4)	51.3 (8.2)	34.3 (10.5)
かなり低い確率	25.7 (9.5)	33.6 (11.4)	17.0 (10.9)
非常に低い確率	17.4 (8.6)	24.1 (9.7)	10.0 (8.4)
極めて低い確率	9.2 (6.8)	14.7 (8.9)	2.9 (5.5)

Table 2. 3
発病確率表現用語の3点確率推定（%）

確率表現用語	適切な値	上限	下限
極めて高い確率	91.9 (5.7)	97.5 (4.9)	86.1 (7.4)
非常に高い確率	84.4 (7.4)	92.1 (6.6)	78.0 (8.5)
かなり高い確率	77.8 (8.7)	85.5 (7.5)	71.3 (9.1)
やや高い確率	66.7 (9.7)	74.4 (10.3)	59.9 (10.1)
中くらいの確率	52.4 (10.3)	60.3 (11.2)	44.6 (10.9)
やや低い確率	36.8 (12.2)	43.6 (11.7)	28.4 (13.0)
かなり低い確率	22.5 (14.5)	28.8 (14.2)	15.6 (14.1)
非常に低い確率	13.8 (13.8)	18.7 (14.2)	9.2 (12.9)
極めて低い確率	7.4 (13.4)	10.8 (13.7)	3.5 (12.5)

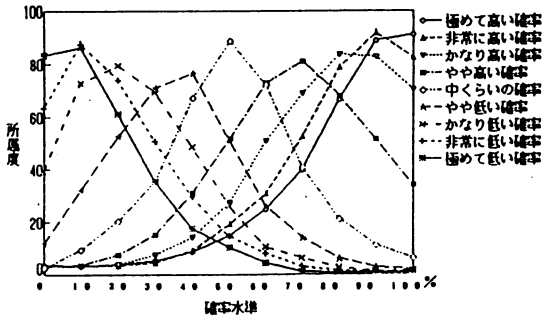


Fig. 2. 1. 降水確率表現用語の所属度関数

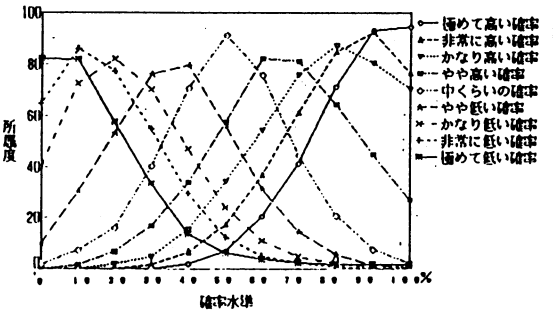


Fig. 2. 2. 合格確率表現用語の所属度関数

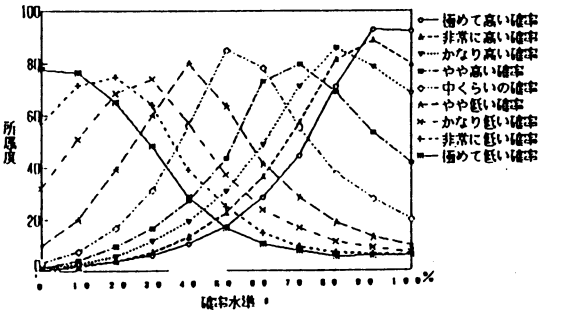


Fig. 2. 3. 発病確率表現用語の所属度関数

実　験　3

実験1と実験2では、9段階の確率表現用語が検討されただけで、より他の確率表現用語については、扱われていない。そこで、本実験では、言語学者の寺村[8]の概言に関する知見をとりいれて、概言と一連の確率との対応関係を直接推定させた。寺村[8]によると、概言とは、述語の確言形に後接して、話してのいろいろな主観を表す形式である。たとえば、次のようなものである。

雨が――降ル――ダロウ
　　降ッタ　　ヨウダ
　　　　ラシイ
　　　　ソウダ

本実験では、この概言に関する知見をとりいれて、天気予報における降水確率、受験の合格確率、病原菌による発病確率に関する概言と一連の確率との対応関係を3点確率推定法によって直接推定させた。

方　法

被験者　本実験の被験者は、私立大学生98名（男子59名、女子39名）であった。実験者の教示を徹底させるために小集団による実験が行なわれ、被験者は、5名から15名程度の集団で実験に参加した。

質問紙と手続　質問紙は、天気予報における降水確率の質問紙、受験の合格確率の質問紙、病原菌による発病確率の質問紙の3種類がある。これらの質問紙はすべての被験者によって回答されたが、回答する順序は無作為になるようにされた。質問紙は、天気予報における降水確率の質問紙、受験の合格確率の質問紙、病原菌による発病確率の質

問紙の３種類があるが、以下の形式に関してはすべて同じである。すなわち、どの質問紙にも、概言の３点確率推定とそれらの概言の使用頻度に関する質問項目がある。また、それぞれの質問紙で設定された状況は、実験２と同じである。

(1)概言の３点確率推定　ここでは、種々の概言がそれぞれ、どのくらいの数値の確率を表わしているかを推定させる。最も適切と思う確率の数値とだいたいの許容範囲（上限と下限）を0%から100%までの値で被験者に記入させた。

(2) 概言の使用頻度の測定　ここでは、種々の概言がそれぞれ、どのくらいの頻度で使用されているかを、”全く使われていない（０点）”から”極めてよく使われている（10点）”までの数値で評定させた（なお、この結果については、ここでは分析しない）。

結果と考察

まず、概言の３点確率推定の結果のうち、紙面の都合により降水確率の結果のみをTable 3.1に示した。値は、集団での平均値と標準偏差値（括弧内）である。結果は、いずれの条件においても、概言の評定値は同じ様なパターンを示した。このことは、概言の用法がある程度状況普遍的であることを示唆している。

討　　論

本研究は、繁桝ら[6]やWallsten et al.[7]のようにある特定の尺度モデルによってメンバーシップ関数を推定する方法を取らず、ファジー評定法[8]を用いて、確率の程度の言語表現と数値とがどのような心理的対応関係があるのかを検討した。これは、特定の関数をあらかじめこちらで指定するよりも、被験者の反応に忠実な結果が得られると期待できるから行なわれたものであった。しかし、最終的には、尺度構成モデルをつくる必要があるだろう。L-Rファジィ数のような関数を仮定することができるかどうかも今後検討する必要がある。

本研究では、確率情報の背景となる状況の差異についても検討を行なった。すなわち、実験２、実験３では、実験１のように抽象的な確率情報を用いるのではなく、天気予報における降水確率、受験の合格確率、病原菌による発病確率を取り扱ったの３つの具体的状況をとりあげて、確率情報を評定させ、状況による評定の差異がみられるかを検討した。降水確率、合格確率、発病確率の結果を比較すると、ほとんど大きな差異がないことが見出された。このことは、確率表現に関する所属度関数がある程度状況普遍的であることを示唆している。

付　記　本実験の実施にあたってご協力いただいた同志社大学文学部小嶋外弘教授、当時同志社大学文学部４年生であった富士元宏明氏、石黒聡男氏、宮副洋氏、中野洋氏に感謝いたします。

問合せ先　〒615　京都市右京区西京極葛野町38
光華女子短期大学情報処理研究室　　竹村和久
TEL:075-312-1783(EXT 556)　FAX：075-321-1360

Table 3.1
降水確率に関する不確実性表現用語の３点確率推定（%）

不確実性表現用語	適切な値	上限	下限
降るでしょう	81.5 (10.3)	92.4 (9.0)	71.5 (12.7)
降らないでしょう	19.6 (15.9)	29.0 (17.1)	9.2 (16.0)
降りそうだ	67.4 (14.5)	78.0 (16.7)	56.4 (16.7)
降りそうでない	24.7 (16.8)	32.8 (17.9)	18.9 (52.1)
降るようだ	74.9 (45.7)	79.4 (15.1)	64.9 (47.1)
降らないようだ	29.6 (50.4)	32.1 (15.7)	14.8 (14.5)
降るかもしれない	50.7 (14.9)	60.9 (17.0)	39.4 (15.1)
降らないかもしれない	52.2 (17.4)	62.1 (17.7)	41.2 (19.1)
降りましょうか	42.4 (22.3)	51.7 (23.6)	33.0 (22.5)
降るかもわからない	47.8 (13.4)	58.1 (14.9)	36.4 (16.2)
降らないかもわからない	51.7 (15.7)	61.6 (17.4)	40.6 (17.1)
降るにちがいない	90.2 (9.6)	96.4 (8.2)	83.5 (12.0)
降らないにちがいない	12.6 (16.2)	18.5 (17.4)	6.3 (15.2)
降るという	69.5 (16.1)	78.5 (16.1)	60.5 (17.4)
降るだろう	75.9 (12.0)	85.9 (12.1)	66.4 (12.9)
降らないだろう	22.5 (15.6)	30.2 (15.8)	12.3 (14.4)
まず降るだろう	86.2 (9.7)	94.1 (8.3)	79.0 (11.2)
多分降るだろう	76.9 (11.8)	86.5 (12.1)	68.8 (12.9)
まあ降るだろう	74.3 (11.8)	84.1 (11.6)	65.9 (14.1)
大体降る	76.6 (11.0)	86.6 (10.4)	67.7 (12.5)
降る可能性がないとは言えない	35.9 (21.2)	45.5 (22.4)	26.6 (21.5)
降るまい	18.3 (21.1)	24.7 (22.3)	10.9 (20.6)
降るみたいだ	66.8 (15.6)	76.7 (15.4)	56.7 (18.6)
降らないみたいだ	25.6 (13.6)	34.4 (14.7)	15.5 (13.4)
降るらしい	68.2 (11.5)	77.7 (12.6)	58.2 (12.8)
降るそうだ	70.1 (11.7)	79.7 (12.4)	60.3 (13.2)
降らないそうだ	25.6 (14.8)	33.8 (16.1)	15.0 (14.8)
降るはずだ	84.7 (11.7)	91.5 (11.0)	76.4 (15.6)
降らないはずだ	18.1 (16.3)	25.3 (18.0)	9.8 (16.1)
必ず降る	96.9 (4.8)	99.4 (3.0)	92.0 (7.8)
まず降らないだろう	16.7 (17.8)	23.3 (19.4)	9.5 (17.3)
多分降らないだろう	21.8 (15.1)	29.2 (16.0)	13.1 (15.1)
まあ降らないだろう	23.1 (15.8)	30.3 (16.6)	14.2 (15.7)
大体降らない	22.8 (14.2)	30.6 (15.8)	13.1 (14.1)

参　考　文　献

[1]Kahneman, D., Slovic, P., & Tversky, A. Judgement under uncertainty. Cambridge University Press (1982)

[2]Tversky, A. & Kahneman, D. The framing of decision and the rationality of choice, Science, **221**, 453-458 (1981)

[3]菅野道夫　ファジー理論の展開　サイエンス社(1989)

[4]Beyth-Marom, R. How probable is probable ? : Numerical translation of verbal probability expressions. Journal of Forecasting, 1, 267-269. (1982)

[5]繁桝算男・今井拓司・横山明子 メンバーシップ 関数による主観的確率の測定　日本心理学会第54回大会発表論文集、373.(1990)

[6]Wallsten, T.S., Budescu, D.V., Rapoport, A., Zwick, R., Forsyth, B. 1986 Measuring the vague meaning of probability terms.　Journal of Expeirimental Psychology, **115**:General, 348-365.

[7]竹内晴彦 ファジィ評定による評価用語の分析　日本行動計量学会大会発表論文抄録集、103-104.(1989)

[8]寺村秀夫　日本語の意味とシンタクスII　くろしお出版(1984)

第３日

９月８日（土）

ｾｯｼｮﾝ ＳＡ１	〔画像検索・認識・理解２〕	司会　和多田 淳三 （大阪工業大学）
ｾｯｼｮﾝ ＳＡ２	〔安定性〕	司会　小田中 敏男 （東京都立科学技術大学）
ｾｯｼｮﾝ ＳＡ３	〔プロセス制御２〕	司会　後藤 賢治 （国際ファジィ工学研究所）
ｾｯｼｮﾝ ＳＡ４	〔ニューラルネットワーク２〕	司会　林 勲 （松下電器産業（株））
ｾｯｼｮﾝ ＳＡ５	〔ファジィ制御３〕	司会　田中 一男 （金沢大学）

ｾｯｼｮﾝ ＳＢ１	〔ハードウェア２〕	司会　安信 誠二 （国際ファジィ工学研究所）
ｾｯｼｮﾝ ＳＢ２	〔ファジィ推論３〕	司会　坂和 正敏 （広島大学 工学部）
ｾｯｼｮﾝ ＳＢ３	〔多段推論〕	司会　鬼沢 武久 （熊本大学 工学部）
ｾｯｼｮﾝ ＳＢ４	〔線形計画〕	司会　大里 有生 （長岡技術科学大学 工学部）
ｾｯｼｮﾝ ＳＢ５	〔支援システム〕	司会　山川 烈 （九州工業大学 工学部）

ｾｯｼｮﾝ ＳＣ１	〔色彩〕	司会　中村 和男 （製品科学研究所）
ｾｯｼｮﾝ ＳＣ２	〔ファジィ知的情報処理〕	司会　市橋 秀友 （大阪府立大学 工学部）
ｾｯｼｮﾝ ＳＣ３	〔あいまい表現〕	司会　藪内 稔 （学習院大学）
ｾｯｼｮﾝ ＳＣ４	〔ファジィシステム解析〕	司会　高木 友博 （国際ファジィ工学研究所）
ｾｯｼｮﾝ ＳＣ５	〔学習〕	司会　山中 猛 （国際ファジィ工学研究所）

SA1-1

ファジィ画像検索について
ON FUZZY RETRIEVAL OF IMAGES

宮本定明* 小西信明** 三宅輝久*
Sadaaki MIYAMOTO, Nobuaki KONISHI and Teruhisa MIYAKE
*筑波大学 電子・情報工学系
Institute of Information Sciences and Electronics, Univ.of Tsukuba
** 筑波大学 理工学研究科
Master's Program in Sciences and Engineering, Univ.of Tsukuba

Abstract : This paper proposes a method of fuzzy retrieval of images. This method uses a semantic network that represents a semantic content of images. Indices of an image is represented by a semantic network, which is regarded as a labeled fuzzy digraphs. Images are retrieved by using these indices of labeled fuzzy digraphs. Since there exists fuzziness in a semantic content of images, the method of retrieval becomes a similarity retrieval calculating similarity measures between indices of images and a query of retrieval. To calculate similarity measures we use a matching algorithm that is based on operations of fuzzy relations. Fuzzy thesauri are also used that relate entry words of indices and queries.

1．はじめに

最近、マルチメディアデータベースの実現の要望が高まっているが、その中でも特に画像検索の分野の研究がまだ少なく、方法論も確立していない。検索方法としては、文献検索などと同様のキーワードによる検索を行うことができるが、本報告ではそのような単純な情報を基にした検索ではなく、画像におけるより複雑かつ曖昧な情報から検索を行う方法について述べる。

本研究では、マルチメディアデータベース等における画像情報検索手法について考察を行う。画像検索の手法としては、画像のクラス分け、内容記述、パターンマッチングなど様々な手法があるが（坂内[1]、1988）、これらの中で類似検索（similarity retrieval）と呼ばれる手法は画像検索の基本的手法とみられ、注目されるべきである。類似検索において、検索キーは通常のキーワードである場合や、自然言語による表現や検索キー画像である場合などがある。これらのいずれの検索キーを使用するとしても検索キーと検索対象画像とが完全に適合する場合は文献検索に比べ少ないと考えられる。そこで、検索キーと検索対象画像の類似度を計算する必要が生じる。類似画検索ではこの類似度を計算し、その値の大きいものから順に検索を行う。

このことから、この画像検索はファジィ理論の応用対象として適当であると考えられる。例えば、画像索引や検索キーとして自然言語を用いるとすると、それらの記述の中に曖昧さが自然に含まれる。これを数学的に取り扱うためにはファジィ理論が必要となる。また、類似画検索という手法の性質上、類似度が計算されるが、その計算法にファジィ関係演算を用いれば、その検索結果はファジィ集合となる。更に、ファジィシソーラスなども画像検索の道具として有用である。

ここでは検索キーとして自然言語による検索キーの記述を考え、そのモデルとして意味ネットワークを導入する。画像の意味内容を記述するネットワークをファジィ・グラフとみなし、ファジィ・グラフのマッチングによって検索手法を考察する。このとき、検索の類似度の計算のためにファジィシソーラスを使用する。

2．索引や検索キーにおけるファジィネス

ここでは画像検索の手法として、画像の内容記述による検索という立場をとるので、画像の意味内容の表現方法から考察せねばならない。これまでにも画像の内容をネットワークやグラフにして表現しようという試みはなされている（坂内[1]、1988）。ここでは画像の意味内容の表現として意味ネットワークを導入し、これをファジィ・グラフとみなして画像索引や検索キーとする。

意味ネットワーク

ここでいう、意味ネットワークとは命題や文章などの意味内容を表現するための手法の一つで、認知心理学の分野においては命題ネットワーク（Anderson[2] pp. 107-121）とも呼ばれている。このネットワークにおいては命題や文章は節点とラベル付きの矢印で表され、矢印は節点間を連結しラベルは節点間の関係を表す。

そこで、画像の意味内容の表現として、その画像に登場する物体をそれぞれの節点とし、物体間の位置関係などの意味内容を節点間の関係を表すラベルとする。このような意味ネットワーク索引により画像の意味内容を表現することが出来る。検索キーについては、検索したい画像の意味内容を想起し、それを意味ネットワークで表現することにより検索キーが作成できる。

そこで、例を用いながら説明することとしよう。エドワール・マネの「草上の昼餐」という作品の意味ネットワークを作成するには、まずその絵画を見てその

内容を想起する。例えば、「裸婦がいる。その裸婦はステッキを持った男性の左側にいる。また裸婦の後ろにも男性が座っている。その男性の奥の池の中に女性がいる。裸婦の手前にバスケットが置いてある。」のように想起されるであろう。これを意味ネットワークとして表現すると図1の様になる。このネットワークの要素として、裸婦、男性、女性、池、ステッキ、バスケットなどがネットワークの節点となり、それらを左、奥、中、手前、持つ、後ろなどの関係を表す言葉で連結する。このようにして画像の索引を作成する。一方、検索キーはこの画像を想起して同様の意味ネットワークで表現する。

索引のファジィネス

文献のファジィ検索では様々なファジィ質問やファジィ索引が取り扱われることがあるが、文献検索において検索者がファジィ質問を入力することはむしろ少なく、また一方、ファジィシソーラスを除いてファジィ索引が自然に生じるような例も少ない。ところが、画像検索では索引のファジィネスを仮定する方がむしろ自然である。

例えば先の「草上の昼餐」を考えてみれば、この画像に現れた要素の重要度が自ずから決まるであろう。この絵画の内容を想起するときには裸婦の存在は重要なものとなる。これらの要素や要素間の関係の重要度は索引と共に保持される必要があり、それによって検索法も重み付き検索でなければならない。また、この重み付けは検索キーにも同様に与えられるべきである。一般に、ファジィ検索は重み付き検索の中で理論として最も合理的な方法である。

更に、索引や検索キーとして与えられる言葉がそれ自身内包するファジィネスが考えられる。画像に登場する要素や要素間の関係を表現する言葉が索引と検索キーとの間で微妙に異なる可能性は高い。このような表現の違いはファジィシソーラスを用いて対応することができる。ファジィシソーラスには検索キーや索引を作成するときに使用できる言葉がすべて含まれており、それらの言葉の間のファジィ関係が与えられている。本報告では、このファジィシソーラスはすでに与えられているものとして、シソーラスの作成方法等には触れないこととする。

重み付き画像検索とファジィ検索

類似検索では検索キーと検索対象画像との類似度を計算するので、この方法を重み付き検索の一種とみなすことが出来る。ここでは画像の類似度をファジィ関係として扱う。このことによって、ファジィ検索において提案された様々な手法、概念が利用できる。本報告の手法においては、ファジィ・グラフの導入、そのマッチングにファジィ関係演算を用いること、またファジィシソーラスなどが利用される。

3．ファジィ・グラフ索引と検索キーとのマッチング

一般に意味ネットワークはいくつかの異なる表現を持ち、グラフと同一視されるものではないが、ここでは扱いを簡単にするため、ファジィ2項関係を表す命題の集合に限定して議論を行う。このように限定することにより、以下のように意味ネットワークをグラフとみなすことができる。

意味ネットワークとファジィ・グラフ

意味ネットワークは節点と節点間の関係を表す矢印から構成されているものとする。それらの節点をグラフの頂点に、節点間の関係を表す矢印を有向グラフの辺に対応させると意味ネットワークと有向グラフは同じ構造を持つことがわかる。また、意味ネットワークの節点や矢印は画像に登場する物体や物体間の関係を記述する言葉なので、グラフもそれらの記述をラベルとして持つラベル付き有向グラフとすべきである。更に、意味ネットワークの各関係に重みを付ければ、それはラベル付き有向ファジィ・グラフと同じ構造を持つことがわかる。

さて、有向ファジィ・グラフは頂点集合と辺集合とで記述されるが、頂点の記述は辺の記述に含まれるものとし、ここでは辺の記述のみを索引を表すデータとする。辺eのデータ構造は、辺のラベルl(e)、始点vのラベルl(v)、終点wのラベルl(w)、メンバーシップ$\mu(e)$の4つ組e:($\mu(e)$,l(e),l(v),l(w))で構成される。また、辺を持たない独立な頂点vの記述は、v:($\mu(v)$,l(v),l(v),l(v))とすることができる。

例として、図1の意味ネットワークに対応する索引データは図2の様になる。

ファジィ・グラフのマッチング

次に、索引と検索キーのマッチング、すなわち類似度の与え方を述べる。

まず記号を導入しよう。索引のグラフを辺の集合$E_I=\{e_{I1},\cdots,e_{Im}\}$、検索キーを$E_Q=\{e_{Q1},\cdots,e_{Qn}\}$とし、それぞれの要素を e_i:($\mu(e_i)$,l(e_i),l(v_j),l(v_k))とする。$\mu(e_i)$は各辺に与えられたメンバーシップ関数で辺の重みや重要度を示す値である。e_iは頂点v_jからv_kへの辺であり、l(e_i)、l(v_j)は各々の辺と頂点に付けられたラベルを表す。また、ファジィ・グラフの辺のメンバーシップの濃度を、$n(E)=\sum_{e\in E}\mu(e)$とする。そして、検索用語として登録されている言葉のファジィシソーラスをL=[S(l(e_i),l(e_j)] (1≦i,j≦m) 及びL'=[S(l(v_i),l(v_j)] (1≦i,j≦n)とする。Sは反射的対称的ファジィ関係とする。

検索はそれぞれの索引と検索キーとの間で類似度を計算することにより行われる。ここでは類似度として下式に示す2つの測度を考える。

$$M_1(E_I,E_Q)=\sum^{nQ}\left(\sum^{nI} m(e_{Ii},e_{Qj})/n(E_I)\right)/n(E_Q) \quad (1)$$

$$M_2(E_I, E_Q) = \sum^{n_Q} \max_{e_{Ii} \in E_I} \{m(e_{Ii}, e_{Qj})\} / n(E_Q) \quad (2)$$

ここで、n_I、n_Qはそれぞれ索引と検索キーのグラフにおける辺の数であり、

e_{Ii}：$(\mu(e_{Ii}), l(e_{Ii}), l(v_{Ik}), l(v_{Ip}))$

e_{Qj}：$(\mu(e_{Qj}), l(e_{Qj}), l(v_{Q1}), l(v_{Qq}))$

である。また、

$m(e_{Ii}, e_{Qj}) = \min \{\mu(e_{Ii}), \mu(e_{Qj}), S(l(e_{Ii}), l(e_{Qj})), S(l(v_{Ik}), l(v_{Q1})), S(l(v_{Ip}), l(v_{Qq}))\}$ (3)

とする。

上記2式の違いは、(1)式では検索キーの1辺と索引の全ての辺との類似度を加え合わせ、更に検索キーの他の辺でも同様に計算したものを加えた値であるが、(2)式では検索キーの1辺と索引の全ての辺との類似度の最大値を選び、他の辺でも同様の計算をしたものを加え合わせて全体の類似度とすることである。なお、類似度の正規化のために両式ではそれぞれ辺のメンバーシップの濃度で割っている。

これらの類似度について、以下に示す性質が成り立つ。まず、2つのファジィ・グラフE_I、E_Qについて、それらのメンバーシップを取り去って得られるクリスプなグラフを$C(E_I)$、$C(E_Q)$としよう。今、$C(E_I)$が$C(E_Q)$と同型な部分グラフを含むとき、これにE_Iのメンバーシップを付けたファジィ・グラフをE_I'とする。E_Qの各々の辺のメンバーシップの値が対応するE_I'のメンバーシップよりも大きくないならば、$E_I \supseteq E_Q$（E_IはE_Qを含む）と定義する。また、$E_I \supseteq E_Q$かつ$E_I \subseteq E_Q$のとき$E_I = E_Q$とする。

このとき、$E_I \supseteq E_Q$ならば、

$M_2(E_I, E_Q) = 1$

が成立する。また、

$M_1(E_I, E_Q) \leq M_2(E_I, E_Q)$

である。一方、

$M_1(E_I, E_Q) = M_2(E_I, E_Q) = 0$

となる必要十分条件はE_Iの任意の辺e_{Ii}とE_Qの任意の辺e_{Qj}について

$m(e_{Ii}, e_{Qj}) = 0$

となることである。

適用例

ここで、実際に検索の例を見ながら、検索手法を追ってみることにしよう。先の意味ネットワークの画像例を検索するものとし、索引として既に図2のグラフはデータベースに入力されているものとする。そこで検索キーを作成し、索引との類似度を求めることになる。検索キーの作成のため、「草上の昼餐」の内容を次のように想起する。「裸婦が帽子を被りステッキを持っている紳士の隣に座っている。もう一人の紳士が裸婦の後ろにいる。その紳士の奥の池の中に女性がいる。」これを、意味ネットワークに表現したものが図3である。更に索引データに変換すると図4になる。検索は図3,4に示すグラフの類似度を(1)、(2)式それぞれにより求めることにより行われる。類似度の計算の際には、それぞれのラベルの間の類似度を定めたファジィシソーラスを用いる。そのシソーラスを図5に示す。ただし、ここに示すシソーラスは簡略のため図2,4に含まれている言葉のみを抜きだして作成したものである。

索引と検索キーのグラフのマッチングを取ると、例えば検索キーのe_{Q1}と索引のe_{I1}との類似度は、

$\min \{\mu(e_{I1}), \mu(e_{Q1}), S(左,隣), S(裸婦,裸婦), S(男性,紳士)\}$

$= \min \{1.0, 1.0, 0.8, 1.0, 0.9\}$

$= 0.8$

他の辺との類似度を合わせて、

$\sum^{n_I} m(e_{Ii}, e_{Q1}) / n(E_I) = 0.28$

$\max_{e_{Ii} \in E_I} \{m(e_{Ii}, e_{Q1})\} = 0.8$

となり、(1)式と(2)式では値の大きさが相当異なる。また検索キーe_{I4}：「池は紳士の奥にある。」のような索引には存在しない関係の場合、その類似度は両式ともOとなる。結果として、この検索の類似度は

$M_1(E_I, E_Q) = 0.213$

$M_2(E_I, E_Q) = 0.789$

となる。このようにM_1に比べM_2の方が一般に値は大きくなる。

4．おわりに

検索のアルゴリズムにファジィ理論を導入した画像検索の方法は、画像の意味内容と検索キーに不確定性が存在する場合の適切な方法論となる。本稿では、索引や検索キーは意味ネットワークの構造を持つグラフに変換され、グラフ同士の照合により検索が行われる。現在、この方法による実験的なシステムを作成している。また、ここに示した方法はファジィ画像検索の様々な手法の一例に過ぎない。例えば、類似画の検索をパターン認識の方法を基にして行う（栗田他[3]、1990）方法はやはりファジィ検索の枠組みで論じることができると思われる。なお、本研究には科学研究費補助金一般研究(C)(01550321)を受けた。

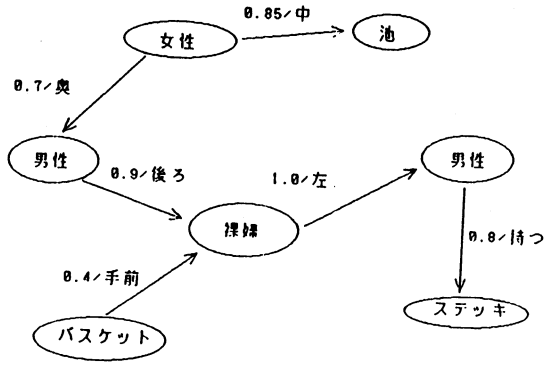


図1. 意味ネットワーク

e_{11}：（1.0，左，裸婦，男性）
e_{12}：（0.9，後ろ，男性，裸婦）
e_{13}：（0.85，中，女性，池）
e_{14}：（0.8，持つ，男性，ステッキ）
e_{15}：（0.7，奥，女性，男性）
e_{16}：（0.4，手前，バスケット，裸婦）

図2. ラベル付き有向ファジィ・グラフのデータ表現

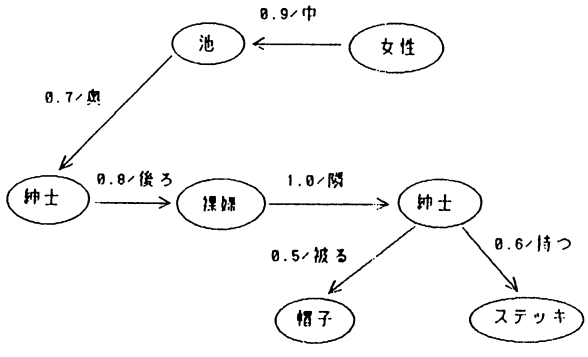


図3. 検索キーの意味ネットワーク

e_{Q1}：（1.0，隣，裸婦，紳士）
e_{Q2}：（0.9，中，女性，池）
e_{Q3}：（0.8，後ろ，紳士，裸婦）
e_{Q4}：（0.7，奥，池，紳士）
e_{Q5}：（0.6，持つ，紳士，ステッキ）
e_{Q6}：（0.5，被る，紳士，帽子）

図4. 図3のデータ表現

池	1.0	0	0	0	0	0	0	0
女性	0	1.0	0	0	0	0	0	0.9
紳士	0	0	1.0	0	0.9	0	0	0
ステッキ	0	0	0	1.0	0	0.7	0.5	0
男性	0	0	0.9	0	1.0	0	0	0
帽子	0	0	0	0.7	0	1.0	0.6	0
バスケット	0	0	0	0.5	0	0.6	1.0	0
裸婦	0	0.9	0	0	0	0	0	1.0

後ろ	1.0	0.8	0	0	0.5	0.3	0.5	0
奥	0.8	1.0	0	0	0.5	0.3	0.5	0
被る	0	0	1.0	0	0	0	0	0.7
手前	0	0	0	1.0	0.5	0.3	0.5	0
隣	0.5	0.5	0	0.5	1.0	0.2	0.8	0
中	0.3	0.3	0	0.3	0.2	1.0	0.4	0
左	0.5	0.5	0	0.5	0.8	0.4	1.0	0
持つ	0	0	0.7	0	0	0	0	1.0

図5. ファジィシソーラス（一部）

参考文献

1．坂内正夫，画像検索技術，1988，電子情報通信学会誌 Vol.71 No.9 pp.911-914

2．John R. Anderson，COGNITIVE PSYCHOLOGY AND ITS IMPLICATIONS，1980，W. H. Freedman&Company

3．栗田、下垣、加藤，主観的類似度に適応した画像検索，1990，情報処理学会論文誌 Vol.31 No.2 pp.227-237

問い合わせ先：〒305 つくば市天王台1-1-1
筑波大学 電子・情報工学系
宮本定明
Tel 0298-53-5540
Fax 0298-53-5206

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SA1-2

ファジィ理論を用いた手書き数字の認識

Handwritten Numeric Character Recognition Using Fuzzy Theory

中田　浩史　　佐野　学　　田中　一男
Hirofumi NAKATA,　Manabu SANO,　Kazuo TANAKA

金沢大学工学部機械システム工学科
Department of Mechanical Systems Engineering, Kanazawa University

We think that numeric characters are made from basic elements, straight lines, curved lines and circles. In division process , handwritten numeric character is divided into sub-patterns on feature points. The similarity to basic elements and the position and direction of the sub-patterns are evaluated and their grades are determined to each feature parameters. The fuzzy relation is constructed from their parameters. In fuzzy recognition process, composition of fuzzy relation for input pattern and reference pattern is calculated. Maximum class of fuzzy sets obtained by composition is categorized to numeric character of input pattern.

1. はじめに

パターンの持つ構造を利用することにより認識を行う構造的パターン認識[1]がある。その基本的な考え方はパターンをいくつかの部分パターンに分割し，抽出された部分パターンがあらかじめ決められた基本要素のいずれに該当するかを識別し，いくつかの基本要素により入力パターンの構造を記述することである。本研究では数字パターンが｛直線，曲線，円｝という3種類の基本要素から構成されると考え，入力数字パターンを部分パターンに分割した後，部分パターンの基本要素との類似度，位置，方向をファジィ関係で表わし，これと参照パターンのファジィ関係との合成により認識を行う手法について述べる。同時に入力された手書き数字パターンを用いてファジィ関係の学習を行う。

2. 認識システム

図1に認識システムの概要を示す。手書き数字をイメージスキャナにより2値化し，コンピュータに取り込む。次に前処理を行う。ここでは重心による位置の正規化，６４×６４メッシュへのスケーリングと正規化を行った後 Hilditch[2]の細線化処理を行う。細線化された数字パターンを特徴点（端点，分岐点，交点，屈折点）により部分パターンに分割する。分割された部分パターンが基本要素｛直線，曲線，円｝のいずれに該当するかを基本要素の類似度で表わし，さらに位置，方向もメンバーシップ関数により，それぞれファジィ集合のグレード［０，１］で表わす。このようにして得られた部分パターンのデータ（ファジィ関係の要素）と参照パターンのファジィ関係から合成を行うことによりクラス｛０～９｝に対するファジィ集合が決定される。入力数字パターンに対するファジィ集合は部分パターンのファジィ集合をｍｉｎ演算することにより求められ，そのファジィ集合のｍａｘ値を示すクラスが入力数字パターンを表わす。また入力した手書き数字パターンのデータとファジィ関係を用いてファジィ関係の学習と認識を同時に行う。

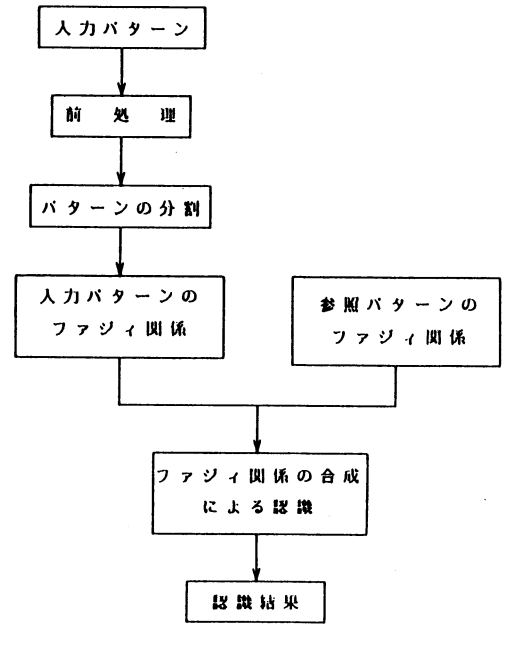


図1　認識システム

2．1　部分パターンの分割

部分パターンの分割は以下の手順で行う。

step1:端点からパターンの追跡を始め，他の端点に達するまで行う。その際，下記のことに注意する。

- 入力パターンに屈折点がある場合には屈折点で分割する。

◦追跡途中で分岐点（または交点）に達した場合はそこに至るまでの方向を求め，その方向に近い分岐点（または交点）の分枝に進む。

step2:端点に達すると追跡した点の座標値を保存し，部分パターンとする。

step3:step1，step2で追跡した点以外に点が残っている場合はstep1に戻り，無くなるまで追跡を繰り返す。

（特殊な場合）

◦端点の無い場合は任意の点から追跡を開始する。

◦端点が１つだけの場合や端点が無くて分岐点（または交点）がある場合はそこで分割する。

図２は分岐点，交点，屈折点での分割の様相を示している。

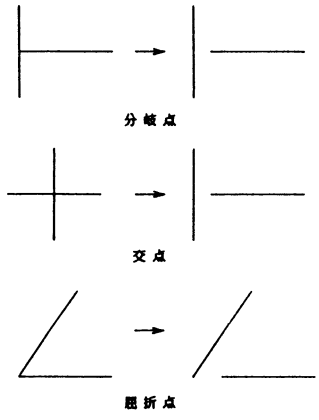


図２　特徴点での分割

2．2　基本要素の識別と入力パターンの構造

部分パターンは前述の細線化により線要素となる。以下，識別には曲率Ｐ[3]，チェインコードＣ[4]，始点-終点間の距離Ｄ という特徴を用いる。

ある点Ｐｉにおける曲率とは，前後のｎ点離れた点Ｐｉ-ｎ と点Ｐｉ を結ぶベクトル $\overrightarrow{Pi\text{-}nPi}$ と点Ｐｉと点Ｐｉ+ｎを結ぶベクトル $\overrightarrow{PiPi+n}$ のなす角（図３のΔｉ）である。

また線要素の方向を表現するためにチェインコードを用いる。チェインコードとは図４のような方向を表わすコードとして定義されていて，線要素を構成する点列におけるコードのうち多数を占めるコードを調べることにより線要素の大まかな方向を表わすものである。

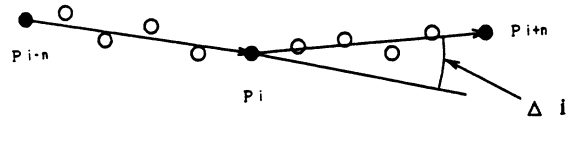


図３　部分パターンの曲率

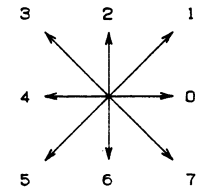


図４　チェインコード

まず，図５に示すように部分パターンの平均曲率Ｐ，部分パターンにおけるチェインコードの割合Ｃ，部分パターンの長さに対する始点-終点間の距離の比Ｄを基に部分パターンが基本要素のいずれであるかを判別する。ただし，基本要素のどれか一つに決定するのではなく，各基本要素の類似度をグレードで表わす。ここで，図５中の変数は以下のように定義されている。

Ｐ：部分パターンの平均曲率（deg）

Ｃ：部分パターンの全コードに対する主方向のコードの割合（％）

Ｄ：部分パターンの長さに対する始点と終点の距離の割合（％）

Ｈ：部分パターンの水平方向重心座標（ドット）

Ｖ：部分パターンの垂直方向重心座標（ドット）

また，ラベルは次のとおりである。

SP = Small P	LH = Left Horizontal
BP = Big P	RH = Right Horizontal
SC = Small Code	UV = Up Vertical
MC = Medium Code	MV = Medium Vertical
BC = Big Code	DV = Down Vertical
SD = Small Distance	
MD = Medium Distance	
BD = Big Distance	

基本要素の類似度は，それぞれ次の式で記述できる。

直線らしさのグレード＝ＳＰ×ＢＣ×ＢＤ

曲線らしさのグレード＝ＢＰ×ＭＣ×ＭＤ

円らしさのグレード　＝ＢＰ×ＳＣ×ＳＤ

各基本要素の類似度のグレードは基本要素の中でグレードが最大のものを１．０とし，それをもとに他のグレードを正規化する。以上より部分パターンが基本要素のいずれに該当するかがファジィ集合の形で表わされる。

部分パターンの位置，方向についても同様に数値化を行う。まず部分パターンの重心を求め，そのｘ座標とｙ座標から｛左，右｝，｛上，中，下｝の位置をグレードで表わす。（図５）また部分パターンの方向を大きく分けて図６に示すような４方向についてそれぞれグレードで表わす。

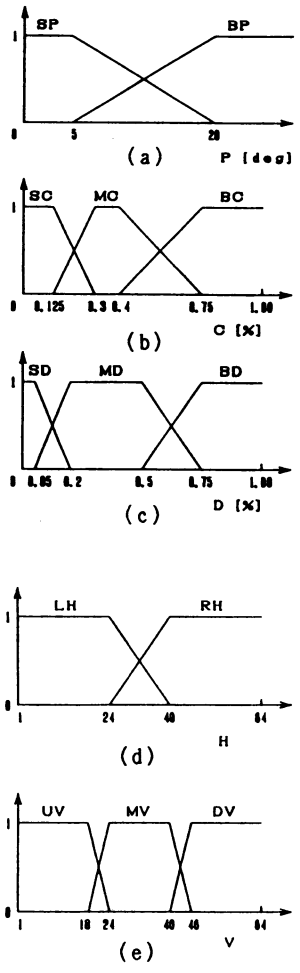


図5　部分パターンのメンバーシップ関数

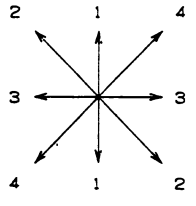


図6　部分パターンの方向

2．3　ファジィ関係

A_1, A_2, A_3, A_4, BをそれぞれA_1：基本要素, A_2, A_3：位置, A_4：方向, B：クラスに対する集合とし, 以下のように定義する。

A_1＝｛直線, 曲線, 円｝, A_2＝｛左, 右｝,

A_3＝｛上, 下｝, A_4＝｛1, 2, 3, 4｝,

B ＝｛0, 1, 2, …, 9｝

各集合の要素を

$x_1 \subset A_1$, $x_2 \subset A_2$, $x_3 \subset A_3$, $x_4 \subset A_4$, $y \subset B$

とする。

この時, ファジィ関係は,

$$\mu_R(x_1, x_2, x_3, x_4, y) = \mu_{A1}(x_1) * \mu_{A2}(x_2) * \mu_{A3}(x_3) * \mu_{A4}(x_4) * \mu_B(y) \quad (1)$$

となる[5]。ただし, ＊はT－ｎｏｒｍである。T－ｎｏｒｍとして代数積を使用する。

入力数字パターンを認識するためにはある程度ファジィ関係を学習させる必要がある。ここでは次のような簡単な学習方法を用いる。

まず, ｉ回学習後のファジィ関係をR(i)と書くことにする。以下, 学習の手順を示す。

step1: ファジィ関係R(0)のメンバーシップ値は

$$\mu_{R(0)}(x_1, x_2, x_3, x_4, y) = 0 \quad (2)$$

step2: a(1)をx_1, x_2, x_3, x_4, yの5次元のファジィ関係の全ての要素のｍａｘ値とし, これを用いて正規化を行う。ここで

$$a(1) = \max_{x1, x2, x3, x4, y} \mu_{R(1)}(x_1, x_2, x_3, x_4, y) \quad (3)$$

また, ΔR(1)は1回目に入力された文字のすべてのファジィ関係の総和であり, 次のように書ける。

$$\Delta R(1) = \sum_{j=1}^{m} R_j(i) \quad (4)$$

$$j = 1 \sim m$$

step3: 1回目に入力された文字のデータを用いて作成したファジィ関係をR(1)とすると,

$$R(1) = (R(0) + \Delta R(1)) / a(1) \quad (5)$$

step4: n回目に入力された文字のデータを用いて作成したファジィ関係をR(n)とすると,

$$R(n) = (R(n-1)) + \Delta R(n)) / a(n) \quad (6)$$

このように数字パターンのデータをn回学習して得られたファジィ関係R(n)を用いて入力数字パターンを認識する。

2．4　認　識

前節で求めたファジィ関係R(n)と部分パターンのデータより認識を行う。入力数字パターンのｊ番目の部分パターンのデータをA_{1j}, A_{2j}, A_{3j}, A_{4j}とすると, ｊ番目の基本要素の各クラスに対するファジィ集合B_jは,

$$B_j = A_{1j} \circ A_{2j} \circ A_{3j} \circ A_{4j} \circ R(n) \quad (7)$$

と表わされる。ただし∘はｍａｘ-ｐｒｏｄｕｃｔ合成を示している。これから, 入力数字パターンの各クラスに対するファジィ集合Bは,

$$\mu_B(y) = \min_j \mu_{Bj}(y) \quad (8)$$

と表わされる。以上より，ファジィ集合Ｂのｍａｘ値を示すクラスを認識結果とする。ただし，０や１のように部分パターン数が１個の場合はｍａｘ-ｐｒｏｄｕｃｔ合成が意味をなさないため，ファジィ集合Ｂ中のクラス０と１のグレードの大きいクラスを認識結果とする。

（例）

以下に「６」の入力パターンに対する認識の様子を示す。まず図７のように２つの部分パターンに分けられる。

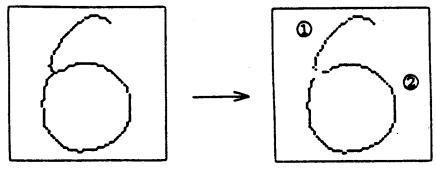


図７　部分パターンへの分割

この時，部分パターンに対するデータは表１のようになる。

表１　部分パターンのデータ

	基本要素			位　置(1)		位　置(2)			方　向			
	直線	曲線	円	左	右	上	中	下	1	2	3	4
部分パターン①	0.355	1.000	0.000	1.000	0.260	1.000	0.000	0.000	0.400	0.267	0.467	1.000
部分パターン②	0.000	0.000	1.000	0.959	1.000	0.000	1.000	0.722	1.000	0.888	0.906	0.531
部分パターン③	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－

これらの部分パターンに対するデータと「６」の参照パターンのファジィ関係より各部分パターンに対するファジィ集合が図８のように得られる。

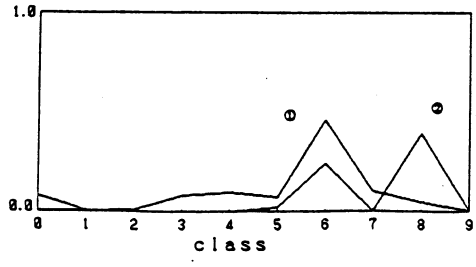


図８　「６」の部分パターンのファジィ集合

これらの集合のｍｉｎ演算を行うことによって図９のファジィ集合が得られる。

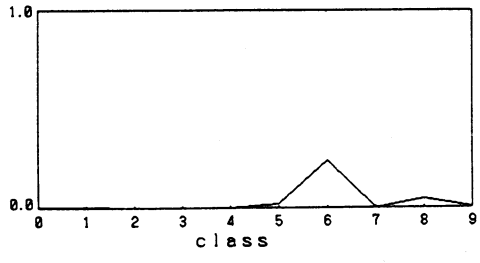


図９　入力パターンのファジィ集合

３．実験結果

１７人に０～９までの手書き数字を書いてもらい，以上の方法を用いて実際に認識実験を行った。

その結果は図１０に示すようになり，平均認識率は91.0 %であった。

図１０　手書き数字の認識率

４．むすび

本方法ではパターンの分割過程が非常に重要であり，走り書き数字などは，うまく分割できず認識が不可能となることが明らかになった。また，部分パターン間の結合状態に関する変数をファジィ関係の要素に付け加えることが必要であり，このことにより認識率の向上が見込まれる。

参考文献

［１］長尾，松山：構造的パターン認識［Ｉ］，計測と制御，Vol.20，No.4，33-42，(1981)

［２］C.J.Hilditch：Linear Skeltons from Square Cupboads，in Machine Intelligence Ⅳ，B.Meltzer and D.Michie，University Press，Edinburgh，403-420，(1969)

［３］長尾，ほか（共訳）：ディジタル画像処理，近代科学社，(1978)

［４］H.Freeman：On the Encoding of Arbitary Geometric Configurations，IRE Trans. Electron. Comput.，EC-10，260-268，(1961)

［５］W.Pedrycz ：An Identification Algorithm in Fuzzy Relational Systems，Fuzzy Sets and Systems 13，153-167，(1984)

問い合わせ先

〒920 金沢市小立野2-4-20

金沢大学工学部機械システム工学科　佐野　学

TEL 0762-61-2101 EXT.263，FAX 0762-63-3849

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SA1-3

ファジィ構造モデルの官能検査への適用

Application of Fuzzy Structural Modeling to Sensory Evaluation

長沢　伸也
Shin'ya NAGASAWA
亜細亜大学経営学部
Dept. of Bus. Admin., Asia Univ.

The main purpose of applying Fuzzy Structural Modeling to sensory evaluation is to construct a graphic representation of the hierarchic rearrangement, given a necessary information concerning the preference between each sample for paired comparisons. In order to demonstrate how the proposed method works, a practical example is given in which the structure of pired comparisons has been successfully identified.

1. 緒　　言

官能検査とは、人間の感覚を使って行う検査をいう（JIS Z 9041）。所謂「感性の時代」を迎えている今日、嗜好や好き嫌いといった選好に関する感性品質を評価する手法として官能検査手法が改めて注目されている。

官能検査手法として様々な手法があるが、選好に関して一対比較を行った評点による官能検査データは、代表的な官能検査手法であるSchefféの一対比較法[1]（各変法を含む）により解析するのが一般的である。しかし、このようなデータは、人間の主観や曖昧さを伴うので、Schefféの一対比較法により解析を行うことは必ずしも適切ではない。

そこで、本研究では、複雑な社会システムの構造同定を行うための手法であるファジィ構造モデル[2][3](Fuzzy Structural Modeling, ＦＳＭ法）をこのような官能検査に適用することを提案し、そのための適用方法や適用例、および、その有効性について述べる。

2. Schefféの一対比較法の概要と問題点

2.1 Schefféの一対比較法の概要[1]

官能検査では評価の基準が明瞭でなく変動しやすいため判断しにくい場合が多いが、二つのものを比較して評点をつける程度なら割合い簡単に行えるので、一対比較法は実際によく使われている。その代表的な方法であるSchefféの一対比較法では、評価対象を２個ずつ対にして比較した結果を表１のような点数で表わし、これに適当な構造を仮定して分散分析を行う。実用上の目的からSchefféの原法に対して表２の各変法が考えられている。

2.2 Schefféの一対比較法の問題点

このような官能検査データをSchefféの一対比較法により解析を行うことは、以下の問題点が考えられるため必ずしも適切ではない。

(1) 曖昧な評点を間隔尺度とみなす問題
(2) 構造式における仮定の妥当性の問題
(3) 選好関係の階層構造が不明瞭な問題[4]
(4) 推移律が成立しない場合の検出の問題[5]

表１　一対比較法で用いられる評点の例

評　　価	点数
A_iがA_jに比べて非常に良いとき	＋２点
A_iがA_jに比べて幾分良いとき	＋１点
A_iがA_jと同じ良さであるとき	０点
A_iがA_jに比べて幾分悪いとき	－１点
A_iがA_jに比べて非常に悪いとき	－２点

表２　Schefféの一対比較原法と各変法の関係

		１人の検査員が検査する試料対	
		１対のみ	全ての対
順序効果	考える	Schefféの原法	浦の変法
	考えない	芳賀の変法	中屋の変法

3. ＦＳＭ法の概要[2),3)]

ＦＳＭ法は、多元的価値が錯綜する社会システムの構造同定を行うために提案された手法である。以下に、ＦＳＭ法の概要を述べる。

3.1 ＦＳＭ法に対する数学的定義

集合$S=\{s_1, s_2, \cdots, s_n\}$の要素間のファジィ２項関係に関するメンバーシップ関数f_r, $f_{\bar{r}}$を式(1)で定義し、式(2)の関係を与える。

$$f_r, f_{\bar{r}} : S \times S \rightarrow [0,1] \qquad (1)$$

$$f_{\bar{r}} = \frac{1-f_r}{1+\lambda f_r}, \quad -1 < \lambda < \infty \qquad (2)$$

pが半開区間(0,1]の実数であらかじめ与えられたとき、f_rについて以下の定義をする。

[定義１]“$\forall (s_i, s_i) \in S \times S$に対して、$f_r(s_i, s_i) \leqq p$が満足されるならば、ファジィ非反射律が成り立つ”。

[定義２]“$\forall (s_i, s_j) \in S \times S, (i \neq j)$に対して$f_r(s_i, s_j) < p$または$f_r(s_j, s_i) < p$が成り立つならばファジィ非対称律が成り立つ”。

[定義３]“$\forall (s_i, s_j), (s_j, s_k), (s_i, s_k) \in S \times S, (i \neq j, j \neq k, i \neq k)$に対して$f_r(s_i, s_k) \geqq M$ $(M = \bigvee_{j=1}^{n} (f_r(s_i, s_j) \wedge f_r(s_j, s_k)) \geqq p)$が満足されるならばファジィ半推移律が成り立つ”。ここで$\bigvee_i a_i$は$\max\{a_i\}$, $a \wedge b$は$\min(a, b)$.

3.2 ＦＳＭ法によるシステム構造化の手順

(1) ファジィ非反射律、ファジィ非対称律を満たすようにファジィ従属行列Ａを設定し、ファジィ半推移律を満たすように修正する。

(2) 最上層レベル集合$L_t(s)$, 最下層レベル集合$L_b(s)$等を求め、$L_t(s)$と$L_b(s)$の従属関係よりブロックQ_jを決定する。

(3) $L_t(s)$の要素については行を、$L_b(s)$の要素については列を消去し、行列Ａを得る。

(4) 上で求めたＡを各ブロックに対応させて分割し、単一ハイアラーキ行列$A^{(j)}$を作る。

(5) それぞれの$A^{(j)}$に関して、システムの構造を決定（グラフ化）する。s_jに対するレギュラー行を$s_{ik}, k=1,2,\cdots,m$とすると、s_{ik}列を $[a_{\cdot j}^{*}] = [a_{\cdot j}] \wedge [\overline{a_{\cdot i1}}] \wedge \cdots \wedge [\overline{a_{\cdot im}}]$で置き換えて$s_{ik}$行を消去する。ここで、$[a_{\cdot i}], [a_{i \cdot}]$は、それぞれｉ列ベクトル、ｉ行ベクトルを表わす。レギュラー行およびレギュラー列が存在しないならば、最も低次の行をレギュラー行に分割する。ただし、$a_{ij} \geqq p$を満たすｊ$(=1,2,\cdots,n)$がただ一つ存在するとき、行ｉをレギュラー行という。

4. ＦＳＭ法の官能検査への適用

4.1 ＦＳＭ法の官能検査への適用方法

(1) ＦＳＭ法では、ファジィ従属行列Ａの要素a_{ij}は“項目s_iは項目s_jよりa_{ij}程度重要である”ことを示す。これを官能検査に適用するには、“試料s_iは試料s_jよりa_{ij}程度よい”という選好度として与える。

(2) 回答は、[0,1]で定義されるメンバシップ関数を 0.1刻みとした場合に対応する11段階評価で行う（要工夫）。被験者のメンバシップ関数のメジアンまたは平均値よりファジィ従属行列Ａの要素a_{ij}を与える。

(3) ファジィ構造パラメータ$\lambda \neq 0$とすることで順序効果を考慮することができる[5]。

4.2 官能検査手法としてのＦＳＭ法の特長

前述のような一対比較法の問題点に対して、ＦＳＭ法ではそれぞれ次のように解決される。

(1) 間隔尺度の問題　ＦＳＭ法では、人間の曖昧な主観評価値を間隔尺度としてではなくメンバシップ関数として取扱い、ファジィ２項関係およびファジィ代数を利用する。

(2) 構造式の仮定の問題　ＦＳＭ法では、数学的定義以外には、線形構造や誤差の独立性および正規性などを仮定する必要はない。

(3) 階層構造が不明瞭な問題　ＦＳＭ法では、選好構造を１次元的な平均嗜好度ではなく、ファジィ構造グラフとして多元的に表わす。

(4) 推移律が成立しない場合の問題　ＦＳＭ法では、サイクリックパス（一巡多角形）の存在を判定し、これを処理して全体としての選好構造も一応は得ることができる[2]。

5. ＦＳＭ法の官能検査への適用例[6]

ここでは、マンションの外観評価に関する一対比較実験データの解析にＦＳＭ法を適用した例を示して、その有効性を示す。

5.1 一対比較実験の概要

14棟のマンションを実験対象とし、竣工写真を提示して「デザインがよい」等の５評価項目について${}_{14}C_2 = 91$通りの一対比較実験を実施した。被験者は若い男女14名である。

5.2 Schefféの一対比較法による解析

「デザインがよい」についての実験結果をSchefféの一対比較法(中屋の変法)により解析し平均嗜好度を求めると図１のようになる。これより、平均嗜好度の有意差検定を行うと試料数が多いため有意差の有無が複雑になり、選好関係を階層化することは容易ではない[4]。

5.3 ＦＳＭ法による解析

「デザインがよい」について、手順に従い閾値$p = 0.60$, ファジィ構造パラメータ$\lambda = 0$の場合の構造同定を行うと 図２(a)のファジィ構造グラフを得る。「美しい」についても同様にグラフ化した結果を図２(b)に示す。

5.4 考　　察

図１の平均嗜好度の尺度図と比べてＦＳＭ法では選好構造が多元的に表現されている。また、同一の閾値ｐに対し、①サイクリックパスが存在しないかどうか②多くの階層に分かれるかという観点から、評価項目として被験者の判断が確立しているか否かを構造グラフにより判定することもできる。なお、サイクリックパスは中間層レベルに現われている。

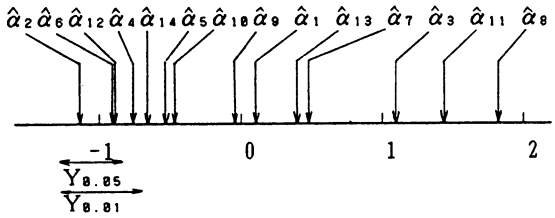
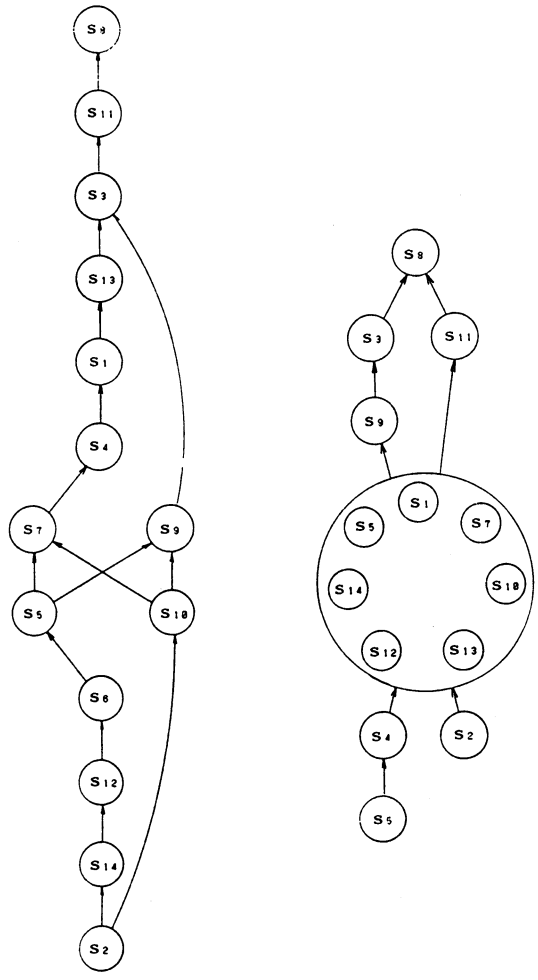


図１　平均嗜好度 $\hat{\alpha}_i$ の尺度図



(a)「デザインがよい」　　(b)「美しい」

図２　ファジィ構造グラフ（ｐ＝0.60, λ＝0)

6．結　　言

本研究では、官能検査における一対比較による選好を対象として、ファジィ構造モデルにより階層化を行い、選好構造を多元的に表現するという「ファジィ一対比較法」を提案した。ファジィ構造モデルは、社会システムの構造同定のための手法ではあるが、官能検査手法としても活用されてよいと考えられる。

謝　　辞

実験および解析に御協力戴いた前田建設工業㈱横浜支店ならびに産能大学　富岡、八幡、石井、永田、稲好、定松の各君に深謝します。なお、本研究は平成２年度文部省科学研究費奨励研究（№02730045）の補助を受けている。

参考文献

1)日科技連官能検査委員会編：新版官能検査ハンドブック、日科技連出版社（1973).

2)田崎栄一郎、天笠美知夫、滝沢雅人：あいまい理論によるシステムの構造モデル、日本ＯＲ学会論文誌、20, 285/310 (1977).

3)Tazaki, E. and Amagasa, M: Structural Modeling in a Class of Systems Using Fuzzy Sets Theory, Int. Jour. Fuzzy Sets and Systems, 2, 87/103 (1979).

4)長沢伸也：構造モデルによる選好構造の階層化(1)、日本人間工学会第31回大会講演集、162/163 (1990).

5)長沢伸也：ファジィ理論の品質管理への応用(5)、日本品質管理学会第35回研究発表会研究発表要旨集、81/84 (1989).

6)長沢伸也：同(7)、同第37回研究発表会研究発表要旨集、41/44 (1990).

［問い合わせ先］

〒180 東京都武蔵野市境5-24-10

亜細亜大学経営学部

長沢　伸也

TEL: 0422-54-3111 内422

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SA2-1

リアプノフの直接法を用いたファジィシステムの安定解析とリアプノフ関数の構成法について

Stability Analysis of Fuzzy Systems Using Lyaspunov's Direct Method and Construction Procedure for Lyapunov Functions

田中　一男	金沢大学	機械システム工学科
Kazuo TANAKA	Kanazawa University	Department of Mecanical Systems Engineering
菅野　道夫	東京工業大学	システム科学専攻
Michio SUGENO	Tokyo Institute of Technology	Department of Systems Science

This paper discusses the stability analysis of fuzzy control systems. A sufficent condition which guarantees the stability of a fuzzy system is obtained in terms of Lyapunov's direct method. Moreover, some conditions for the existence of a Lyapunov function are derived. Next, the construction procedure for Lyapunov functions is proposed in order to find a Lyapunov function as effectively as possible. Finally, some examples for the procedure are shown.

1．はじめに

ファジィ制御の安定解析に関するKiska[1]、Kania[2]、Tong[3]らの論文は実際の制御系設計に適用可能であるかどうかは疑問である。その理由は実際の安定論の観点に立つものではなく、その理論的根拠に乏しいからである。我々はすでにファジィシステムの安定判別を行なうために必要な安定定理を安定論の立場にそって導出し、制御系設計に適用した[4,5]。

リアプノフ関数による安定判別の特徴は非線形微分方程式を解くことなしに平衡状態の性質を知ることができることである。しかし、実際は適切なリアプノフ関数をいかに見つけるかということが重要な問題になる。そこで、本論文では効果的にリアプノフ関数を構成する方法を提案する。

2．ファジィモデル

本研究で用いるファジィモデルは高木、菅野[9]によって提案されたものである。高木、菅野のファジィモデルの規則は自由系のダイナミックモデルの場合には次の形で記述される。

$$L^i: \text{IF } x(k) \text{ is } A_1^i \text{ and } \cdots \text{ and } x(k-n+1) \text{ is } A_n^i \text{ THEN}$$
$$x^i(k+1) = a_1^i x(k) + \cdots + a_n^i x(k-n+1) \quad (1)$$

ここで、L^i $(i=1,2,\cdots,\ell)$は i 番目のルールであることを示している。ℓはルール数である。A_j^i $(j=1,2,\cdots,n)$、B_h^i $(h=1,2,\cdots,m)$はファジィ集合である。$x(k)$～$x(k-n+1)$は状態変数、$x^i(k+1)$は i 番目の規則からの出力、a^iは i 番目の規則の後件部のパラメータである。

推論値は、(2)式に示すような重み付き平均で求められる。

$$x(k+1) = \left(\sum_{i=1}^{\ell} w^i x^i(k+1)\right) / \sum_{i=1}^{\ell} w^i \quad (2)$$

ここで、w^iは i 番目の規則の前件部の適合度であり、次のように求められる。

$$w^i = \prod_{j=1}^{n} A_j^i(x(k-j+1)) \quad (3)$$

$A_j^i(x(k-j+1))$は、ファジィ集合A_j^iの$x(k-j+1)$におけるグレードである。

まず、(1)式の後件部の線形式を次のような行列表現の状態方程式に書き換える。

$$A_i \boldsymbol{x}(k) \quad i=1,\cdots,\ell \quad (4)$$

ここで、$\boldsymbol{x}(k)=[x(k),\cdots,x(k-n+1)]^T$、

$$A_i = \begin{bmatrix} a_1^i & a_2^i & \cdots & a_{n-1}^i & a_n^i \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

である。実際は(4)式に示した ℓ個の状態方程式の重み付き平均で求められるので(2)式は次のようになる。

$$\boldsymbol{x}(k+1) = \frac{\sum_{i=1}^{\ell} w^i A_i}{\sum_{i=1}^{\ell} w^i} \boldsymbol{x}(k) \quad (5)$$

(1)式に示したルール記述の特徴は、後件部がファジィ集合ではなく入出力関係式で表現されていることである。(1)式に示した規則のパラメータをシステムの入出力データを使って同定する手法[7,8]が提案されているが、ここでは、モデルの同定からはなれて、すでに(1)式が得られているものとしてファジィ制御系の安定解析について考えることにする。

3．ファジィ制御系の安定解析

(5)式で表現されるファジィシステムの安定定理は次のように与えられている。

定理3-1 （ファジィシステムの安定定理）[4,5,6]

次の条件を満たす正定対称行列$\mathbb{P}$が存在するならば(5)式で示されるファジィシステムは大域的漸近安定である。

$\forall i \in \{1,2,\cdots, \ell\}$に対して

$$A_i^T \mathbb{P} A_i - \mathbb{P} < 0 \qquad (6)$$

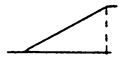
この定理はファジィシステムの安定性に関する十分条件となっている。とくに、(6)式に示した条件はすべての規則の後件部の線形式が大域的漸近安定であるという条件と等価ではなく、この条件よりも厳しいことに注意する必要がある。実際、すべての後件部の線形式が大域的漸近安定であっても、それらが集まって構成するファジィシステムは大域的漸近安定でない場合があることに注意しなければならない。その例を次に示す。

例題3-1[6]

次のファジィシステムを考える。

L^1: IF x(k-1) is

THEN $x^1(k+1)=x(k)-0.5x(k-1)$

L^2: IF x(k-1) is 

THEN $x^2(k+1)=-x(k)-0.5x(k-1)$

このファジィシステムの２つの規則の後件部の線形式はともに安定である。しかし、その挙動はFig.1に示すように不安定となる。

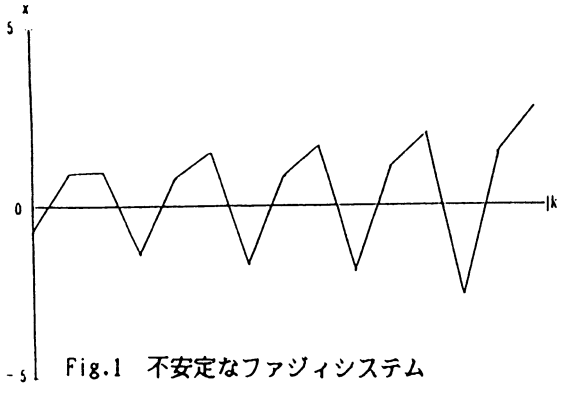


Fig.1 不安定なファジィシステム

4. リアプノフ関数の構成法

リアプノフ関数による安定判別は(6)式を満たすような$\mathbb{P}$を見つけられればよいのであるが、実際にはこの$\mathbb{P}$をどのように見つけるかが問題となる。そこで、できるだけ効率よく(6)式を満たす$\mathbb{P}$を見つける手順を提案する。まず、$\mathbb{P}$の存在性に対する次のような必要条件を与える。

定理4-1[5,6]

$\forall i \in \{1,2,\cdots, \ell\}$に対して$A_i$は安定かつ正則行列とする。このとき、$\forall i \in \{1,2,\cdots, \ell\}$に対して

$$A_i^T \mathbb{P} A_i - \mathbb{P} < 0$$

なる正定対称行列$\mathbb{P}$が存在するならば、$\forall i,j \in \{1,2,\cdots, \ell\}$に対して$A_i A_j$は安定行列である。

この定理の対偶は「$A_i A_j$の中の少なくともひとつの行列が不安定行列ならば(6)式を満たすような正定対称行列$\mathbb{P}$が存在しない」である。これだけでは正定対称行列$\mathbb{P}$を効率よく見つけることはできない。

いま、次の行列を仮定する。

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad \mathbb{P}=\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} \quad \mathbb{Q}=\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{12} & q_{22} \end{bmatrix}$$

ここで、$\mathbb{P}$、$\mathbb{Q}$は正定対称行列とし、次の条件を満たすものとする。

$$A^T \mathbb{P} A - \mathbb{P} = -\mathbb{Q} \qquad (7)$$

(7)式は次のように変換できる。

$$\begin{bmatrix} a_{11}^2-1 & 2a_{11}a_{21} & a_{21}^2 \\ a_{11}a_{12} & a_{11}a_{22}+a_{12}a_{21}-1 & a_{21}a_{22} \\ a_{12}^2 & 2a_{12}a_{22} & a_{22}^2-1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{11} \\ p_{12} \\ p_{22} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} q_{11} \\ q_{12} \\ q_{22} \end{bmatrix}$$

この変換は２つの写像ηとθを使って(8)式のように一般的に表現できる。

$$\eta(A)\theta(\mathbb{P}) = -\theta(\mathbb{Q}) \qquad (8)$$

ここで、A、$\mathbb{P}$、$\mathbb{Q} \in R^{n \times n}$

$$\eta(A) \in R^{m \times m} \quad \theta(\mathbb{P})、\theta(\mathbb{Q}) \in R^m, \quad m = \frac{n(n+1)}{2}$$

θはbijectionであることに注意する。(7)式を直接コンピュータで解くことはできない。しかし、(8)式の場合はθがbijectionであるので、$\eta(A)$が正則行列ならば次のように解ける。

$$\mathbb{P} = \theta^{-1}\{-(\eta(A))^{-1}\theta(\mathbb{Q})\} \qquad (9)$$

次に、この２つの写像ηとθを使って$\mathbb{P}$の存在性に対する必要十分条件を示す。

定理4-2[10]

A_1、A_2は安定行列、$\eta(A_1)$、$\eta(A_2)$は正則行列とする。ことのき、

$$\theta^{-1}\{G\theta(\mathbb{Q})\} > 0$$

となる正定対称行列$\mathbb{Q}$が存在する。ここで、

$$G = \eta(A_2)(\eta(A_1))^{-1} \quad \text{である。}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$A_1^T \mathbb{P} A_1 - \mathbb{P} < 0, \quad A_2^T \mathbb{P} A_2 - \mathbb{P} < 0$$

なる正定対称行列$\mathbb{P}$が存在する。

証明　　略

系4-1

$\forall i \in \{1,2,\cdots, \ell\}$に対して$A_i$は安定行列、$\eta(A_i)$は正則行列とする。このとき、$\forall j \in \{2,\cdots, \ell\}$に対して

$$\theta^{-1}\{G_j \theta(Q)) > 0$$

となる正定対称行列Qが存在する。ここで、

$$G_j = \eta(A_j)(\eta(A_1))^{-1}$$

である。

$\Leftrightarrow$

$\forall i \in \{1,2,\cdots, \ell\}$に対して

$$A_i^T P A_i - P < 0$$

なる正定対称行列Pが存在する。

証明

定理4-2よりあきらか。

系4-1から、任意の正定対称行列Qに対して

$$\theta^{-1}\{G_j \theta(Q)) \not> 0$$

となるような$\{2,\cdots, \ell\}$の集合のある要素jが存在するならば、

$$A_i^T P A_i - P < 0$$

なる正定対称行列Pが存在しないことがわかる。

以上の定理および系から正定対称行列Pを構成するための手順を次に示す。以下ではすべてのA_iは安定行列であるとする。

<リアプノフ関数の構成手順>

(step 1)

$\forall i,j \in \{1,2,\cdots, \ell\}$に対して$A_i A_j$を計算する。次に定理4-1を使って$P$の存在性をチェックする。もし、$P$が存在しなければ(step 1)で終了する。

(step 2)

$\forall i \in \{1,2,\cdots, \ell\}$に対して

$$P_i = \theta^{-1}\{-(\eta(A_i))^{-1}\theta(Q_i))$$

なるP_iを計算する。ここで、Q_iはある正定対称行列である。

(step 3)

$\forall i \in \{1,2,\cdots, \ell\}$に対して

$$A_i^T P_j A_i - P_j < 0$$

となる $\{P_i \mid i=1,2,\cdots, \ell\}$ のある要素P_jが存在するならば、そのP_j をPとし終了する。(step 3)でP_j が見つからないときは(step 4)を実行する。

(step 4)

ある正定対称行列Qに対して、

$$\theta^{-1}\{G_j \theta(Q)) \quad j=2,3,\cdots, \ell, \quad (10)$$

を計算する。ここで、

$$G_j = \eta(A_j)(\eta(A_1))^{-1}$$

である。

(step 5)

最後に、$\forall j \in \{2,3,\cdots, \ell\}$に対して(10)式が正定対称行列かどうかをチェックする。もし、(10)式が$\forall j \in \{2,3,\cdots, \ell\}$に対して正定対称行列ならば(step 4)で設定した正定対称行列QをつかってPを次のように計算できる。

$$A_1^T P A_1 - P = -Q$$

もし、(10)式が$\exists j \in \{2,3,\cdots, \ell\}$に対して正定対称行列でなければ(stap 4)へ戻り、新しいQを設定する。

この手順に従ってPを求める３つの例題を次に示す。

例題4-1

例題3-1で示したファジィシステムを考える。例題3-1の後件部の線形式から次のA_1、A_2 を得る。

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & -0.5 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \qquad A_2 = \begin{bmatrix} -1 & -0.5 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

(step 1)

$$A_1A_2 = \begin{bmatrix} -1.5 & -0.5 \\ -1.0 & -0.5 \end{bmatrix} \quad A_2A_1 = \begin{bmatrix} -1.5 & 0.5 \\ 1.0 & -0.5 \end{bmatrix}$$

を得る。A_1A_2とA_2A_1の固有値はともに-0.135と-1.865（不安定）であるので、定理4-1から

$$A_1^T P A_1 - P < 0, \quad A_2^T P A_2 - P < 0$$

となるPが存在しないことがわかる。

例題4-2

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1.503 & -0.588 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.361 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

からなるファジィシステムのリアプノフ関数を構成する。

(step 1)

$$A_1A_2 = \begin{bmatrix} 0.915 & -0.543 \\ 1.0 & -0.361 \end{bmatrix} \quad A_2A_1 = \begin{bmatrix} 1.142 & -0.588 \\ 1.503 & -0.588 \end{bmatrix}$$

を得る。A_1A_2とA_2A_1の固有値はともに

$$0.277 \pm 0.368i \text{（安定）}$$

である。

(step 2)

$Q_1 = Q_2 = I$ からP_1 とP_2 を計算すると次のように

なる。

$$\mathbb{P}_1 = \begin{bmatrix} 11.1 & -16.3 \\ -16.3 & 29.3 \end{bmatrix} \quad \mathbb{P}_2 = \begin{bmatrix} 1.65 & -1.33 \\ -1.33 & 5.00 \end{bmatrix}$$

(step 3)

$$A_1^T \mathbb{P}_2 A_1 - \mathbb{P}_2 = \begin{bmatrix} 0.0768 & -0.231 \\ -0.231 & 3.96 \end{bmatrix} < 0$$

$$A_2^T \mathbb{P}_1 A_2 - \mathbb{P}_1 = \begin{bmatrix} -7.31 & 11.6 \\ 11.6 & -21.5 \end{bmatrix} \not< 0$$

よって、$\mathbb{P}_2$ をリアプノフ関数$\mathbb{P}$に選ぶ。

例題4-3

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & -0.5 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} -1 & -0.5 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

からなるファジィシステムのリアプノフ関数を構成する。

(step 1)

$$A_1A_2 = \begin{bmatrix} -0.7 & -0.1 \\ -1.0 & -0.5 \end{bmatrix} \quad A_2A_1 = \begin{bmatrix} -0.7 & 0.5 \\ 0.2 & -0.5 \end{bmatrix}$$

を得る。A_1A_2とA_2A_1の固有値はともに

-0.931、-0.268 (安定)

である。

(step 2)

$\mathbb{Q}_1 = \mathbb{Q}_2 = \mathbb{I}$ から$\mathbb{P}_1$ と$\mathbb{P}_2$ を計算すると次のようになる。

$$\mathbb{P}_1 = \begin{bmatrix} 1.68 & -0.181 \\ -0.181 & 2.72 \end{bmatrix} \quad \mathbb{P}_2 = \begin{bmatrix} 2.2 & 1.6 \\ 1.6 & 4.8 \end{bmatrix}$$

(step 3)

$$A_1^T \mathbb{P}_2 A_1 - \mathbb{P}_2 = \begin{bmatrix} -1 & -2.88 \\ -2.88 & -1.77 \end{bmatrix} \not< 0$$

$$A_2^T \mathbb{P}_1 A_2 - \mathbb{P}_1 = \begin{bmatrix} -1 & 1.63 \\ 1.63 & 2.04 \end{bmatrix} \not< 0$$

(step 4)

$$\mathbb{Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{12} & q_{22} \end{bmatrix} > 0$$

なる正定対称行列$\mathbb{Q}$を考え、

$$\theta^{-1}(G\ \theta(\mathbb{Q}))$$

を計算する。ここで、

$G = \eta(A_2)(\eta(A_1))^{-1}$ である。

(step 5)

この例題の場合はいかなる正定対称行列$\mathbb{Q}$であっても

$$\theta^{-1}(G\ \theta(\mathbb{Q})) < 0$$

となることが示されている[10]。よって、定理4-2から

$$A_1^T \mathbb{P} A_1 - \mathbb{P} < 0, \quad A_2^T \mathbb{P} A_2 - \mathbb{P} < 0$$

となる正定対称行列$\mathbb{P}$は存在しない。

5．結論

本論文はファジィ制御系の安定解析、特にリアプノフ関数の構成法について考察を行なった。誌面の都合上触れなかったが、ここで示したファジィシステムの安定定理はファジィシステムに限らず区分線形モデルで記述されるような非線形システムへの適用も可能である。

参考文献

[1]J.B.Kiszka,M.M.Gupta and P.N.Nikiforuk:Energetistic Stability of Fuzzy Dynamic Systems, IEEE,SMC-15, no.6,783/792 (1985)

[2]A.A.Kania:On Stability of Formal Fuzziness Systems, Infor. Scien. 22,51/68 (1980)

[3]R.M.Tong:Some properities of fuzzy feedback systems ,IEEE,SMC-10,no.6,327/330 (1980)

[4]田中、菅野：ファジィ制御系の解析と設計に関する一考察、第5回ファジィシステムシンポジウム、127/132 (1989)

[5]K.Tanaka and M.Sugeno:Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems, FUZZY SETS AND SYSTEMS (TO APPEAR)

[6]K.Tanaka and M.Sugeno:Stability Analysis of Fuzzy Control Systems Using Lyapunov's Direct method, Proceedings of NAFIPS'90, 133/136(1990)

[7]姜、菅野：ファジィモデリング、計測自動制御学会論文集、vol.23,No.6,650/652 (1987)

[8]M.Sugeno and G.T.Kang:Struckure Identification of Fuzzy Model, Fuzzy Sets snd Systems 28 15/33 (1988)

[9]T.Takagi and M.Sugeno: Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modelling and Control, IEEE SMC-15, 116/132 (1985)

[10]K.Tanaka:An Approach to Modelling, Analysis and Design of Fuzzy Control Systems, Doctral Thesis, Tokyo Instutute of Technology (1990)

問い合わせ先

〒920 金沢市小立野2-40-20
金沢大学工学部機械システム工学科 田中 一男
TEL 0762-61-2101 EXT.405, FAX 0762-63-3849

SA2-2

ファジィ制御系の安定問題

Stability of Fuzzy Control Systems

北條 達也* 寺野 寿郎** 増井 重弘**
Tatsuya Hojo Toshiro Terano Shigehiro Masui

* 山武ハネウエル（株）工業システム事業部開発統括部技術２部
2nd Eng. Dep., Industrial System Division, YAMATAKE-HONEYWELL Co.
** 法政大学 工学部
Faculty of Engineering, Hosei University

Abstract : This paper discusses the stability analysis of fuzzy control systems. The process is represented as first order lag and dead time. The nonlinearity of fuzzy controller is considered to be represented by difference equations. The stability of this fuzzy control system is examined at each point on phase plane. As the result, a map which shows the stability distribution on the phase plane is obtained. The stability, existance of limit cycle, the identification of control rules which effect on the stability and the improvement of performance are easily known by inspecting this map.

1．はじめに

フィードバック系では、遅れが大きく、フィードバックゲインが大きい場合、通常不安定になるが、ファジィ制御系においても同様の現象が発生する。しかし、ファジィ制御系の場合では制御ルールを数式で表現することは難しく、また、非線形の特性を持っているため、非線形安定問題としてあつかう必要がある。ファジィ制御系の安定問題については、リアプノフ関数による解析[1]、円板条件の拡張による方法[2]、分岐理論の適用[3]、位相面解析法[4],[5]等の報告があるが、一般的なファジィ制御系の安定問題を厳密に解析的に議論することは困難である。

そこで、本研究ではファジィコントローラの特性を位相面上の各点において線形差分方程式で近似し、制御系の安定性を離散時間系として判別し、位相面を安定領域と不安定領域の２つの領域に分け、各々の領域の分布により制御系の安定性、リミットサイクルの存在を判別する方法を提案する。さらに、安定判別に基づく制御系の特性改善の検討をおこなった。

2．ファジィ制御系

ファジィ制御系は全体として非線形であってもよいが、問題を簡単化するためにここでは制御対象を１次遅れ＋むだ時間で表されるものとする。また、ファジィコントローラの制御ルールは非線形であるが遅れは無いものとする。
ファジィ制御系のブロック線図を Fig.1 に示す。

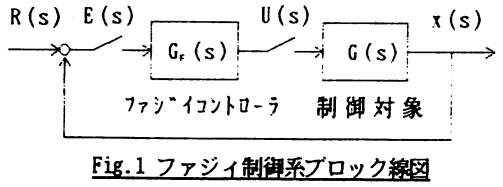


Fig.1 ファジィ制御系ブロック線図

Fig.1 において伝達関数 G（s）は0次ホールドを含む制御対象の伝達関数、G_F（s）はファジィコントローラの伝達関数である。この制御系の特性方程式は、

$$1 + G_F(z) \cdot G(z) = 0 \qquad (1)$$

と表される。ここで、制御対象の伝達関数G（z）は、1次遅れ＋むだ時間（時定数：T，むだ時間：L）のモデルを離散化することにより、

$$G(z) = \mathcal{Z}\left[\frac{1 - e^{-\tau s}}{s} \cdot \frac{e^{-Ls}}{Ts + 1}\right]$$

$$= \frac{(1 - e^{-\tau/T})\, z^{-\ell}}{z - e^{-\tau/T}} \qquad (2)$$

ただし、$\ell = L/\tau$　　τ：サンプリリング時間

3．ファジィコントローラの線形差分近似・安定解析

ファジィコントローラの出力は一般的に非線形であり、(1)式の特性方程式で安定判別を行うにはあつかいにくいためファジィコントローラを線形差分方程式で近似する。位相面上の各点においてファジィコントローラの出力を差分方程式で近似し、(1) 式により安定判別を行う。ここでは位相面原点に対する安定性を議論するため原点を通る平面として近似を行う。

3．1 位置型ファジィコントローラの近似

位置形ファジィコントローラの出力を次式で近似する。

$$u_n = g_1 e_n + g_2 w_n \qquad (3)$$

ここで、

e_n：ファジィコントローラに対する入力
w_n：ファジィコントローラに対する入力の変化分
$w_n = e_n - e_{n-1}$

g_1およびg_2は、通常の離散時間ＰＤコントローラの各々比例ゲインと微分ゲインに対応する。ゲインg_1およびg_2をファジィコントローラの入出力より以下のように求める。

Fig.2 に示すコントロールマップにおいて、コントローラへの入力に対する出力を考える。

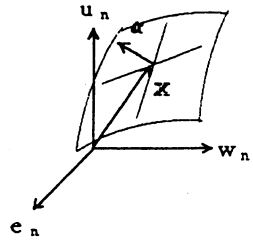


Fig.2 コントロールマップ

コントロールマップ上の任意の点における法線ベクトルをαとする。また、この点と原点を結ぶベクトルをxとする。この点におけるファジィコントローラの出力をこの点と原点を通る平面の式 (3) で近似する。この時、この平面の法線ベクトルβを次式で与える。

$$\beta = x \times \alpha \times x \tag{4}$$

ここで、×はベクトル積を表す。
(4) 式は、原点とコントロールマップ上の点を結ぶベクトルxとこの点におけるコントロールマップの法線ベクトルαとに直交するベクトル$x \times \alpha$、およびベクトルxを平面が含んでいることを意味する。
コントロールマップ上の点 (e_n^0, w_n^0, u_n^0) におけるコントロールマップの法線ベクトルαは、この点におけるe_n, w_n方向の微分より、

$$\alpha = (-k_1 \quad -k_2 \quad 1)^T \tag{5}$$

ここで、

$$k_1 = \frac{\partial}{\partial e_n} u_n(e_n, w_n) \Big|_{\substack{e_n = e_n^0 \\ w_n = w_n^0}}, \tag{6}$$

$$k_2 = \frac{\partial}{\partial w_n} u_n(e_n, w_n) \Big|_{\substack{e_n = e_n^0 \\ w_n = w_n^0}}, \tag{7}$$

よって、コントローラ近似式 (3) のゲインは、

$$g_1 = \frac{(k_1 u_n^0 + e_n^0) u_n^0 - (k_2 e_n^0 - k_1 w_n^0) w_n^0}{(w_n^0 + k_2 u_n^0) w_n^0 + (k_1 u_n^0 + e_n^0) e_n^0} \tag{8}$$

$$g_2 = \frac{(k_2 e_n^0 - k_1 w_n^0) e_n^0 - (w_n^0 + k_2 u_n^0) u_n^0}{(w_n^0 + k_2 u_n^0) w_n^0 + (k_1 u_n^0 + e_n^0) e_n^0} \tag{9}$$

位置形ファジィコントローラの伝達関数は、式 (3) より、

$$G_F(z) = (g_1 + g_2) - g_2 z^{-1} \tag{10}$$

制御対象の伝達関数 (2) 式および近似コントローラの伝達関数 (10) 式を特性方程式 (1) 式に代入し、位相面上の各点において離散時間系の安定判別方法の1つであるJuryの方法[6]を用いて安定判別を行う。

3．2 速度形ファジィコントローラの近似

速度形ファジィコントローラの出力を次式で近似する。

$$\Delta u_n = g_1 e_n + g_2 w_n \tag{11}$$

ここで、

Δu_n：ファジィコントローラの出力の変化分
$\Delta u_n = u_n - u_{n-1}$

g_1およびg_2は、通常の離散時間PIコントローラの積分ゲインと比例ゲインに対応する。ゲインg_1およびg_2は、位置形ファジィコントローラの場合と同様にして、(8) 式および (9) 式で得られる。
速度形ファジィコントローラの伝達関数は、式 (11) より、

$$G_F(z) = \frac{(g_1 + g_2) z - g_2}{z - 1} \tag{12}$$

速度形ファジィコントローラに対しても位置形コントローラの場合と同様に制御対象の伝達関数 (2) 式および近似コントローラの伝達関数 (12) を特性方程式に代入し、安定判別を行うことができる。

4． シミュレーション

4．1 位置形ファジィコントローラ

例1

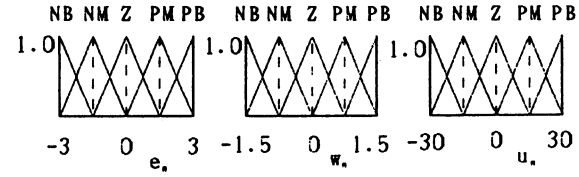


Fig.3 メンバーシップ関数 (1)

Table 1 ファジィ制御ルール

w_n \ e_n	NB	NM	Z	PM	PB
PB	Z	Z	PB	PB	PB
PM	Z	Z	PM	PM	PM
Z	NB	NM	Z	PM	PB
NM	NB	NM	NM	Z	Z
NB	NB	NB	NB	Z	Z

Fig.3 で示したメンバーシップ関数および Table 1 のファジィ制御ルールを用いた場合のコントロールマップおよび位相面を Fig.4 および Fig.5 に示す。

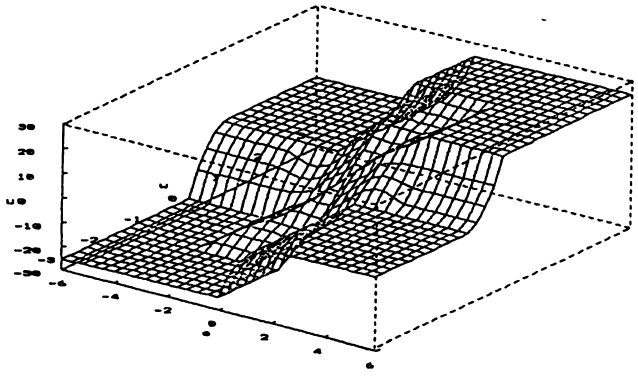


Fig.4 コントロールマップ

T = 10
L = 3
τ = 0.5

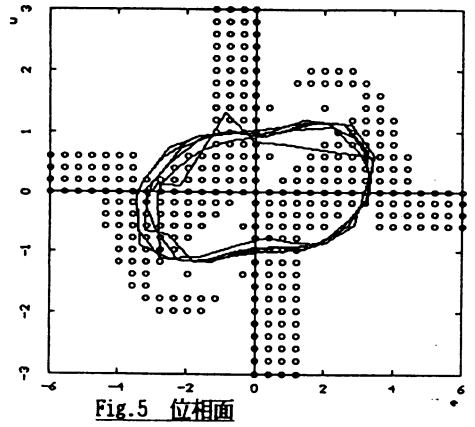


Fig.5 位相面

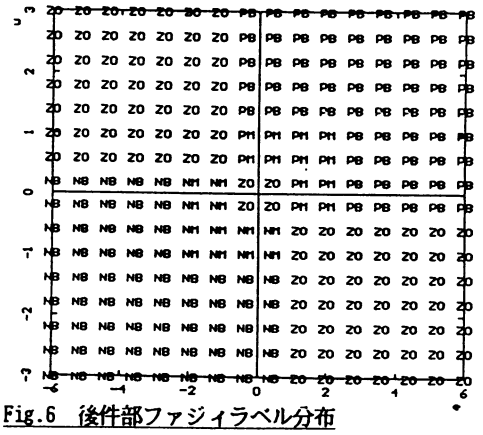


Fig.6 後件部ファジィラベル分布

位相面において記号 "o" は、不安定な領域を示している。この場合、原点付近の不安定領域と安定領域の境界付近でリミットサイクルが生じている。Fig.6 は、位相面上の各点において最も適合度が高いファジィルールの後件部のファジィラベルをコントローラ出力の" 代表値" として表示したものである。これによると、位相面の第２、３象限座標軸付近の不安定領域は、本来制御が不要であるにも関わらず制御がはたらいているためにゲインが高すぎて不安定になっている。また、原点付近の不安定領域については、PM、NMのファジィラベルで表される部分のゲインが高いと考えられる。

例2

例１の後件部変数のメンバーシップ関数のPMおよびNMのピークを０に近づける。

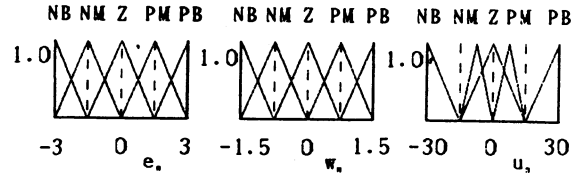


Fig.7 メンバーシップ関数 (2)

ファジィ制御ルールは、例１のものと同じものを用いる。この場合では、位相面原点付近に不安定領域が存在せず軌道は原点に収束していることがわかる。

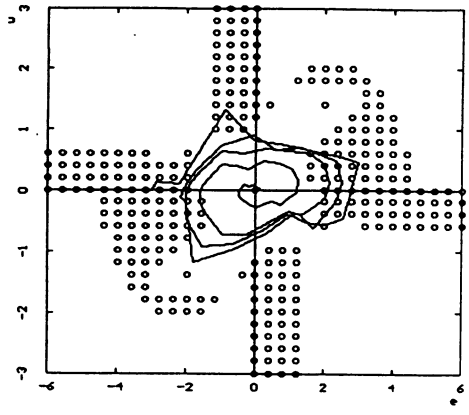


Fig.8 位相面

4．2 速度形ファジィコントローラ

例3

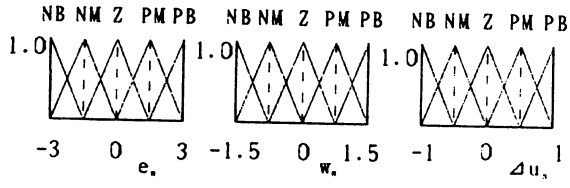


Fig.9 メンバーシップ関数 (3)

Table 2 ファジィ制御ルール

w_n \ e_n	NB	NM	Z	PM	PB
PB			PB		
PM			PM		
Z	NB	NM	Z	PM	PB
NM			NM		
NB			NB		

Fig.9 で示したメンバーシップ関数および Table 2 のファジィ制御ルールを用いた場合のコントロールマップおよび位相面を Fig.10 および Fig.11 に示す。

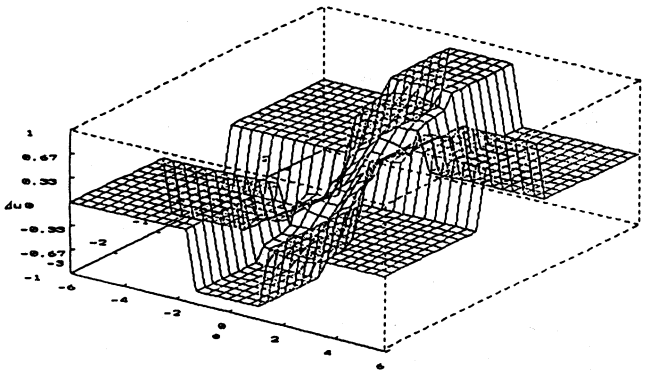


Fig.10 コントロールマップ

T = 10
L = 3
τ = 0.5

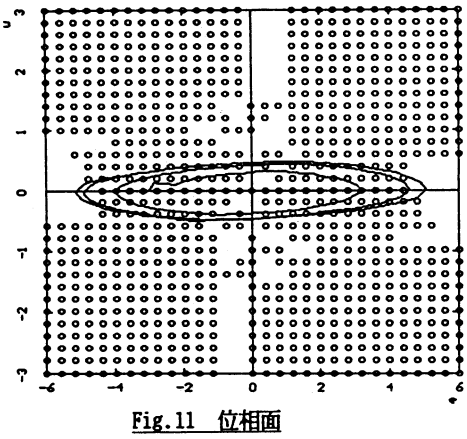


Fig.11 位相面

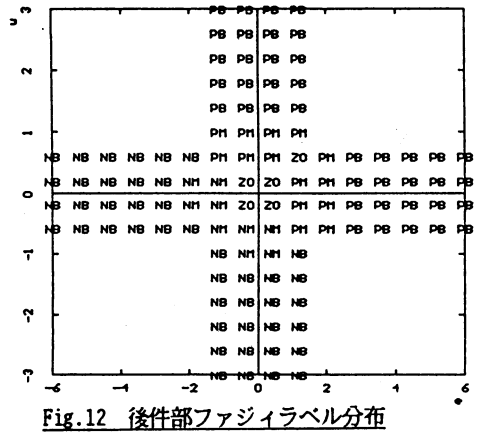


Fig.12 後件部ファジィラベル分布

この場合、原点付近の不安定領域とその外側の安定領域の境界付近でリミットサイクルが生じている。Fig.12 によると、位相面の座標軸付近以外の部分では、あてはまる制御ルールが存在しておらず、コントローラの出力は前回のサンプル時の値を維持しており、不安定領域となっている。また、原点付近の不安定領域については、全体的にゲインが高すぎるために不安定になっていると考えられる。

例4

メンバーシップ関数を以下のように変更する。

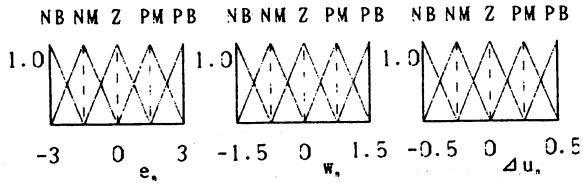


Fig.13 メンバーシップ関数 (4)

ファジィ制御ルールは、例3のものと同じものを用いる。この場合では、位相面原点付近に不安定領域が存在せず軌道は原点に収束していることがわかる。

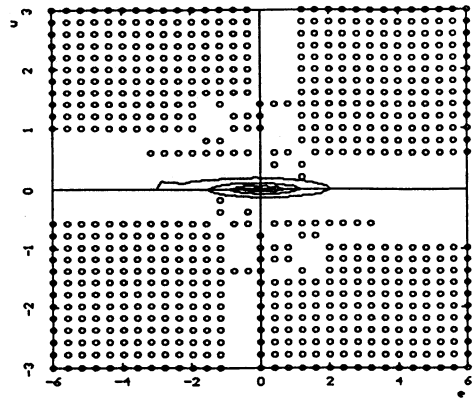


Fig.14 位相面

5. おわりに

本方法によりファジィ制御系の安定性をマクロ的にとらえることができた。位相面上の安定領域・不安定領域の分布より、制御系の安定性は、

(1) 位相面の原点付近に不安定領域が存在せず、かなり広い安定領域が存在するならば安定。

(2) 位相面原点付近に不安定領域が存在し、その周囲に安定領域が存在するような場合、不安定領域と安定領域の境界付近で安定なリミットサイクルを生じる。

(3) 位相面上に安定領域が存在しない、または、安定領域が存在しても小さい場合、制御系は不安定になる。

また、本法によりファジイコントローラのチューニングもある程度可能であることがわかったが、さらに、ファジィ制御系の設計方法、チューニングについて検討する必要がある。

1) 田中、菅野：ファジィ制御系の解析と設計に関する一考察 5TH FUZZY SYSTEM SYMPOSIUM, 127/132, 1989
2) 北村：ファジィルール制御系の絶対安定条件:円板定理の拡張、5TH FUZZY SYSTEM SYMPOSIUM, 505/508, 1989
3) kawase, Yanagihara : On the Stability of Fuzzy Control Systems, 3rd IFSA Congress, 67/70, 1989
4) 寺野、増井、森：ファジィ制御の安定問題、4TH FUZZY SYSTEM SYMPOSIUM, 103/108, 1988
5) 前田、村上、稲毛：ファジィ制御系の安定性、5TH FUZZY SYSTEM SYMPOSIUM, 493/498, 1989
6) C. H. Houpis, G. B. Lamont : DIGITAL CONTROL SYSTEMS Theory, Hardware, Software, McGrow-Hill, 1985

問い合わせ先：〒144 東京都大田区西六郷4－28－1
山武ハネウエル（株）ISD 開発統括部技術2部
北條 達也
TEL 03-730-2173
FAX 03-730-2390

SA2-3

無限次元システムのファジィ・モデルについて

ON FUZZY MODELS OF INFINITE DIMENSIONAL SYSTEMS

川瀬　真*　　柳原　二郎**

Shin Kawase and Niro Yanagihara

*長崎総合科学大学工学部　　**千葉大学理学部

Nagasaki Institue of Applied Science,　Faculty of Science, Chiba University

Abstract　In this paper we consider dynamical fuzzy models of discrete-time, infinite dimensional, dynamical systems. An n-dimensional fuzzy model of the system contains several linguistic control rules. Here, we will be interested in the number of the linguistic control rules in the model. In other words, we should like to know how many linguistic control rules are required for fuzzy models of infinite dimensional systems. We discuss the relationship between the accuracy of models and the number of control rules in models, and obtain an answer of our problem.

1。まえがき

ヒルベルト空間Xを状態空間とする無限次元システム：

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t)+ Bu(t), \quad x(0) = 0, \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \tag{1}$$

（ここで$x(t) \in X$, $u(t) \in R^p$, $y(t) \in R^q$であり、$B : R^p \to X$, $A : X \to X$, $C : X \to R^q$ は有界な線形作用素）を、ファジィ・モデルを用いて表現する問題を考える。

ここで、システム(1)のｎ次元（ダイナミカル）ファジィ・モデルとは、D. Sliwinskaらによって定義されたモデルをいう[2]。すなわち、(1)のファジィ・モデルとは、Xのｎ次元部分空間X'とR^pの直積空間$X' \times R^p$から$X' \times R^q$への写像$F : X' \times R^p \to X' \times R^q$であって、Fの入力と出力のあいだの関係がIF-THEN形式のルールによるファジィ推論形式により定まるものをいう（図２参照）。

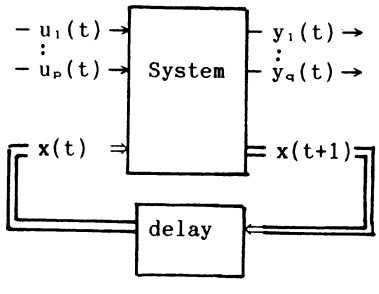


Fig. 1　Infinite dimensional system

D. Sliwinskaらはあるモータのファジィ・モデルを42 個のルールで構成し、そのファジィ・モデルの精度について検討した[2]。モータは２階の微分方程式で記述できるシステムであるので、このシステムの表現としては、４２個のルールは、多すぎるという印象を受ける。そこで次の問題が生ずる。

(*)　「あるシステムと精度が与えられたとき、何個のルールでこの精度を満足するようなファジィ・モデルを構成できるか?」

なぜなら、与えられた線形システムをなるべく簡単なファジィ・モデルで表現すること、すなわち、なるべく少ないルールを用いてモデルを構成することが望まれる。したがって、このルール数を知ることは重要な問題と考えられるからである。この論文では、この問題に対する答えを得るために、ルール数、モデルの次元および精度のあいだの関係についての定理を導く。

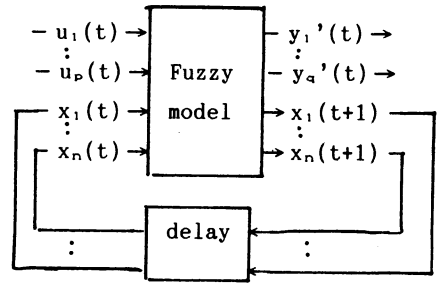


Fig. 2　Fuzzy model of the system

2。問題の定式化：推論形式と一点化法

2．1　ファジイ推論形式　　本論文では、次のような複数個のルールからなるファジィ推論形式を用いる。

rule 1　w_1 is W_{11}, …, w_r is W_{1r} ⇒ ω is Ω_1,
else
rule 2　w_1 is W_{21}, …, w_r is W_{2r} ⇒ ω is Ω_2,
　….　　…….
else
rule m　w_1 is W_{m1}, …, w_r is W_{mr} ⇒ ω is Ω_m,
　事実　　w_1 is w_1*, …, w_r is w_r*
　結論　　Ω_1*, …, Ω_m*

ここでΩ_i and W_{ij} $(i = 1, \cdots, m,\ j = 1, \cdots, r)$ は　Rのファジィ集合である。ある確定値(w_1*, …, w_r*)が与えられたとき、上記ルールによる推論結果であるファジィ集合Ω_1*, …, Ω_m*のメンバーシップ関数は次式によって与えられる。

$$\mu_{\Omega i*}(\omega) = \mu_{Wi1}(w_1*) \cap \mu_{Wi2}(w_2*) \cap \cdots \cap \mu_{Wir}(w_r*) \cap \mu_{\Omega i}(\omega) \quad (i = 1, \cdots, m),$$

ここで$\mu_{\Omega i}(\omega)$, $\mu_{Wij}(w)$はそれぞれΩ_i, W_{ij} $(i = 1, \cdots, m,\ j = 1, \cdots, r)$のメンバーシップ関数である。積演算∩としては種々のものが提案されているが、本論文では∩として限界積⊙:

$$a \odot b = 0 \vee (a + b - 1) \quad \text{for } a, b \in [0, 1] \quad (\vee = \max)$$

を用いる。すなわち

$$\mu_{\Omega i*}(\omega) = \mu_{Wi1}(w_1*) \odot \mu_{Wi2}(w_2*) \odot \cdots \odot \mu_{Wir}(w_r*) \odot \mu_{\Omega i}(\omega).$$

2．2　一点化法　　各推論規則により推論されたファジィ集合の組（Ω_1*, …, Ω_m*）の代表点ωを計算するを一点化法、すなわちdefuzzification operator：

$$\text{defuz} : (\Omega_1*, \cdots, \Omega_m*) \mapsto \omega$$

についてもいくつかの方法が提案されているが、本論文ではいわゆる「高さ法」を採用する[1]。すなわち、推論された各ファジィ集合Ω_i*, $(i = 1, \cdots, m)$の代表点（重心）をω_i、高さをh_i:

$$h_i = \mu_{Wi1}(w_1*) \odot \mu_{Wi2}(w_2*) \odot \cdots \odot \mu_{Wir}(w_r*)$$

で与えると、defuzzification operatorは

$$\text{defuz}(\Omega_1*, \cdots, \Omega_m*) = \frac{\omega_1 h_1 + \omega_2 h_2 + \cdots + \omega_m h_m}{h_1 + h_2 + \cdots + h_m}$$

で定義される。

2．3　ファジィ・モデル　　以上の推論形式および一点化法により汎関数F：$(w_1, w_2, \cdots, w_r) \mapsto \omega$が一つ定まる。このFを、m個のルールによって定まるファジィ・モデルという。またs個の、m個のルールによって定まるファジィ・モデル $F_i(w_1, \cdots, w_r)$からなる写像F: $R^r \to R^s$,

$$F(w_1, \cdots, w_r) = \begin{pmatrix} F_1(w_1, \cdots, w_r) \\ \vdots \\ F_s(w_1, \cdots, w_r) \end{pmatrix}$$

も同様にファジィ・モデルという。この場合、ルールの数はmsである。

無限次元システム(1)のn次元（ダイナミカル）ファジィ・モデルとは、Xのn次元部分空間X'とR^pの直積空間X'×R^pからX'×R^qへのファジィ・モデルF：X'×R^p→X'×R^q:

$$X' \times R^p \ni \begin{pmatrix} x' \\ u \end{pmatrix} \to F\begin{pmatrix} x' \\ u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1(x', u) \\ \vdots \\ F_{q+n}(x', u) \end{pmatrix} \in X' \times R^q$$

をいう。ここで $x' = (x_1, \cdots, x_n) \in R^n \simeq X'$、$u = (u_1, \cdots, u_p) \in R^p$であり、

$$F\begin{pmatrix} x' \\ u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1(x_1, \cdots, x_n, u_1, \cdots, u_p,) \\ \vdots \\ F_{q+n}(x_1, \cdots, x_n, u_1, \cdots, u_p) \end{pmatrix}$$

である。

初期値x(0) = 0 および入力 u(0), u(1), …, u(t), … ∈ R^pがあたえられたときの、このファジィ・モデルの出力y'(t)および内部状態x'(t+1)は

$$\begin{pmatrix} x'(1) \\ y'(0) \end{pmatrix} = F\begin{pmatrix} 0 \\ u(0) \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} x'(2) \\ y'(1) \end{pmatrix} = F\begin{pmatrix} x'(1) \\ u(1) \end{pmatrix}, \quad \cdots,$$

$$\begin{pmatrix} x'(t+1) \\ y'(t) \end{pmatrix} = F\begin{pmatrix} x'(t) \\ u(t) \end{pmatrix}, \quad \cdots,$$

によってあたえられる。このファジィ・モデル F の精度は次式によって定義する。

$$\sup_{t>0}\left\{ \left\| \begin{pmatrix} x(t+1) \\ y(t) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x'(t+1) \\ y'(t) \end{pmatrix} \right\| \right\}.$$

ここで

$$\begin{pmatrix} x'(t+1) \\ y'(t) \end{pmatrix} = F\begin{pmatrix} x'(t) \\ u(t) \end{pmatrix} \in X' \times R^q \ (\subset X \times R^q)$$

である。

3。有限次元システムのファジィ・モデル

有限次元システムのファジィ・モデルに対しては、次の定理が成り立つ。

定理1　Xをn次元空間とする。

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$

をp入力、q出力の（n次元）線形システムとす

る。ここで $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^p$, $y(t) \in R^q$. である。$B: R^p \to R^n$, $A: R^n \to R^n$, $C: R^n \to R^q$ は線形作用素であり、$\|A\| < 1$とする。

DをR^pのある有界集合とする。このとき$(n+q)(n+p+1)$個のルールで定まるファジィ・モデル$F: R^{n+p} \to R^{n+q}$が存在して、任意の$u(t) \in D$に対して、

$$\begin{pmatrix} x(t+1) \\ y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'(t+1) \\ y'(t) \end{pmatrix} \quad (t = 1, 2, \ldots)$$

が成り立つ。ここで

$$\begin{pmatrix} x'(t+1) \\ y'(t) \end{pmatrix} = F \begin{pmatrix} x'(t) \\ u(t) \end{pmatrix} \quad (t = 1, 2, \ldots)$$

である。

この定理は、ある与えられた有界集合に対して、入力がその有界集合内の値をとるならば、システムを正確に表現するファジィ・モデルが存在することを述べている。もちろん、このファジィ・モデルは有界集合に依存する。

定理の証明のために次の補題を準備する。

補題　DをR^rのある有界集合とする。任意の線形汎関数$f: R^r \to R$に対して、Dにおいて

$$f(w_1, w_2, \cdots, w_r) = F(w_1, w_2, \cdots, w_r), \quad (w_1, w_2, \cdots, w_r) \in D$$

となるような、$r+1$個のルールをもつファジィ・モデル$F: R^r \to R$が存在する。

注意　FはDに依存する。

証明　$D = \{u \in R^r; \|u\| \leq 1\}$の場合を証明すれば十分である。$R^r$における$r+1$個の点$w^0$, w^1 $w^2, \cdots, w^r$を

$$w^0 = (-1, -1, \cdots, -1)$$
$$w^1 = (3, -1, \cdots, -1)$$
$$\cdots$$
$$w^r = (-1, -1, \cdots, 3)$$

とし、

$$S = \{ w = \Sigma \alpha_i w^i \mid \alpha_i \geq 0, \ \Sigma \alpha_i = 1\} \quad (\alpha_i \text{はwの重心座標})$$

とおくと、$D \subset S$である。したがって $w \in D$ ならば、重心座標を用いて

$$f(w) = f(\Sigma \alpha_i w^i) = \Sigma \alpha_i f(w^i) = \Sigma \alpha_i \omega_i$$

と書ける。ここで$\omega_i = f(w^i)$ $(i=0, \cdots, r)$とおいた。

さて、ファジィ集合W, W'およびΩ_i $(i = 0, 1, \cdots, r)$を、次のメンバーシップ関数により定義する。

$$\mu_W(w) = 0 \quad (\text{for } w < -1),$$
$$= (w+1)/4 \quad (\text{for } -1 < w < 3),$$
$$= 1 \quad (\text{for } 3 < w),$$
$$\mu_{W'}(w) = 1 - \mu_W(w),$$
$$\mu_{\Omega_i}(\omega) = 1 \quad (\text{for } \omega = \omega_i),$$
$$= 0 \quad (\text{for } \omega \neq \omega_i), \ (i = 0, \cdots, r).$$

ここで Ω_iの代表点はω_iであることのに注意する。もし $w = (w_1, \cdots, w_r) \in D$ならば、$w = (w_1, w_2, \cdots, w_r)$の重心座標$\alpha_i$は:

$$\alpha_i = \mu_W(w_i) \quad (i = 1, \cdots, r),$$
$$\alpha_0 = 1 - \alpha_1 - \cdots - \alpha_r$$
$$= (1-\alpha_1) \odot \cdots \odot (1-\alpha_r)$$
$$= \mu_{W'}(w_1) \odot \cdots \odot \mu_{W'}(w_r)$$

で与えられる。

さて、次のような$r+1$個のルールからなる推論を考える。

rule 1 w_1 is $W_0, \cdots, w_r$ is $W_0 \Rightarrow \omega$ is Ω_0,
else
rule 2　　w_2 is $W_1 \Rightarrow \omega$ is Ω_1,
　　...　　.....
else
rule r+1　　w_r is $W_1 \Rightarrow \omega$ is Ω_r.

上の推論により得られるファジィ・モデルを$F: R^r \to R$とする。 $w^* = (w_1^*, \cdots, w_r^*) \in D$が与えられたときの推論結果を$\Omega_0^*, \cdots, \Omega_r^*$とする。$\alpha_i = h_i$および$\Sigma \alpha_i = 1$に注意すると,

$$\omega = F(w^*)$$
$$= \text{defuz}(\Omega_0^*, \cdots, \Omega_r^*)$$
$$= \omega_0 h_0 + \omega_1 h_1 + \cdots + \omega_r h_r$$
$$= \Sigma \alpha_i \omega_i = f(w^*).$$

をえる。したがって、補題が証明できた。

定理1の証明　　f を次式で定義される汎関数とする。

$$f = \begin{pmatrix} A & B \\ C & 0 \end{pmatrix} : R^{p+n} \to R^{q+n}.$$

補題により$(n+q)(n+p+1)$個のルールで定まるファジィ・モデル $F: R^{n+p} \to R^{n+q}$ で、任意の$u(t) \in D$に対して

$$f \begin{pmatrix} x' \\ u \end{pmatrix} = F \begin{pmatrix} x' \\ u \end{pmatrix}$$

をみたすものが存在する。このとき

$$\begin{pmatrix} x(t+1) \\ y(t) \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} x(t) \\ u(t) \end{pmatrix}$$

であるからファジィ・モデルFは定理を満たす。

4。 無限次元システムのファジィ・モデル

無限次元システムのファジィ・モデルに対しては、次の定理が成り立つ。

定理２　Xをヒルベルト空間とし、

$$(2)\quad \begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$

を、Xを状態空間とするp入力、q出力の線形システムとする。ここで $x(t)\in X$, $u(t)\in R^p$, $y(t)\in R^q$ である。$B: R^p\to X$, $C: X\to R^q$ は有界作用素であり、$A: X\to X$ は $\|A\|<1$ であるような完全連続自己共役作用素であるとする。

$D=\{u\in R^p;\ \|u\|\leqq 1\}$ とする。このとき与えられた精度 $\varepsilon>0$ に対して、$(n+q)(n+p+1)$ 個のルールで定まるファジィ・モデル $F: R^{n+p}\to R^{n+q}$ が存在して、任意の $u(t)\in D$ に対して、

$$(**)\quad \sup_{t>0}\left\{\left\|\begin{pmatrix}x(t+1)\\ y(t)\end{pmatrix}-\begin{pmatrix}x'(t+1)\\ y'(t)\end{pmatrix}\right\|\right\} \leqq \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\|B\|\{\sqrt{1+\|C\|^2}\},$$

$$\begin{pmatrix}x'(t+1)\\ y'(t)\end{pmatrix}=F\begin{pmatrix}x'(t)\\ u(t)\end{pmatrix}$$

が成り立つ。ここでnは、次のようにして求められる：

λ_k を、Aの固有値（$|\lambda_1|\geqq|\lambda_2|\geqq\cdots\geqq|\lambda_i|\geqq\cdots$）とする。$\phi_k$ を λ_k に対する固有関数であって、$\{\phi_k\}$ がAXの正規直交系をなすものとする。R^p の基本ベクトルを $e_1, e_2, \cdots, e_p$ とする。このとき

$n=\{Be_1, \cdots, Be_p, \phi_1, \cdots, \phi_N\}$ の中の独立なベクトルの個数

である。ここでNは、与えられた ε に対して

$$|\lambda_N|>\varepsilon\geqq|\lambda_{N+1}|$$

を満たす整数である。

証明　X'を $\{Be_1, \cdots, Be_p, \phi_1, \cdots, \phi_N\}$ で張られるXの部分空間とする。システム(2)から、X'を状態空間とする有限次元システム：

$$(3)\quad \begin{cases} x(t+1) = A'x(t) + B'u(t), \\ y(t) = C'x(t) \end{cases}$$

を次のように構成する。

$A': X'\to X'$, $A'=\lambda_1\phi_1\otimes\overline{\phi}_1 + \lambda_2\phi_2\otimes\overline{\phi}_2+\cdots+\lambda_N\phi_N\otimes\overline{\phi}_N$.

$B': R^p\to X'$, $B'u := Bu$ for $u\in R^p$,

$C': X'\to R^q$, $C'=C\mid X'$.

ここで $\phi_k\otimes\overline{\phi}_k$ は、$(\phi_k\otimes\overline{\phi}_k)x=(x,\phi_k)\phi_k$ で定義される作用素である。

この有限次元システムに対して(**)が成り立つことが証明できれば、定理１を適用することにより定理２が得られる。

まず、$A=\Sigma\lambda_k\phi_k\otimes\overline{\phi}_k$ と書けるから、$u(t)\in D$ ならば

$$\|A^tBu - A'^tBu\| = \|\Sigma\lambda_k^t(\phi_k\otimes\overline{\phi}_k)Bu\| \leqq \|\Sigma\lambda_k^t\phi_k\otimes\overline{\phi}_k\|\,\|Bu\| = (\sup_{k>N}|\lambda_k|^t)\|Bu\| = |\lambda_{N+1}|^t\|B\| \leqq |\varepsilon|^t\|B\|$$

をえる。

時刻tにおけるシステム(2)の出力x(t)および(3)の出力x'(t)は：

$$x(t) = A^{t-1}Bu(0) + A^{t-2}Bu(1) + \cdots + ABu(t-2) + Bu(t-1),$$

$$x'(t) = A'^{t-1}Bu(0) + A'^{t-2}Bu(1) + \cdots + A'Bu(t-2) + Bu(t-1)$$

とかける。したがって

$$\|x(t)-x'(t)\| = \|(A^{t-1}-A'^{t-1})Bu(0) + (A^{t-2}-A'^{t-2})Bu(1) + \cdots + (A-A')Bu(t-2)\| \leqq \varepsilon/(1-\varepsilon)\|B\|$$

を得る。同様にy(t)（$=Cx(t)$）とy'(t)（$=Cx'(t)$）を比較すると

$$\|y(t)-y'(t)\| \leqq \varepsilon/(1-\varepsilon)\|B\|\,\|C\|$$

を得る。

以上のことから、この有限次元システムに対して(**)が成り立つことがわかる。

文献

1. Mizumoto, M., Improvement of fuzzy controls (II), Proc. of the 4th Fuzzy System Symposium (Tokyo, May 30-31, 1988) 91-96.
2. Sliwinska, R. Kowalsky and S. Matys, Some problems of the shape of fuzzy sets and the dimension of a model with respect to its adequency, Fuzzy Sets and Systems, 26 (1988) 63-83.

問い合わせ先：〒851-01 長崎市網場町５３６
長崎総合科学大学工学部
川瀬　真
Tel 0958-39-3111
Fax 0958-39-0584

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SA3-1

前塩素注入ファジィ制御システムの構築

FUZZY CONTROL OF PRE-CHLORINE DOSAGE

津倉　洋　　小須田徹夫
HIROSHI TSUGURA　　TETSUO KOSUDA
株式会社　明電舎
MEIDENSHA CORPORATION

ABSTRACT : Pre-chlorination has been reacently conducted at many water treatment plants due to worse qualty of raw water. However, almost pre-chlorine dosage has been determined with manual mode. We have developed the fuzzy control strategy for pre-chlorination. We assured the effect of fuzzy control strategy by simulation techniques.

1．はじめに

水道原水の水質悪化にともない、アンモニア除去、鉄・マンガン除去等の目的で、前／中塩素注入処理を実施する浄水場が増えている。一方、水道水の安全性やおいしさに対する市民の関心も高まり、特にトリハロメタン等の発ガン性物質の低減化が求められている。これに対して浄水場では、塩素注入の管理強化を図り注入量の低減化を進める目標を掲げて、安全でおいしい水の供給をめざした対応が迫られている。

前／中塩素注入処理は、影響因子が多く複雑で遅れ時間が長い（２～４時間程度）という浄水プロセスの特性を有している。このため、現在の前／中塩素注入処理は、オペレータが原水水質や気象条件を考慮しながら塩素注入率を毎日数回程度手動変更して行われている。オペレータの負担を減らし急激な水質や天候の変化にも対応できる塩素注入制御システムの実現が望まれている。

そこで今回、約１年にわたって実浄水場で塩素処理フィールド実験実施した。その結果をもとに水質と気象の両因子を考慮した前塩素注入ファジイ制御システムを開発した。従って本論文では、前塩素注入率の決定にファジイ推論を応用した制御システムを構築し、制御シミュレーションを行った結果について報告する。

2．ファジイ制御システムの構築

2。1浄水場の前塩素注入処理

河川水などの表流水を処理する浄水場の水処理プロセスを図１に示す。本図からわかるように、急速ろ過システムの浄水場は、濁りを除去する凝集・沈澱池と仕上げ処理をする砂ろ過池から構成される。本制御系の特徴は、処理結果が判明する沈澱池出口（沈澱水）までの滞留時間が２－４時間に達するほどの大幅な遅れ時間を有することである。

塩素注入処理には、原水に注入する前塩素、沈澱水に注

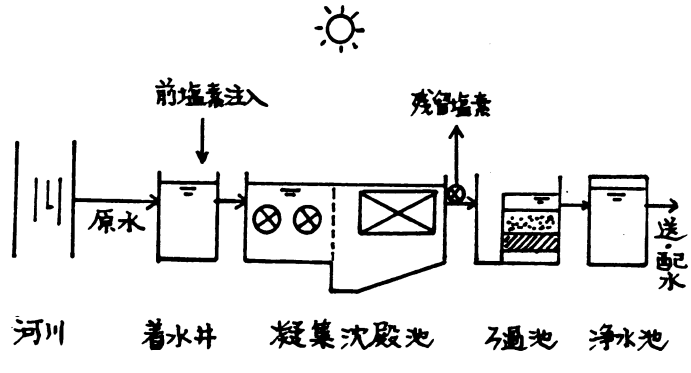


図１　浄水場処理プロセスの概要

入する中塩素、ろ過水に注入する後塩素の３種類がある。前塩素処理は、原水中のアンモニアをクロラミンに酸化処理し、同時に鉄・マンガンイオンも不溶性水酸化物にして沈澱除去する。また、藻類（アオコ等）も塩素で殺藻処理して除去できる。このように原水中の種々の物質を酸化除去するのに塩素が用いられ、この塩素要求量を推定することが、水質要因による前塩素注入率を決定することになる。

次に、気象要因による塩素消費量を予測推定する必要がある。すなわち紫外線により塩素が分解消費されるため、消費量分を補充しなければならない。現在の浄水場では、前述の両因子を考慮しながらフィードフォワード的なオペレータの判断で前塩素注入率の決定を行っている。従って熟練オペレータでも大幅な予測誤差を生じると目標値から大きくはずれることがある。

２．２ファジイ推論による前塩素注入制御方法

前節で述べた浄水場の前塩素注入処理の特性を考慮して、図２に示すファジイ制御アルゴリズムを構築した。本ファジイ制御システムは、気象要因および水質要因の注入率推論部と、現在天候変化、現在塩素要求量、残留塩素（以下残塩と略記）偏差および残塩変化率からの注入率補正推論部から構成される。

気象要因の紫外線による次亜塩素酸（ＨＯＣｌ）と同イオン（ＯＣｌ⁻）の分解消費は、２２０～４００ｎｍ程度の波長の光によるものである。この紫外線量は、実際には日射量により計測・評価される。日射量には直達日射量（ｋＷ／ｍ²）と全天日射量（ＭＪ／ｍ²）の２種類があり、全塩素注入制御では瞬時値を表す直達日射量が有効であることがフィールド実験により確認できた

図３に夏期晴天時２４時間の直達日射量（関東地方）の変化パターンを示す。直達日射量は日の出とともに増加しはじめ、南中時に最大値に達し以後減少していき、日の入り時刻にゼロとなる。また、天候が晴から曇、雨となるにつれて直達日射量も減少していく。この天候によるパターン変化を南中時の最大日射量によるファジイ推論から求めることで、予測直達日射量パターンを算出した。すなわち、天候と平均気温の予想値を入力すると共に、日付、赤緯、均時差等を計算して南中時刻を求め２４時間の日射量パターンを予測した。この値をもとに気象要因による注入率推論を行った。実天候が予想天候と異なる場合、現在天候を０～２の数値で修正入力して予測日射量を再計算し修正注入率を求める。

次に、水質要因による注入率推論では、アンモニア、鉄・マンガン等の無機物による要求量と有機物による要求量から塩素要求量を推論し、水質要因による注入率を推論・決定した。この場合も当日の水質状態が予想値と大きく異なるときには、手分析等から現在塩素要求量を修正した。

このように、かび臭発生時等に臨時的に粉末活性炭注入

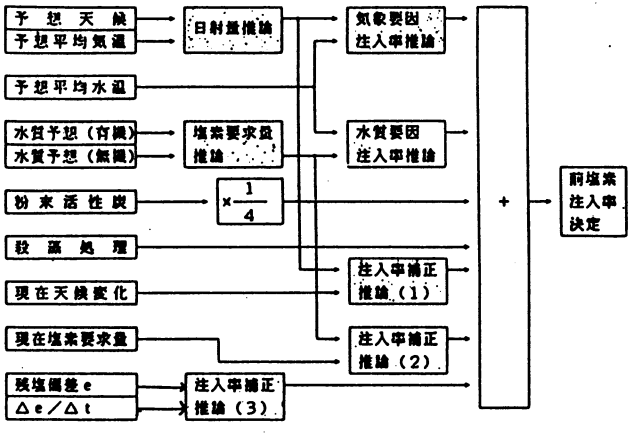


図２　ファジイ制御アルゴリズムの概要

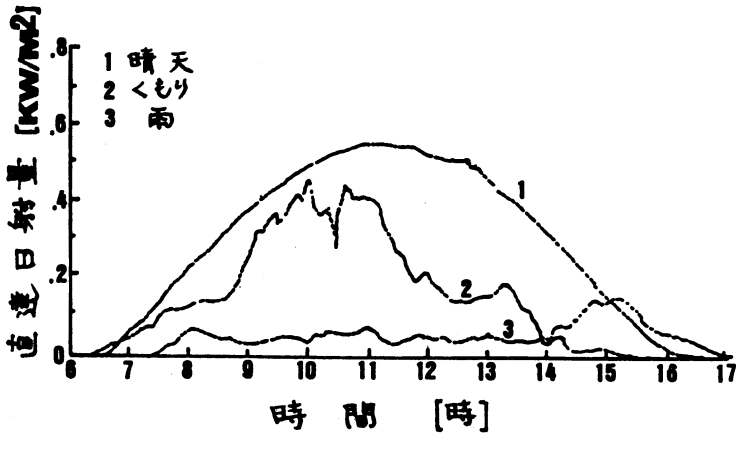


図３　直達日射量の変化パターン

処理や殺藻処理のための２因子の注入率を加えた４フィードフォワード要因による注入率推論を実行して、ＦＦ制御注入率（Ｄ）を求めた。一方、現在天候変化、現在塩素要求量、残塩偏差、残塩変化率の４フィードバック（ＦＢ）要因による注入率補正推論を行い、ＦＢ制御補正注入率（⊿Ｄ）を算出する。この２種類のＦＦとＦＢ要因を組み合わせて前塩素注入率（Ｄ＋⊿Ｄ）を決定する。

本ファジイ制御システムは、６３個の制御ルールと２１個メンバーシップ関数から構成されている。図４に制御ルールの例を示す。また、メンバーシップ関数の例を図５に示す。制御ルールの前件部は、ＮＢ，ＺＥ、ＰＢの３段階で、後件部は、ＮＢ，ＮＳ，ＺＥ、ＰＳ，ＰＢの５段階でそれぞれ表現した。季節変動は、前日の実績値から予測しやすい平均値を入力して、気温と水温を用いて補正した。

残塩変化率 ⊿E

残塩偏差 E \ OW7	NB	ZE	PB
NB	NB	NS	ZE
ZE	NS	ZE	PS
PB	ZE	PS	PB

図４　残塩(FB)信号の制御ルール

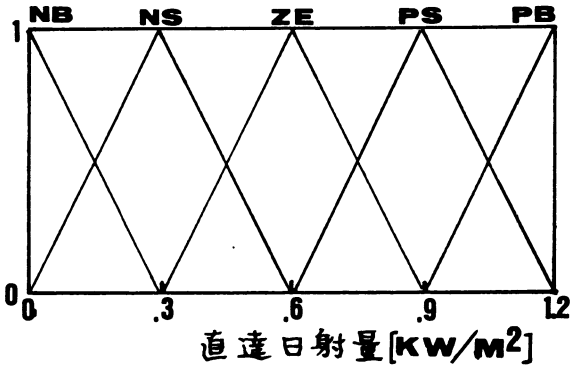


図５　日射量のメンバーシップ関数

３　制御シミュレーションの結果

前塩素注入ファジイ制御システムを用いて、８月中旬の晴天時における２４時間制御シミュレーションを図６に示すフローチャートに従って行い、ファジイ推論による前塩素注入率と注入後の沈澱池出口残塩濃度を求めた。本ファジイ制御システムと実浄水場で実施した手動制御結果の比較を図７に示す。本図から分かるように、ファジイ推論による演算結果は、日射量や時間遅れを考慮した最適に近い前塩素注入率が決定されている。注入後４時間経過した沈澱池出口の残塩結果④も残塩目標値（０。４MG／L）に近い安定した値が得られた。１日の総注入量残塩変動の大き手動注入の場合と同程度であった。この前塩素注入ファジイ制御システムを導入する事で、注入量を必要最小限に抑えトリハロメタンの低減化が可能な安定した前塩素注入制御が実現できる。

４。おわりに

本論文では、日射量計と塩素要求量計を省略した前塩素注入ファジイ制御システムを開発し、それを用いて制御シミュレーションを行った。その結果、気象と水質の両要因を考慮した本ファジイ制御システムにより、夏期の最大変動時でも安定した注入制御が可能となった。

問い合わせ先：〒１４１　品川区大崎２－１－１７
株式会社　明電舎　総合研究所
津　倉　洋
ＴＥＬ　０３－４９２－１１１１
ＦＡＸ　０３－４９５－１４６６

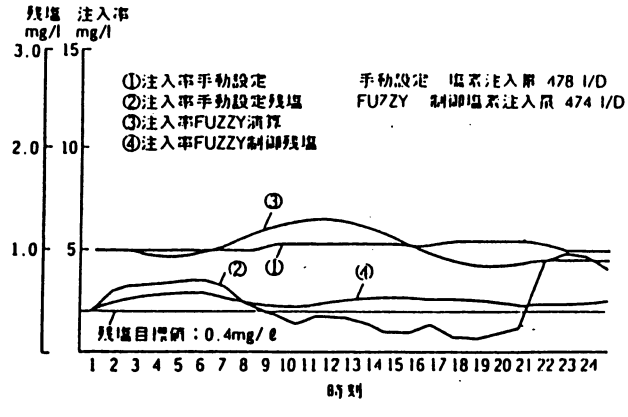


図７　前塩素注入の制御結果の比較

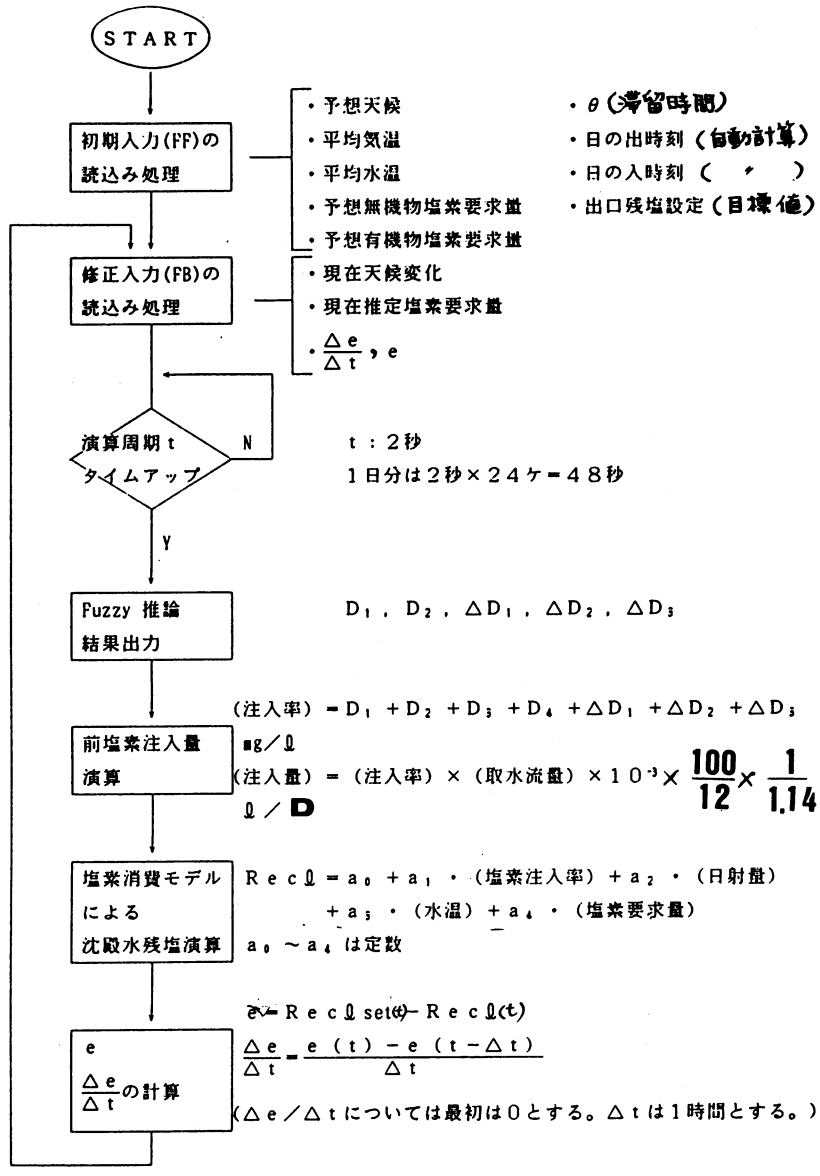


図 6　制御シミュレーションのフローチャート

SA3-2

ファジィ制御の加熱炉温度制御への応用

Heater Outlet Temperature Control by PID and FUZZY Combining Control

谷　哲次
Tetsuji Tani

出光興産株式会社　千葉製油所　技術課
Technical and Engineering Depart. Idemitsu Chiba Ref.
Idemitsu Kosan CO.,LTD

Abstract:Simple PID algorithm has to be tuned at a compromise point taking into stability and responce speed. Therefore it is difficult to control the process which is dynamically changing it's process characteristics. We developed a control method using PID algorithm compensated by FUZZY algorithm. And we tested this method to charge heater outlet temperature control of hydrogen unit and achieved strict control.

1. はじめに

石油精製の重要な工程に脱硫工程があり，水素製造装置はその脱硫に必要な水素を供給している。この装置のトラブルは即生産活動に影響を及ぼす主要装置である。

今回，ファジィ制御を適用した対象は出光興産千葉製油所第一水素製造装置の原料加熱炉であり，その出口温度制御にはＰＩＤ制御を使用していた。しかし出口温度を見て制御量を変化させても，その応答時間が遅いこと等制御が難しく，現状の制御のみでは不十分で熟練オペレータの介入が避けられなかった。

そこで，速応性を良くしたＰＩＤ制御に対し，安定性を良くするための補正量をファジィ推論により求め，それらを総合的に判断して制御するというコンビネーション制御方式を試み良好な結果が得られたので，その内容を報告する。

2. 装置概要

水素製造装置全系を図１．１に示す。原料のナフサあるいはブタンを原料加熱炉にて加熱し，脱硫塔にて脱硫を行う。次に改質炉にて改質し，変成塔・吸収塔・メタネータを通り最終的に水素を製造する。今回ファジイ制御を適用した原料加熱炉の出口温度は次工程である脱硫塔の触媒に悪影響を与えない様に極力一定に保つ必要がある。

この出口温度に関係する制御方式を図１．２に示すが，従来制御では出口温度を見て燃料ガス量を調整していた。

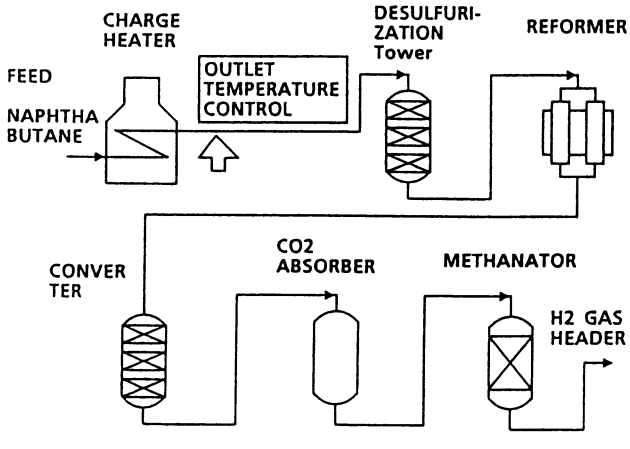


Fig. 1.1 PROCESS FLOW

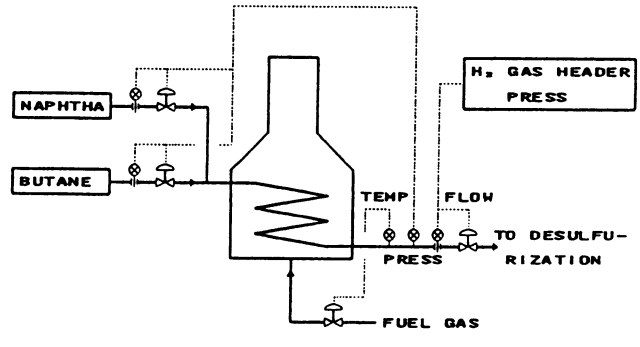


Fig. 1.2 H_2 GAS CONTROL SYSTEM

3．現状の問題点

出口温度制御にはＰＩＤ制御を使用していたが，次の様な問題があった。

（1）　この装置は水素供給ヘッダーの圧力調整を行っており，工場の水素必要量に応じて自動的に発生量を調整している。従ってその処理量は刻々変化している。

（2）　この原料加熱炉により，原料を常温より一気に350 ℃以上に加熱しているため，わずかな処理量変化に対しコイル内の蒸発ポイントが大きく変わる。

（3）　原料加熱炉の燃料は工場のオフガスを使用しているため，その性状が変化する。

（4）　工場のガスバランス等により原料切替えを頻繁に行っている。

この様な要因が複雑に絡み出口温度制御を困難にしていた。その結果，平常の運転が落ち着いている時でも出口温度が常に±15℃程度変動していた。（図３上段）

また，原料切替えのたびに自動制御が追いつかずマニュアルにて調整をしていた。そのため，フィードフォワード制御を導入したが十分に効果を上げなかった。

4．対策

4．1　制御ロジック[1,2]

第３節の問題を解決すべくファジィ制御とＰＩＤ制御のコンビネーション制御を開発した。さらに安全対策として従来のＰＩＤ制御をバックアップとして待機させ，異常の場合は切替え可能とした。又，これらの機能すべてを分散制御システム上で実現した。この制御ロジックの概要を図２．１に示す。

このうち”ＰＩＤ＋ＦＵＺＺＹ”部を詳細に示したのが図２．２であるが，その特長を列挙すると次の様になる。

1) ファジィ制御とＰＩＤ制御のコンビネーション制御である。[3]

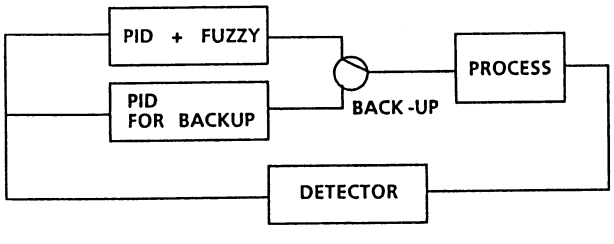


Fig. 2.1 CONTROL DESIGN CONCEPT

2) ファジィ推論によりＰＩＤ制御のパラメータを変更するのではなく，ＰＩＤ制御の出力を直接ファジィ推論により周期的に補正する。[6,7]

3) チューニングとしては，ファジィ用ＰＩＤ制御部は速応性を増すことを主とし，ファジィ制御部は安定性を増すことを主とした。

4) ＰＩＤ制御部はフィードバック要素であり，ファジィ制御部はフィードフォワード的要素からなる２自由度的制御である。

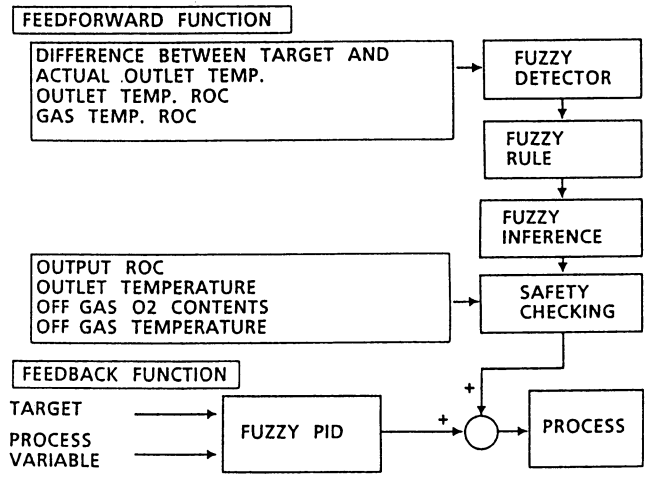


Fig. 2.2 FUZZY+PID SYSTEM CONFIGURATION

4．2　ファジィ制御規則

ファジィ推論の基になるファジィ制御規則は「このままにして置くとこうなるから，どうする」と言ったようなフィードフォワード的な内容であり，出口温度が目標値に対し少し外れている場合はＰＩＤ出力に対し微調整し，大きく外れている場合には強く調整するように作成した。ファジィ推論における入力は目標温度との差，出口温度変化速度および排ガス温度変化速度である。以下，ファジィ制御規則を例示すると

1) もし出口温度が目標値より少し高めで，そして出口温度の速度変化がプラス側にかなり大きければ，コントロールバルブを少し絞る。

2) もし出口温度が目標値よりかなり高めで，そして排ガス温度の速度変化がプラス側にかなり大きければ，コントロールバルブを大きく絞る。

3) もし出口温度が目標値よりかなり高めで，そして排ガス温度の速度変化がマイナス側にかなり大きければ，コントロールバルブをそのままとする。

というような熟練オペレータのノウハウを制御規則

としてまとめ，その数は全部で１７規則となった。ルールの特長は出口温度が目標値に対して少し外れている時は出口温度変化に注目し、大きく外れている時はフィードフォワード的要素を強調すべく排ガス温度も加味するところにある。

また，ファジィ推論においては，重み付け平均化法を採用した。[4,5] (Appendix 1)

４．３　ルール作成とチューニング

この制御の目的は平常時の安定化だけで無く原料切り替え等特殊時の安定化も含んでいるが，熟練オペレータとのヒヤリングは原料切り替え時のノウハウ獲得に限定した。と言うのも出口温度を一定に制御する方法は　常に同じであり，原料切り替えの様な極端な状態にはその方法が端的に表れると仮定したからである。

チューニングは図２．１に示したごとくバックアップ体制があるため実装置にて行い，ファジィ推論周期の決定、メンバーシップ関数の適合度変更を行った。さらにＰＩＤ制御のパラメータも変化させ速応性を増す様にした。

５．効果

この様なコンビネーション制御導入後の結果をまとめると

1)　原料切替えの無い平常時の出口温度を安定化した。（最大振れ幅　±５℃）
2)　原料切替え時の出口温度を自動制御可能にし、かつ安定化した。（最大振れ幅　±５℃）
3)　シャットダウン・スタートアップ時の出口温度を自動制御可能にした。

となり，当初の目標を達成した。

この様に　平常時，原料切り替え時，特殊操作時を同一の制御で対応できたことは，この制御ロジックが広範囲に強力であることを示しており，４．３節で述べた仮定が正しかったと考える。

この制御ロジックが広範囲に強力な理由として次の２点が考えられる。

- ＰＩＤ制御に対し周期的にファジィ推論で補正している事は、ＰＩＤ制御による系の動向に対して熟練オペレータが常に監視して微調整しているのと同じ働きをしていること
- 常に系の動向を監視、修正しているのであるからＰＩＤ制御自体も速応性を増しておいても良いこと

である。

上記効果のうち，平常時を図３に，水素原料をナフサからブタンへ切替えた時の制御状況を図４に示す。図３上段は本システム導入前の出口温度変化下段は導入後を示すが、温度変化幅が±15℃から±５℃に安定化していることが分かる。又、本システム導入前ではＰＩＤ制御が追いつかずマニュアルにて調整していたが、図４のごとく原料切替え時においても最大振れ幅を±５℃までに自動制御していることが分かる。

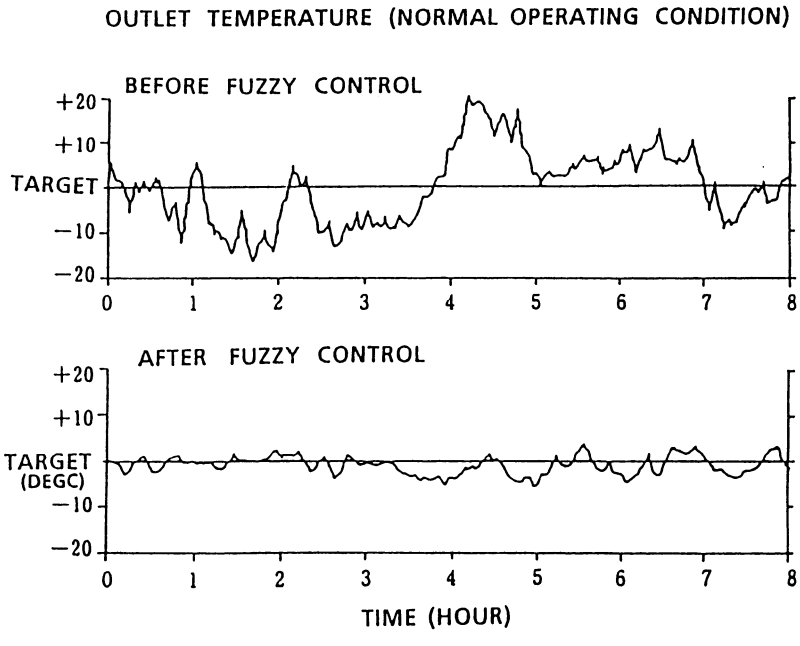


Fig. 3 TRENDS OF CONTROL PERFORMANCE (EXAMPLE 1)

6. まとめ

加熱炉出口温度制御に上記のような制御システムを導入し良好な結果を得た。

この制御システムの開発を通じて得たことをまとめると

1) 現場の経験則には卓越した知見があり，これを制御に組み込むのにファジイ理論は有効である。
2) ノウハウ整理においては，制御方法の特長が表面化する極端な状態（今回の場合は原料切替え時）に着目するとよい。
3) ファジィ制御＋ＰＩＤ制御の型にしたので，制御ロジック及び制御パラメータ調整が簡単である。

となる。

最後に，一般にファジィ制御は従来制御では制御不可能な所での応用が考えられるが，このように最も一般に用いられるＰＩＤ制御の制御性向上、適用範囲の拡大にも有効と考える。

<参考文献>

1）柳下、他：システムと制御，128，(10)，597～604(1984)
2）M.sugeno ed:"Industrial Application of Fuzzy Control " Elsevier Science Pub., North-Holland,p.19,p125(1985)
3）寺野、浅居、菅野編："ファジィシステム入門" オーム社(1987)
4）水本雅晴：第４回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ講演論文集 91～96(1988)
5）芹澤貴清：ｵｰﾄﾒｰｼｮﾝ、33,(6),61(1988)
6）特開昭62-241004　野本、他
7）特開昭63-247801　斉藤、他

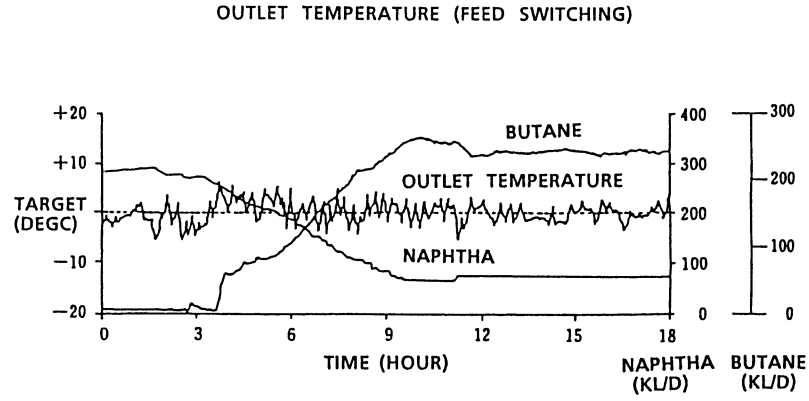
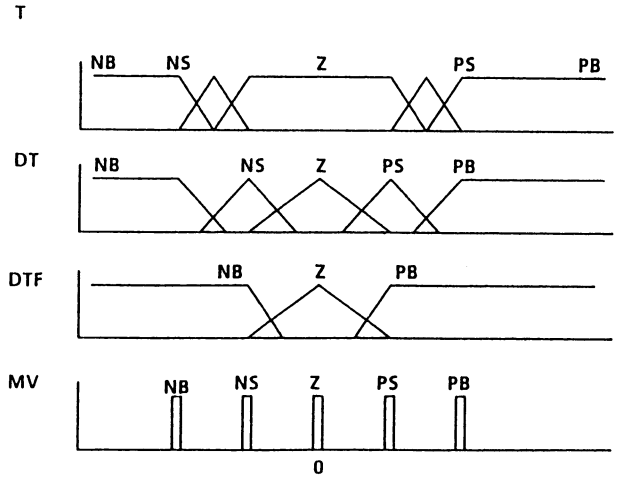


Fig.4 TRENDS OF CONTROL PERFORMANCE (EXAMPLE 2)

APPENDIX 1　MEMBERSHIP FUNCTIONS (AS EXAMPLE)

T :DIFFERENCE BETWEEN TARGET AND ACTUAL OUTLET TEMP.
DT :OUTLET TEMP. ROC
DTF:GAS TEMP. ROC
MV :OUTPUT



APPENDIX 2　FUZZY CONTROL RULE (AS EXAMPLE)

IF T IS PS AND DT IS PB THEN MV IS NS
IF T IS PB AND DTF IS PB THEN MV IS NB
IF T IS PB AND DTF IS NB THEN MV IS Z

・TOTAL 17 RULES

問い合わせ先：〒299-01 千葉県市原市姉崎海岸2-1
出光興産千葉製油所 技術課
谷　哲次
TEL 0436-61-1212 （内線2305）
FAX 0436-61-0885

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SA3-3

ファジィ理論を用いたガス吸収冷温水機制御

GAS-FIRED ABSORPTION CHILLER/HEATER CONTROL BASED ON FUZZY SET THEORY

人見和弘* 小川淳* 前川正弘* 有馬秀俊**
Kazuhiro Hitomi Atsushi Ogawa Masahiro Maekawa Hidetoshi Arima

三洋電機(株) *制御システム研究所 **産機空調事業部
SANYO Electric Co.,Ltd Control & Systems Research Center Commercial Air-Conditioning Division

Abstract: There are two purposes for this work. The one is to get a fine peformance in controling chilled and hot water temparature of the absorption chiller/heater. And the other is to get a good control peformance using the Fuzzy theory more than the PID control.

As a result, when the absorption chiller/heater is installed, the operations of adjusting control parameters would be eliminated.

After our experiment using Fuzzy control, we have achieved the fine control characteristics to disturbances and the energy conservation for our controled system simultaneously as compare with optimized PID control.

1．はじめに

高度情報化社会にあって、ビル建設業界では、僅か数年の間にビルの高機能化が進んできた。さらに、空調用熱源機であるガス吸収冷温水機においてもインテリジェント化の要求が高まってきた。一方、地価の高騰により省スペース性という観点から機械の小型・軽量化が必要となってきた。このような市場要求に対応するため図１に示すような高性能で小型軽量化を図り、しかもマイクロコンピュータ（以下マイコンと記す）を使用し高効率運転機能や予防保全機能を備えた、吸収冷温水機Ｃシリーズ[1]が開発されている。

しかし、従来は冷水（温水）出口温度制御にＰＩＤ制御を採用しているため、ＰＩＤパラメータの決定にチューニング技術が必要であった。

本研究の目的は、

（１）冷水（温水）出口温度の高精度制御、

（２）設置現場での制御パラメータ調整作業の排除、

の実現のため、吸収冷温水機へのファジィ制御の適用を試み、従来のＰＩＤ制御に比べ良好な制御性能を得ることである。

2．実験機（吸収冷温水機Ｃシリーズ）の概要

まず、実験機には以下の３つの特徴がある。

（１）小型・軽量（省スペース設計）

（２）シリアル通信、データロギング機能

（３）メンテナンスフリー機能

省スペース設計では、高性能伝熱管の採用、高温再生器の効率向上により、当社在来比１０％の小型・軽量化を実現した。一方、吸収液ポンプのインバータ制御による省エネルギー化、及びディジタルＰＩＤ制御による高精度制御機能を備えた。以下に、実験機制御部の基本仕様を示す。

ＣＰＵ：８ビットマイコン（内部１６ビット）
ＲＯＭ：３２Ｋバイト
ＲＡＭ：１Ｋバイト
Ａ／Ｄ変換部：逐次比較型（分解能１０ビット）
不揮発性ＲＯＭ：２Ｋバイト
アナログ入力数：１３点
アナログ出力数：２点
ディジタル入力数：４０点
ディジタル出力数：２４点
通信回線：ＥＩＡ　ＲＳ２３２Ｃ準拠

次に、実験機の冷房運転及び暖房運転時の基本サイクルについて述べる。（図２、３）

実験機は、蒸発器・吸収器、凝縮器・低温再生器及び高温再生器の三つの缶胴と熱交換器、ポンプなどから構成されている。

蒸発器内で冷水を冷却し、蒸発した冷媒（水）は、吸収器内の濃い吸収液（ＬｉＢｒ）に吸収されて、溶液は薄くなる。この稀吸収液は、溶液ポンプにより低高温熱交換器を経て温度上昇し、高温再生器に導かれ、ガス流量制御弁（以下、制御弁と記す）により制御されたバーナで加熱されて中間濃度まで濃縮される。中間濃液は、高温再生器より低温再生器に入り、高温再生器で発生した冷媒蒸気により、最終濃度に濃縮され、低温熱交換器により温度を下げて吸収器へ戻る。一方、低温再生器で中間濃吸収液を加熱し、ドレンとなる。この冷媒（水）は、凝縮器に入り、外部から冷却水で液化され冷媒とともに減圧機構を経て蒸発器へ戻る。このようにして戻って来た吸収液及び冷媒はそれぞれ吸収・蒸発が容易に行えるよう、個々の管束上に散布する構造である。

また、暖房については、稀吸収液は、高温再生器で加熱濃縮され冷媒蒸気を発生させる。発生した冷媒蒸気は、蒸発器と吸収器に送る。そこで蒸発器で熱交換し、温水を取り出す。一方濃縮された中間液は、吸収器に送られ、冷媒と混合し稀液となり低温熱交換器と高温熱交換器を通り、高温再生器に送られる。

以上のように、実験機の冷水（温水）出口温度制御を行うには、冷水（温水）温度、冷却水温度、溶液濃度、再生温度など複数の情報を基に、制御弁開度、吸収液ポンプインバータ周波数、冷媒ポンプＯＮ－ＯＦＦなどの複数の出力を制御する必要がある。従ってそれぞれにルールを設定できるファジィ制御を用いる事により、高精度制御が可能と考えられる。

3．ファジィ制御適用の背景

地域冷暖房や、半導体クリーンルームなどに使用されるガス吸収冷温水機には、高精度な一定温度の冷水、温水が要求される。従来型では、比例制御あるいはディジタルＰＩＤ制御を行っていた。

ＰＩＤパラメータは納入先により使用環境が異なるため、現場に合ったパラメータを現場で調整している。しかし異なる使用環境に対して、最適なＰＩＤパラメータチューニングを行うことは事実上難しい。

そこで本研究では、ファジィ制御をガス吸収冷温水機の冷水出口温度制御に適用し、運転員の制御ノウハウを知識データベースに取り込むことにより現場でのパラメータ調整を全く必要としない制御方法を提案する。

4．実験方法

吸収冷温水機は前述の動作原理からもわかるように、冷水入口温度、冷却水入口温度等、多くの変数が冷水出口温度に関与する多変数制御系であり、かつプロセス内部にフィードバックが存在する相互干渉の多いプロセスである。

従って、制御の効果を最大限に発揮させるために、冷水出口温度に影響を与える要因を検討した結果、ファジィ制御の入出力変数として以下の変数を抽出した。

・入力変数：冷水出口温度偏差（eTo）
　　冷水出口温度変化量（dTo）
　　冷水入口温度変化量（dTi）
　　冷却水入口温度変化量（dTci）
・出力変数：制御弁開度変化量（kQ）

また、ファジィルール及びメンバーシップ関数を図４、５に示す。

ファジィ推論はＡＸパソコン上で行い、実験機の持つシリアル通信機能を使用して遠隔制御とした。実験手順は、図６(a)に示すように負荷変動の外乱として冷水入口温度及び冷却水入口温度を同時にステップ状に変化させ、出口温度の外乱抑制の特性を計測した。なお、負荷ステップ量は、１０、１５、３０（％）の３種類とした。

5．結果及び考察

得られた結果の制御特性を定量的に評価するために、図６(b)、(c)に示すような以下の値をＰＩＤ制御及びファジィ制御での実験結果より求め、比較検討した。

１）整定時間τ：目標冷水出口温度±ｅ。（一定誤差）の間に入るまでの時間。
２）入力エネルギ指標Ｑ：制御弁開度の整定時間までの積算値。

ＰＩＤ制御とファジィ制御の比較のため、上記の評価値（τ、Ｑ）について、負荷ステップ量が同条件時のＰＩＤ制御とファジィ制御の比（$\tau_{ファジィ}/\tau_{PID}$及び、$Q_{ファジィ}/Q_{PID}$）を算出した。図７はそれぞれτ、Ｑについての比を示したものである。

ここで、比が1.0より小さいことは、ファジィ制御の方がＰＩＤ制御に比べ制御特性が良い事を示している。

図７から次のことがいえる。

１）入力エネルギ指標Ｑ比については、負荷ステップ量の大小に関わらず改善されており、省エネルギ効果がみられ、最大約1/2の改善である。
２）整定時間τ比については、負荷ステップ量が大きい時に改善がみられるが、それ以外は同程度である。

負荷ステップ量が小さい場合のＱ比、τ比は1.0近傍、つまり両制御間での特性に差は認められないが、負荷ステップ量が大きい場合は、Ｑは大幅に改善されている。従ってファジィ制御の方が、最適に調整されたＰＩＤ制御に比べ、大きな外乱に対しての外乱抑制特性が良好で、かつ入力エネルギ指標Ｑが小さいことから、省エネルギ効果がある事が分かる。

6．おわりに

ファジィ制御は、複雑な制御系を有する吸収冷温水機の温度制御に適した制御方式であり、最適に調整されたＰＩＤ制御に比べ良好な制御特性を有し、かつ、省エネルギ効果があることが明確となった。今後、ヒートポンプ、複合型吸収式等の、より複雑な制御を必要とする機器に対し、ファジィ制御を応用していく予定である。

7．参考文献

（１）三洋技報 VOL.22 NO.2 JUN.1990 三洋電機

8．問い合わせ先：〒573　大阪府枚方市走谷1-18-13

三洋電機（株）制御システム研究所
メカトロシステム研究部
人見和弘　　℡(0720)41-1284

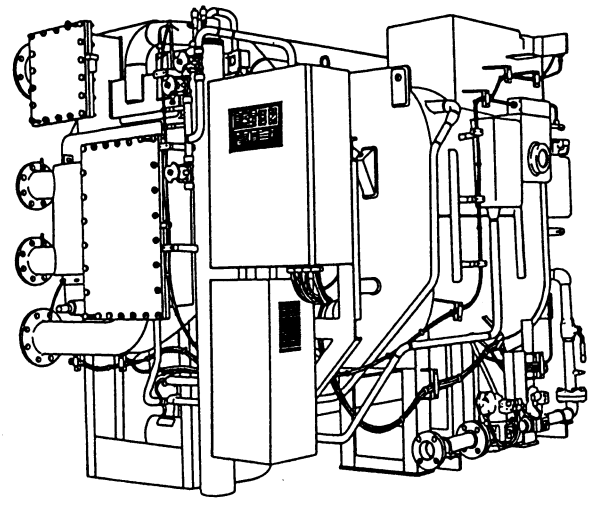


図１　実験機（スーパ吸収冷温水機Ｃシリーズ）の外観

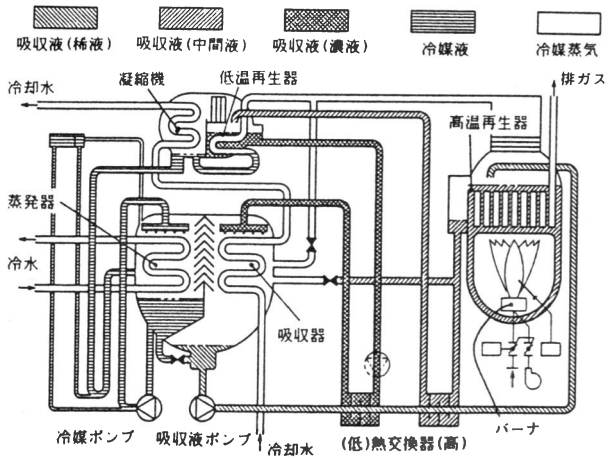


図２　冷房運転サイクル図

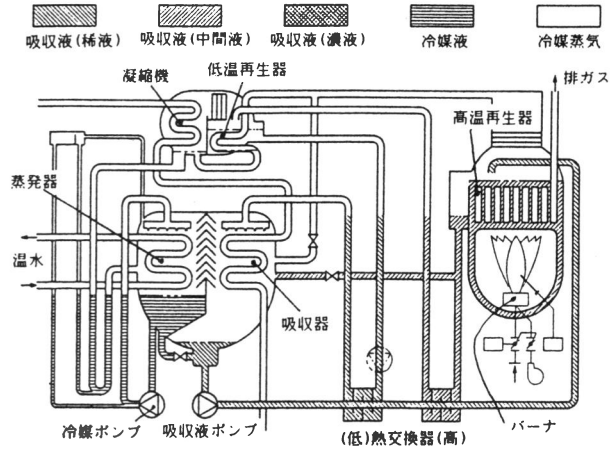


図３　暖房運転サイクル図

（a）冷水出口温度

dTo \ To	PB	PS	ZR	NS	NB
PB	PB		PS		PS
PS		PS	PS	PS	
ZR	PM		ZR		NM
NS		NS	NS	NS	
NB	NS		NS		NB

（b）冷却水入口温度

dTci	PB	PS	ZR	NS	NB
kQ	PB	PS	ZR	NS	NB

（c）冷水入口温度

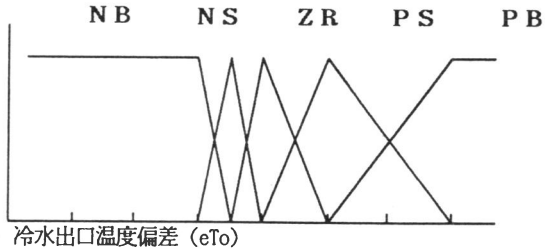
dTi	PB	PS	ZR	NS	NB
kQ	PB	PS	ZR	NS	NB

冷水出口温度
e To：偏差
d To：偏差の変化量

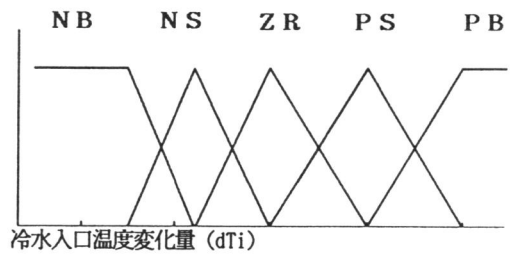
kQ：制御弁操作量
d To：冷却水入口温度変化量
Ti：冷水入口温度変化量

図４　制御ルール

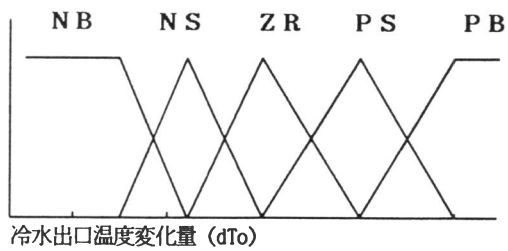
前件部ファジィ集合



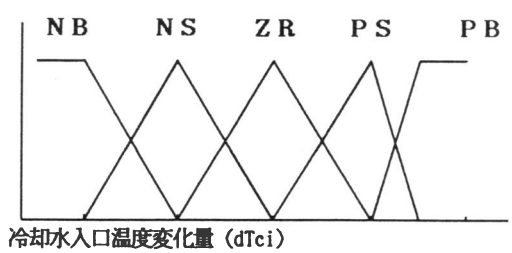
（a）冷水出口温度偏差（eTo）



（b）冷水入口温度変化量（dTi）

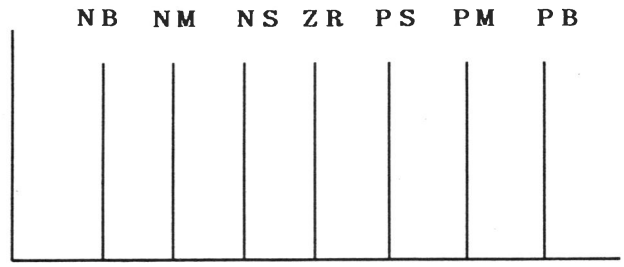


（c）冷水出口温度変化量（dTo）



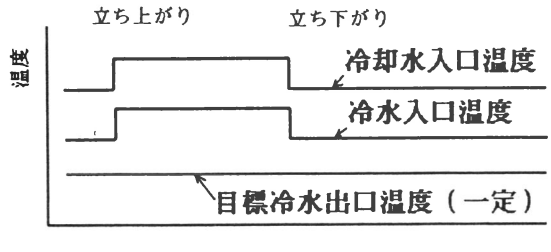
（d）冷却水入口温度変化量（dTci）

図５（a）～（d）　入力のメンバーシップ関数

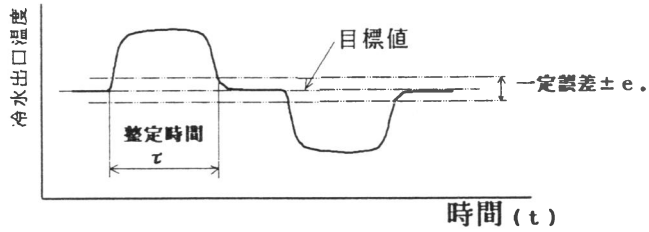


（e）制御弁開度変化量（kQ）

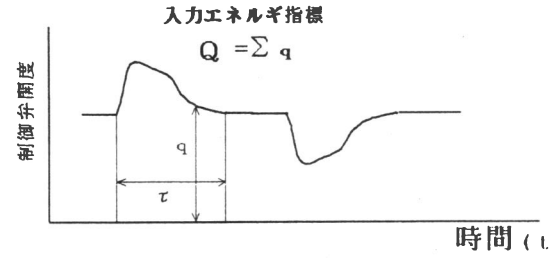
図５（e） 出力のメンバシップ関数



（a）実験方法



（b）整定時間τ



（c）入力エネルギ指標Q

図６ 実験方法と評価指標

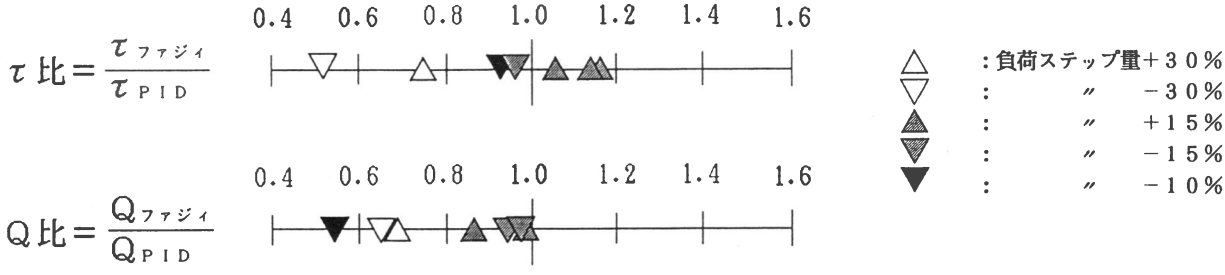


図７ ファジィ制御とＰＩＤ制御の比較

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SA4-1 ニューラルネットワークを用いたＲＣ床版の健全性評価システムのための知識獲得法

KNOWLEDGE ACQUISITION FOR INTEGRITY ASSESSMENT OF RC BRIDGE DECK BASED ON NEURAL NETWORK

古田　均*　　大谷裕生**　　白石成人*
Hitoshi FURUTA, Hiroki OHTANI and Naruhito SHIRAISHI
*京都大学　工学部
Faculty of Engineering, Kyoto University
**近畿日本鉄道株式会社
Kinki Nippon Railway Co.

Abstract: For developing a practical expert system, it is a crucial problem to acquire the expertise without difficulty. In this paper, an attempt is made to apply the technique of neural network for generating production rules automatically. Three kinds of production rules that are ordinal production rules, production rules with certainty factors and fuzzy production rules can be modeled as three types of neural networks, respectively. An application example of damage assessment of RC bridge deck is presented to demonstrate the applicability of the neural network models proposed here.

1．はじめに

近年、各分野でエキスパートシステムに関する研究が盛んに行われている。エキスパートシステムの開発において、知識獲得の問題は非常に重要なものの１つである。本研究では、著者ら[1)-3)]が構築したＲＣ床版の健全性評価システムにおける知識獲得を、ニューラルネットワークを用いて自動的に行う方法について検討した。

このＲＣ床版の健全性評価システムでは、ファジィプロダクションルール[2)]を導入したことによって、自然言語をそのままルールとして記述することができ、専門家からの知識獲得が容易に行えるようになった。しかしながら、実際に専門家から知識を獲得する場合、必ずしも専門家の知識をすべて抽出できるとは限らない。従来より、ここに専門家からの知識獲得の難しさがあるとされている。そこで、本研究では、プロダクションルール、確信度付きプロダクションルール、ファジィプロダクションルールの各々をニューラルネットワークを用いて表現し、自動的にルールを生成する方法について検討した。

2．ニューラルネットワークによるルールの生成[4)]

ニューラルネットワークによりルールの自動的生成を行うためにはまず、プロダクションルール、確信度付きプロダクションルール、ファジィプロダクションルールの各々をニューラルネットワークによって表現しなければならない。以下にその方法について述べる。

いま、ｎ個の原因の要素C1, C2, C3...Cnとｍ個の結果の要素R1, R2, R3...Rmがあったとする。これらの要素を用いて、例えば次のようにプロダクションルールを記述することができる。

if　　(C1, C2, C3)
then　　(R1, R2)　　(1)

ここで、前件部の(C1, C2, C3)、後件部の(R1, R2)はそれぞれの要素の論理積（ＡＮＤ）を表している。つまり、式(1)のプロダクションルールは「C1かつC2かつC3ならばR1かつR2である」を表している。ここで、このプロダクションルールと同じ内容を表すニューラルネットワークを考える。まず、ネットワークの構造として、入力層のユニット数がC1～Cnのｎ個、出力層のユニット数がR1～Rmのｍ個のものを考える。ただし、層数や中間層のユニット数は適当に設定する。このとき、上のプロダクションルールはニューラルネットワークにおいては、入力値が

(C1, C2, C3, C4, C5....., Cn)=(1, 1, 1, 0, 0, ..., 0)　(2)

であるとき出力値が

(R1, R2, R3, R4, R5, ... Rm)=(1, 1, 0, 0, 0, ... 0)　(3)

であることを示している。ニューラルネットワークを用いてプロダクションルールを自動生成するためには、既存の(C1, C2, C3... Cn)と(R1, R2, R3... Rm)の例を学習し、さらに入力値として色々な値を入力したときの出力値を調べればよい。例えば、既存のデータを学習したネットワークに、入力値として

(C1, C2, C3, ..., Cn)=(1, 0, 1, 0, 0, ..., 0)　(4)

を入力したとき、その出力値が

(R1, R2, R3, ... Rm)=(0.9, 0.1, 0.0, ..., 0)　(5)

であるとする。ネットワークへの入力値はそのままプロダクションルールにおける前件部になるので、プロダクションルールにおける前件節は(C1, C3)、すなわち「C1かつC3」となる。式(5)に示される出力値において、R1とR3以外は全て0であり、R1の値は0.9、R3の値は0.1である。出力値は[0, 1]の実数で表され、その値は認識の程度を表すと考えられることから、式(5)の出力はほぼR1であると考えることができる。つまり、式(4)、式(5)によりプロダクションルール

if　　(C1 , C3)
then　　(R1)　　(6)

が自動的に生成されたことになる。

以上、ニューラルネットワークによって、プロダクションルールを自動生成する方法についてついて述べたが、次にその考え方を拡張し、確信度付きプロダクションルールの自動生成法について述べる。

いま、n個の要素(C1,C2,C3 ...Cn)とm個の要素(R1,R2,R3 ....Rm)を用いて、確信度付きプロダクションルールを次のように記述することができる。

if (p1/C1,p2/C2,p3/C3.....,pn/Cn)
then (q1/R1,q2/R2,q3/R3.....,qm/Rm) (7)

ここで、前件部におけるpi(i=1,2,3,....,n)はCi(i=1,2,3,....,n)の確信度を表し、後件部におけるqj(j=1,2,3,....,m)はRj(j=1,2,3,....,m)の確信度を表している。したがって、式(7)は「C1（確信度＝p1）かつC2（確信度＝p2）かつC3（確信度＝p3）・・・かつCn（確信度＝pn）であるならば、R1（確信度＝q1）かつR2（確信度＝q2）かつR3（確信度＝q3）・・・かつRm（確信度＝qm）である」を表している。このような確信度付きプロダクションルールを、ニューラルネットワークを用いて表現するために、図-1のようなネットワークを考える。図-1におけるC1～Cnは原因の各要素を表し、R1～Rnは結果の各要素を表している。また、入力層のユニットはC1～Cnの各々に対して２つずつ用い、出力層のユニットもR1～Rnの各々に対して２つずつ用いる（各要素の値とその確信度のユニットを各々の原因の要素に対して用意する）。したがって、原因に対する値と確信度、結果に対する値と確信度に関する既存のデータを、図-1のニューラルネットワークによって学習することにより、確信度付きプロダクションルールを確信度を持たないプロダクションルールと同様に自動生成することができる。

次にファジィプロダクションルールの自動生成について述べる。n個の要素(C1,C2,C3 ...Cn)とm個の要素(R1,R2,R3 ....Rm)を用いて、ファジィプロダクションルールを次のように記述することができる。

if (@p1/(C1 @f1),@p2/(C2 @f2),...,@pn/(Cn @fn))
then (@q1/(R1 @g1),@q2/(R2 @g2),....,@qm/(Rm @gm)) (8)

ここで、前件部の@pi(i=1,2,3...,n)と後件部の@qi(i=1,2,3...,n)はファジィ確信度を表し、(Ci @fi)(i=1,2,3...,n)は「原因の要素Ciの値が@fiである」ことを表し、(Ri @gi)は(i=1,2,3...,n)「結果の要素Riの値が@giである」ことを表している。また、@fiや@giはファジィ述語を表している。例えば、次のファジィプロダクションルールと、

if 確信度が大きい／（体温 高い）
then 確信度が中くらい／（気分 悪い） (9)

式(7)のファジィプロダクションルールを比較すると、「確信度が大きい」は@p1に、「体温 高い」は(C1 @f1)に、「確信度が中くらい」は@q1に、「気分 悪い」は(R1 @g1)に対応する。このようなルールをニューラルネットワークによって表現する場合、図-2のように原因の要素であるC1～Cnに対し、ファジィ述語を表現するユニットと確信度を表現するユニットを用意し、結果の要素であるR1～Rnの各要素に対しても、確信度およびファジィ述語を表現するユニットを用意しなければならない。ファジィ述語も確信度もファジィ集合で表されるから、それを表現するためには複数のユニットを用意し、各々のユニットをファジィ集合における要素と考えて各々にグレード（メンバーシップ値）を与えればよい。

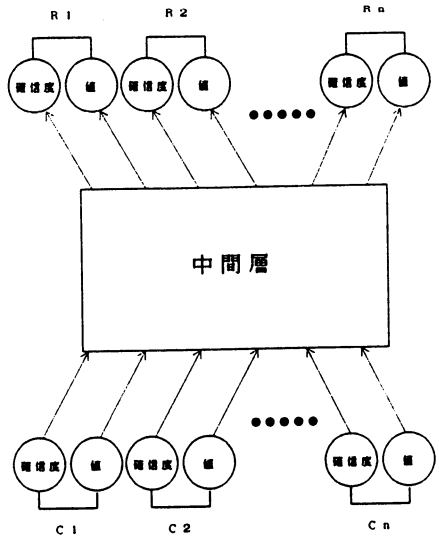


図-1 確信度付プロダクションルールの生成

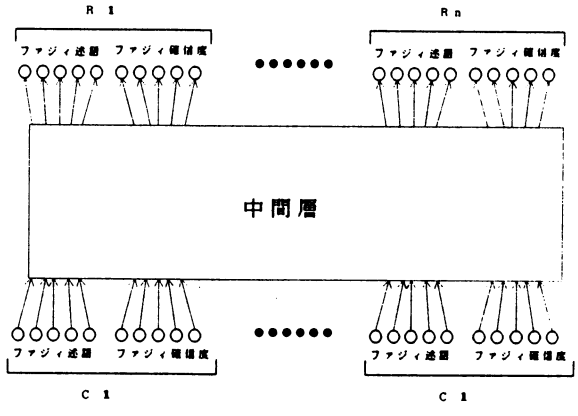


図-2 ファジィプロダクションルールの生成

例えば、式(9)のファジィプロダクションルールにおいて、ファジィ確信度「確信度が大きい」と「確信度が中くらい」がそれぞれ、「確信度が大きい」＝{0/0, 0/0.2, 0.1/0.4, 0.5/0.6, 0.8/0.8, 1.0/1.0}、「確信度が中くらい」＝{0/0, 0.5/0.2, 1.0/0.4, 1.0/0.6, 0.5/0.8, 0/1.0} のように定義されており、ファジィ述語が「高い」＝{0/35, 0.1/36, 0.8/37, 1.0/38}、「悪い」＝{1/0, 0.8/0.2, 0.5/0.4, 0.2/0.6, 0/0.8, 0/1.0}で定義されていたとする。ただし、気分の良さをここでは[0,1]の実数で表し、値が大きいほど気分がよいことを表しているものとする。このとき、ニューラルネットワークの入力層には、「体温」の値であるファジィ述語を記述するためのユニット（35℃,36℃,37℃,38℃の各体温のグレードを表す４個のユニット）、およびファジィ確信度を表すユニット（0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0の各確信度のグレードを表す６個のユニット）を用意し、出力層には「気分」の値であるファジィ述語を記述するユニッ

ト（0，0.2，0.4，0.6，0.8，1.0の各値を表す6個のユニット）とファジィ確信度を与えるためのユニット（0，0.2，0.4，0.6，0.8，1.0の各確信度のグレードを表す6個のユニット）を用意する。以上のニューラルネットワークを用いて、ファジィ集合は例えば次のように表現することができる。つまり、入力層における「体温」のファジィ述語を表す4ユニットに対して、各々のグレードである0，0.1，0.8，1.0を入力し、そのファジィ確信度を表す6ユニットに対して、各々のグレードである0，0，0.1，0.5，0.8，1.0を入力する。ファジィ集合をこのように取り扱うことにより、原因に対する値（ファジィ述語）とファジィ確信度、結果に対する値（ファジィ述語）とファジィ確信度に関する既存のデータを、図-2のニューラルネットワークによって学習することにより、プロダクションルール、確信度付きプロダクションルールと同様にファジィプロダクションルールを自動生成することができる。

3．RC床版の損傷原因推定ルールの生成

RC床版の損傷の原因を推定するための調査要因とその値を表-1に示す。例えば構造形式が桁であれば、「構造形式・桁」がとる値は二値（0または1）であるので、要因「構造形式・桁」の値が1となり、その他の「構造形式・下路式アーチ」や「構造形式・box」は0となる。また、ファジィ集合を値とする要因については、例えば要因「ひび割れ密度の大きさ」に対して、「大きい」とか「小さい」等を与える。ただしこの際には、「大きい」とか「小さい」を表すメンバーシップ関数をあらかじめ決定しておかなければならない。そこで本研究では、「ひび割れ時期」、「ひび割れと輪荷重位置の距離」、「ひび割れ密度の大きさ」、「床版厚」、「路面舗装の凹凸の大きさ」、「路面舗装のわだちの大きさ」、「舗装厚の大きさ」、「コンクリートの色の濃さ」の各々に関連するメンバーシップ関数を定義した。

さらに本研究では、クリスプな集合（2値の値をとる集合）を値とする要因に対しては[0,1]の範囲の実数で与えることにし、ファジィ集合を値とする要因に対してはファジィ確信度で与えることにした（もちろん、クリスプな集合でファジィ確信度を持つ場合や、ファジィ集合で[0,1]の確信度を持つ場合も扱うことができる）。本研究ではRC床版の損傷の原因として、原因1～原因8までの8個を取り上げることにした。

さて、RC床版の損傷原因とそれを推定するための要因がどのような関係にあるのかを調べるために、本研究では3人の維持管理の専門家にアンケート調査を行った（図-3にその一部を示す）。その結果を表-2に示す。このアンケート結果を以下に示す条件で、ニューラルネットワークによって学習を行った。

①ニューラルネットワークの入力層に原因を推定するための要因を設置する。原因を推定するための要因の値が二値であるものに対しては、値を入力するためのユニットとその確信度を入力するためのユニットを用意する必要がある。また、原因を推定するための要因の値がファジィ集合であるものに対しては、本研究では、ファジィ集合・ファジィ確信度を離散的に表現するためにそれぞれ6ユニットずつ与える。

②ニューラルネットワークの出力層に原因1～原因8までを設置する。さらに、各原因に対してファジィ確信度を与えるために6ユニットずつ用意する。

表-1　損傷原因

原因番号	内容
原因1	過大な輪荷重の作用
原因2	衝撃作用
原因3	支持桁配置の不適切
原因4	床版厚不足による剛性不足
原因5	主鉄筋量不足
原因6	配力鉄筋量の不足
原因7	荷重分配横桁の不備
原因8	主桁の不等沈下による付加曲げモーメント

問題1

下の各ケースについて、原因が過大な輪荷重の作用である確信度を答えて下さい。

	1	2	3	4	5	6
構造形式・桁	○	○				
構造形式下路式アーチ					○	○
構造形式・box			○			
示方書・昭和7年まで	○	○	○	○	○	
ひび割れ形状・幅員方向	○	○				
ひび割れ形状・橋軸				○	○	
ひび割れ形状・橋軸・幅員			○			
ひび割れ時期が非常に最近				○	○	
ひび割れ時期が最近			○			
ひび割れと輪荷重位置が近い	○	○	○	○	○	
横桁あり		○				
床版形式が2方向板				○		

答え->

図-3　アンケート調査

表-2　アンケート結果

問題番号	解答者A	解答者B	解答者C
1－1	B	D	
1－2	B	B	
1－3	A	E	C
1－4	A	E	
1－5	B	D	
1－6	C		

表-3　原因推定のための入力データ

原因推定のための要因	値	確信度
構造形式・桁	1．0	1．0
示方書・昭和7年まで	1．0	1．0
ひび割れ形状・幅員方向	1．0	1．0
ひび割れ時期	非常に最近	かなり正しい
ひび割れと輪荷重位置の距離	近い	正しい
ひび割れ密度の大きさ	普通	正しい
床版形式が2方向板である	1．0	1．0
床版厚	大きい	やや正しい

③ネットワークを４層とし、第２層、第３層のユニット数はそれぞれ２０個ずつとする。
④原因を推定するための要因が二値であるものの確信度として、「少し正しい」は0.3、「やや正しい」は0.5、「正しい」は0.7、「かなり正しい」は0.9、「絶対正しい」は1.0を与える。

例えば、アンケートの問題１の１番の質問に対する解答者Ａの解答より、次の形式の学習データを作成することが出来る。

①原因推定のための要因の値とその確信度

構造形式・桁　　：　値＝１、確信度＝１
示方書・昭和７年まで　：　値＝１、確信度＝１
ひび割れ形状・幅員方向：　値＝１、確信度＝１
ひび割れと輪荷重位置　：　値＝近い　確信度＝絶対的に正しい

ただし、ファジィ集合「近い」は離散的に{0/0, 0/2, 1/4, 0.5/6,0/8, 0/10}のように表し、「絶対的に正しい」は離散的に{0/0, 0/0.2, 0/0.6, 0.5/0.8,1.0/1.0} のように表す。

②原因１～原因８のファジィ確信度

原因１：　ファジィ確信度＝やや正しい
＝{0/0 ,0.5/0.2 ,1.0/0.4 ,
0.5/0.6 , 0/0.8, 0/1.0}

以上の作業をアンケートの各問題における各解答者の解答に対して行い、ニューラルネットワークによって学習を行った。本研究では上記の学習を行ったニューラルネットワークに対して、表-3の各々のデータを入力し、その出力値の検討を行った。まず、ニューラルネットワークに対して表-3の値と確信度を入力する。その出力を図-5（その1）～（その2）に示す。各々の図は原因１～原因８のファジィ確信度を表しており、この場合、原因１のファジィ確信度におけるメンバーシップ値0.9が最大値であるので、原因１（過大な輪荷重の作用）がその損傷原因であるといえる。同様のことを他の２つのデータに対して行うと、原因推定例２では原因２（衝撃作用）が損傷原因として出力され、原因推定例３では原因５（主鉄筋量不足）が損傷原因として出力された。

これらの出力値と維持管理の専門家へのアンケート結果とを比較すると、ほぼ一致していることがわかる。つまり維持管理部門の専門家に対するアンケート結果にニューラルネットワークを適用することによって、確信度付きプロダクションルールとファジィプロダクションルールを生成することが出来た。

４．結論

本研究では、エキスパートシステムの実用化への一つの課題である知識獲得の問題について検討し、プロダクションルールをニューラルネットワークを用いて自動生成することを試みた。通常のプロダクションルール、確信度付プロダクションルール、ファジィプロダクションルール各々に対するニューラルネットワークモデルを提案した。さらに、本方法をＲＣ床版の損傷度評価エキスパートシステムに適用し、その有用性を示した。

ニューラルネットワークを用いると、容易にルールの自動生成ができるが、問題は如何にして数多くの有用なデータを得るかである。本手法ではアンケート調査の結果を用いたが、この方法では学習データ数に限界があるので、他のデータ獲得法についてさらに検討する必要がある。

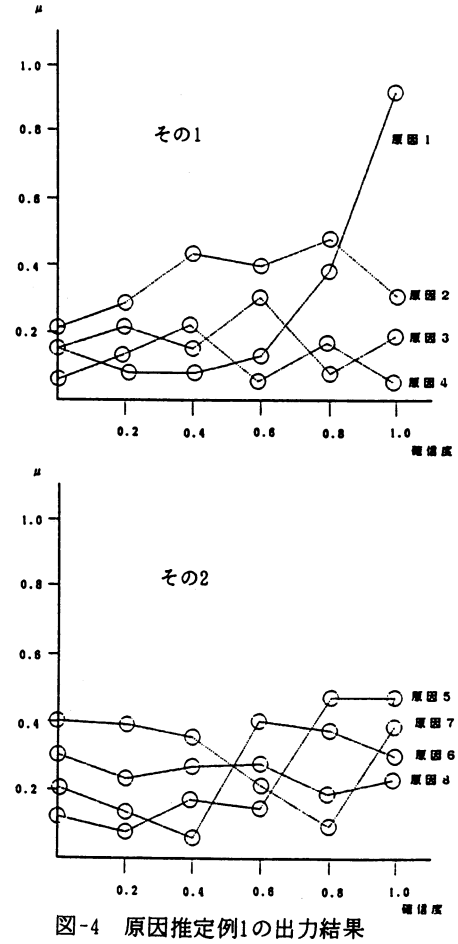


図-4　原因推定例1の出力結果

参考文献

1) 白石、古田、馬野、川上：ＲＣ床版の耐用性評価システムに関する基礎的研究、土木学会論文集、No.386、pp.285-291、1987.
2) 白石、古田、馬野、川上、大谷：構造信頼性評価のためのエキスパートシステム、材料、Vol.39、pp.19-25、1990.
3) H. Furuta and N. Shiraishi:An Expert System for Damage Assessment of Bridge Structures Using Fuzzy Production Rules, Proc. of IABSE Colloquim on Expert Systems in Civil Engineerin, pp. 197-206, 1989.
4) 高木：ニューラルネットワークの学習およびファジィとの境界、日本ファジィ学会「ファジィ推論とエキスパートシステム」ワークショップ資料、1989.

問い合わせ先：〒606 京都市左京区吉田本町
京都大学工学部土木工学教室
古田　均
Tel.075-753-5078　Fax 075-761-0646

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SA4-2

ニューラルネットによる近似識別

APPROXIMATE CLASSIFICATION USING NEURAL NETWORKS

石渕久生　　田中英夫
Hisao ISHIBUCHI　　Hideo TANAKA

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

In this paper, we propose the concept of approximate classification in the field of two group discriminant analysis. In our approach, an attribute space is divided into three subspaces. Two subspaces are for given two groups and one subspace is for a boundary area between the two groups. We also propose learning procedures of neural networks for approximate classification. The cost function to be minimized in the proposed methods is not the sum of squared errors but the weighted sum of squared errors. We propose two weighing methods which lead to possibility analysis and necessity analysis, respectively. We illustrate the proposed methods by numerical examples.

1．はじめに

本研究では，パターン認識のなかで最も基本的な問題である2群判別の問題を対象に，近似識別を行うニューラルネットの学習アルゴリズムを提案する．

2群判別を行う最も簡単な方法は，線形判別関数を用いる方法である．属性空間をn次元とすれば，線形判別関数は次のように表すことができる．

$$g(x)=a_0+a_1x_1+\cdots+a_nx_n \qquad (1)$$

このとき，n次元属性空間は，$g(x)=0$で与えられる超平面により2分割される．線形判別関数による2群判別の例を属性空間が2次元の場合で示すと，Fig. 1のようになる．Fig. 1において，黒丸は第1群に属するデータ点を表し，白丸は第2群に属するデータ点を表している．また，次の線形判別関数により，全てのデータ点が正しく判別されている．

$$g(x)=0.5x_1+x_2-0.75 \qquad (2)$$

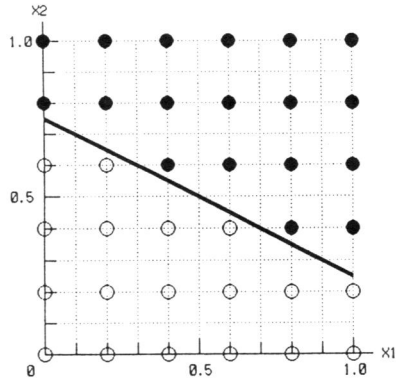


Fig. 1　線形判別関数による2群判別

一方，階層型ニューラルネットを用いれば，Fig. 2のような非線形関数による判別が可能となる．Fig. 2は，黒丸で示すデータ点に対する教師信号を1，白丸で示すデータ点に対する教師信号を0として学習を行った後のニューラルネットによる2群判別の結果である．なお，Fig. 2の境界線は，ニューラルネットからの出力値が0.45以上0.55以下の点をプロットしたものである．

このような非線形関数は，バックプロパゲーション・アルゴリズム[1,2]を用いて，学習により求めることができる．実際，Rumelhartら[2]では，ニューラルネットにより，排他的OR問題や偶奇性判定問題などの非線形性を必要とする2群判別を正しく行った例が述べられている．また，Funahashi[3]による結果を考えれば，与えられた全てのデータ点を正しく判別するような3層構造のニューラルネットが存在することがわかる．しかし，実際の学習でそのようなニューラルネットが得られる保証はない．また，過学習の問題もあり，与えられたデータ点を完全に判別するようなニューラルネットが，未学習のデータに対しても有効であるとは限らない．

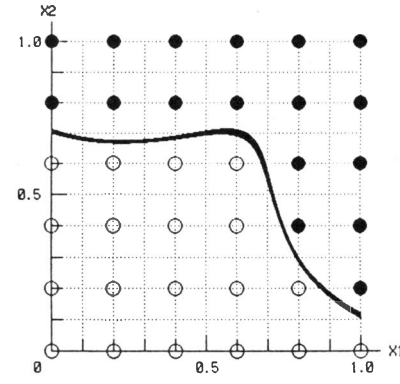


Fig. 2　ニューラルネットによる2群判別

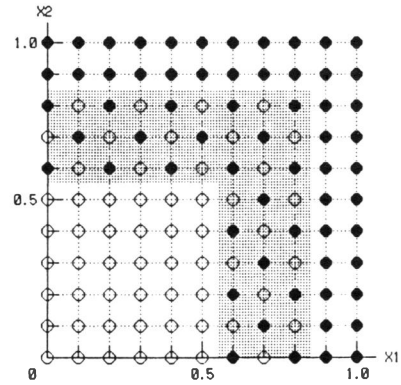


Fig. 3　境界領域が存在する2群判別問題

ここで，Fig. 3に示すような2群判別の問題を考えてみよう．このようなデータに対しても，理論的には与えられたデータを正しく判別するようなニューラル

ネットが存在する．しかし，そのようなニューラルネットを求めることは，学習時間の点から現実的ではなく，未学習データの判別に有効であるとは限らない．

本研究では，Fig.3のドットで示すような領域は二つの群に属する可能性がある境界領域であると考えることにより，2群判別問題に対する近似識別の概念を提案する．次に，境界領域の存在を仮定した近似識別を行うため，ニューラルネットの学習アルゴリズムを提案する．最後に，数値計算例により，提案手法の説明を行う．

2．近似識別

判別分析の問題は，未知データの判別を行うため，既知のデータの属性値から判別規則を求める問題である．いま，m個のサンプルの属性値が，全体集合Ω（ただしΩ $\subset R^n$）上の点$\mathbf{x}_p$，$p=1,2,\cdots,m$として与えられているとする．ただし，$\mathbf{x}_p=(x_{p1},x_{p2},\cdots,x_{pn})$であり，ベクトル$\mathbf{x}_p$はn次元属性空間内での位置を表している．さらに，m個のサンプルは2群に分けられているとし，第1群（G1）に属するデータ点の添字集合をP_{G1}，第2群（G2）に属するデータ点の添字集合をP_{G2}と表すことにする．このとき，通常の判別分析の問題は，与えられたデータ点を用いて，全体集合Ωを次のように2分割する問題と考えることができる．

$$\Omega=\Omega_1\cup\Omega_2 \tag{3}$$
$$\Omega_1\cap\Omega_2=\phi \tag{4}$$

すなわち，全体集合Ωが，第1群を表す部分集合Ω_1と第2群を表す部分集合Ω_2とに2分割されている．

このとき，次の二つの関係が成り立てば，Ω_1，Ω_2による全体集合Ωの分割は，与えられたデータ点を正しく判別することになる．

$$\mathbf{x}_p\in\Omega_1 \quad \text{for all p in } P_{G1} \tag{5}$$
$$\mathbf{x}_p\in\Omega_2 \quad \text{for all p in } P_{G2} \tag{6}$$

しかし，Fig.3で示したように，境界領域が存在するような問題では，式(1)による全体集合の2分割という方法は現実的ではなく，我々の直観に反する方法である．そこで本研究では，全体集合の2分割という方法を用いず，二つの領域Ω_1とΩ_2との間に，境界領域Ω_{12}が存在することを仮定した近似識別の方法を提案する．

すなわち，次のように全体集合Ωを3分割することを考える．

$$\Omega=\Omega_1\cup\Omega_2\cup\Omega_{12} \tag{7}$$
$$\Omega_1\cap\Omega_2=\Omega_1\cap\Omega_{12}=\Omega_2\cap\Omega_{12}=\phi \tag{8}$$

ここで，三つの領域Ω_1，Ω_2，Ω_{12}は，次のような領域である．

Ω_1：明らかに第1群に属する領域
Ω_2：明らかに第2群に属する領域
Ω_{12}：2つの群に属する可能性のある境界領域

この三つの領域を用いれば，未知データ$\mathbf{x}_p$の判別は，次の判別規則を用いて行うことができる．

R1：If $\mathbf{x}_p\in\Omega_1$ then p is G1
R2：If $\mathbf{x}_p\in\Omega_2$ then p is G2
R3：If $\mathbf{x}_p\in\Omega_{12}$ then p is G1 or G2

したがって，領域Ω_1に属するデータ点$\mathbf{x}_p$は第1群(G1)であると判断され，領域Ω_2に属するデータ点は第2群(G2)であると判断される．また，領域Ω_{12}に属するデータ点に対しては，どちらとも言えないという判断がなされる．

実際に近似識別を行う場合では，与えられたm個のデータ点$\mathbf{x}_p$，$p=1,2,\cdots,m$から，どのようにして三つの領域Ω_1，Ω_2，Ω_{12}を求めるかが問題となる．本研究では，ニューラルネットを用いて，次の条件を満たすような領域Ω_1，Ω_2，Ω_{12}を求めることにする．

$$\mathbf{x}_p\in(\Omega_1\cup\Omega_{12}) \quad \text{for all p in } P_{G1} \tag{9}$$
$$\mathbf{x}_p\in(\Omega_2\cup\Omega_{12}) \quad \text{for all p in } P_{G2} \tag{10}$$

三つの領域が条件(9)，(10)を満たせば，与えられたデータ点に関しては，判別規則R1，R2，R3に矛盾は起こらない．

3．ニューラルネットの学習アルゴリズム

3.1 ニューラルネットによる判別分析

まず，通常の2群判別をニューラルネットで行う方法について，簡単に述べる．

ニューラルネットは，出力層に1個のユニット，入力層にn個のユニットを持つ階層型ニューラルネットとし，中間層および出力層ユニットの入出力関数は，Rumelhartら[1,2]と同様にシグモイド関数を用いることにする．また，n次元ベクトル$\mathbf{x}_p$，$p=1,2,\cdots,m$が入力されたときのニューラルネットからの出力値をo_pとし，o_pに対する教師信号t_pを，次のように定める．

$$t_p=\begin{cases}1 & \text{for all p in } P_{G1}\\ 0 & \text{for all p in } P_{G2}\end{cases} \tag{11}$$

したがって，ニューラルネットの学習は，次の評価関数の最小化を目的として行われる．

$$E=\sum_{p=1}^{m}(t_p-o_p)^2/2 \tag{12}$$

学習後のニューラルネットにおいて，入力ベクトル$\mathbf{x}$に対応した出力値を$\mu(\mathbf{x})$と表すことにすれば，例えば，次のように全体集合Ωの2分割を行うことができる．

$$\Omega_1=\{\mathbf{x}\mid\mu(\mathbf{x})\geq 0.5,\ \mathbf{x}\in\Omega\} \tag{13}$$
$$\Omega_2=\{\mathbf{x}\mid\mu(\mathbf{x})<0.5,\ \mathbf{x}\in\Omega\} \tag{14}$$

したがって，ニューラルネットからの出力値$\mu(\mathbf{x})$が次の関係を満たせば，ニューラルネットにより，与えられた全てのデータ点が正しく判別されることになる．

$$\mu(\mathbf{x}_p)\geq 0.5 \text{ for all p in } P_{G1} \tag{15}$$
$$\mu(\mathbf{x}_p)<0.5 \text{ for all p in } P_{G2} \tag{16}$$

Fig.2に示す例では，ニューラルネットにより，与えられた全てのデータ点が正しく判別されている．なお，理論的には与えられた全てのデータ点を正しく判別するような3層構造のニューラルネットが存在するが，学習により得られる保証はない．

3.2 近似識別のための学習アルゴリズム

ここでは，2節で示した近似識別を行うため，ニューラルネットにより，式(7)-(10)の条件のもとで三つの領域Ω_1，Ω_2，Ω_{12}を求める方法を提案する．

まず，領域Ω_1，Ω_2，Ω_{12}を求めるため，与えられたm個のデータ点との間に次の関係を満たすような二つのニューラルネット（NN*とNN•）を求めることにする．

$$\mu^*(\mathbf{x}_p)>0.5 \quad \text{for all p in } P_{G1} \tag{17}$$
$$\mu^*(\mathbf{x}_p)\in[0,1] \quad \text{for all p in } P_{G2} \tag{18}$$
$$\mu_\bullet(\mathbf{x}_p)\in[0,1] \quad \text{for all p in } P_{G1} \tag{19}$$
$$\mu_\bullet(\mathbf{x}_p)<0.5 \quad \text{for all p in } P_{G2} \tag{20}$$

ここで，$\mu^*(\mathbf{x}_p)$，$\mu_\bullet(\mathbf{x}_p)$は，それぞれ，ニューラルネットNN*とNN•からの出力値である．式(17)-(20)より，ニューラルネットNN*は第1群(G1)のデータ点のみを正しく判別し，ニューラルネットNN•は第2群(G2)のデータ点のみを正しく判別することがわかる．なお，出力層ユニットにRumelhartら[1,2]と同様のシグモイド関数を用いているため，式(18)，(19)の条件は

自動的に成立する条件であることに注意されたい.

式(17)-(20) より，次式が成り立つ.

$$\bar{\mu}(\mathbf{x}_p) > 0.25 \quad \text{for all } p \text{ in } P_{G1} \tag{21}$$

$$\bar{\mu}(\mathbf{x}_p) < 0.75 \quad \text{for all } p \text{ in } P_{G2} \tag{22}$$

ただし，

$$\bar{\mu}(\mathbf{x}) = \{\mu^*(\mathbf{x}) + \mu_\cdot(\mathbf{x})\}/2 \tag{23}$$

である.

式(21),(22) を用いて領域Ω_1，Ω_2，Ω_{12}を次のように設定すれば，2節で示した条件式(9),(10)を満たすことがわかる.

$$\Omega_1 \cup \Omega_{12} = \{\mathbf{x} \mid \bar{\mu}(\mathbf{x}) > 0.25,\ \mathbf{x} \in \Omega\} \tag{24}$$

$$\Omega_2 \cup \Omega_{12} = \{\mathbf{x} \mid \bar{\mu}(\mathbf{x}) < 0.75,\ \mathbf{x} \in \Omega\} \tag{25}$$

式(7) の関係を用いれば，領域Ω_1，Ω_2，Ω_{12}が次のように得られる.

$$\Omega_1 = \Omega - (\Omega_2 \cup \Omega_{12}) = \{\mathbf{x} \mid \bar{\mu}(\mathbf{x}) \geqq 0.75,\ \mathbf{x} \in \Omega\} \tag{26}$$

$$\Omega_2 = \Omega - (\Omega_1 \cup \Omega_{12}) = \{\mathbf{x} \mid \bar{\mu}(\mathbf{x}) \leqq 0.25,\ \mathbf{x} \in \Omega\} \tag{27}$$

$$\Omega_{12} = (\Omega_1 \cup \Omega_{12}) \cap (\Omega_1 \cup \Omega_{12}) = \{\mathbf{x} \mid 0.25 < \bar{\mu}(\mathbf{x}) < 0.75,\ \mathbf{x} \in \Omega\} \tag{28}$$

このように領域Ω_1，Ω_2，Ω_{12}を設定したとき，2節で示した式(7)-(10)は明らかに成立する.

以上のように，式(17)-(20) を満たす二つのニューラルネットNN*とNN・が得られれば，式(26)-(28) により与えられる領域Ω_1，Ω_2，Ω_{12}を用いて近似識別を行うことができる．したがって，残された問題は，どのようにして式(17)-(20) を満たす二つのニューラルネットNN*とNN・を求めるかということである．本研究では，ニューラルネットNN* を求めるためにμ^* アルゴリズムを，NN・ を求めるために$\mu_\cdot$ アルゴリズムを次のように提案する.

[μ^*アルゴリズム]

Step 1 u:＝1とする.

Step 2 p＝1,2,･･･,mに対して，次のコスト関数を用いて，ニューラルネットの結合強度およびしきい値の学習を行う.

(i) $p \in P_{G1}$のとき

$$E_p = (t_p - o_p)^2/2 \tag{29}$$

(ii) $p \in P_{G2}$のとき

$$E_p = \omega(u)\cdot(t_p - o_p)^2/2 \tag{30}$$

Step 3 u＝u＋1として，Step 2へ戻る.

[$\mu_\cdot$アルゴリズム]

Step 1 u:＝1とする.

Step 2 p＝1,2,･･･,mに対して，次のコスト関数を用いて，ニューラルネットの結合強度およびしきい値の学習を行う.

(i) $p \in P_{G1}$のとき

$$E_p = \omega(u)\cdot(t_p - o_p)^2/2 \tag{31}$$

(ii) $p \in P_{G2}$のとき

$$E_p = (t_p - o_p)^2/2 \tag{32}$$

Step 3: u:＝u＋1として，Step 2へ戻る.

この二つのアルゴリズムにおいて，重み$\omega(u)$ は，次のような条件を満たすように設定されるものとする.

$$\omega(1) \fallingdotseq 1 \tag{33}$$

$$\omega(u+1) \leqq \omega(u) \tag{34}$$

$$\lim_{u \to \infty} \omega(u) \to +0 \tag{35}$$

例えば，次のような減少関数が考えられる.

$$\omega(u) = a^u, \quad 0 < a < 1 \tag{36}$$

$$\omega(u) = \frac{1}{1 + (cu)^b}, \quad 0 < b, c \tag{37}$$

また，これらのアルゴリズムの停止基準としては，式(17)-(20) に加えて，次のような基準が考えられる.

(i) $E_p < \varepsilon$ for p＝1,2,･･･,m (38)

(ii) $\sum_{p=1}^{m} E_p < \varepsilon'$ (39)

(iii) $u \geqq K$ (40)

ここで，ε，ε' は非常に小さな正の数であり，Kはアルゴリズムの繰り返しの上限を与える整数である.

4．数値計算例

ここでは，簡単な数値計算例により，前節までに示した方法の説明を行う.

数値計算例におけるニューラルネットの学習は，個々のデータ点ごとに学習を行う逐次修正法を用い，学習の速度を速くするため，慣性項を導入した[2]．なお，学習係数は，$\eta = 0.25$とし，慣性項に関する係数は，$\alpha = 0.9$ と設定した.

一方，重み$\omega(u)$として，次のような減少関数を用いた.

$$\omega(u) = \frac{1}{1 + (u/1000)^2} \tag{41}$$

[例題1]

全体集合Ωを単位区間[0,1] とし，21個のデータ点x_p＝0, 0.05, ････, 0.95, 1が，次のように2群に分けられているとする.

第1群＝ {0.3, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.7}

第2群＝ {0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.35, 0.65, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1}

このデータでは，$0.4 \leqq x \leqq 0.6$のデータ点は全て第1群に属しており，$x \leqq 0.25$および$0.75 \leqq x$のデータ点は全て第2群に属している．また，$0.25 < x < 0.4$および$0.6 < x < 0.75$ の領域は，どちらの群にも属する可能性のある境界領域と考えることができる.

このようなデータに対し，中間層に5個のユニットを持つニューラルネットを用い，Rumelhart[1,2]らによるＢＰアルゴリズムにより各々のデータ点に対して10,000回の学習を行った．学習後のニューラルネットからの出力値と，第1群および第2群に判別される領域Ω_1，Ω_2を示すと，Fig. 4 のようになる．Fig. 4 に示す例では，x＝0.35の点とx＝0.65の点が正しく判別されていない.

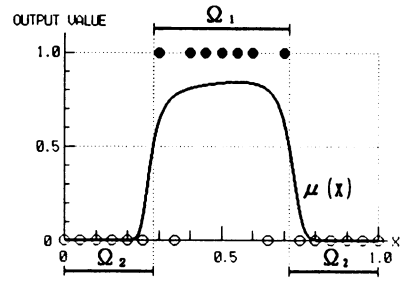


Fig. 4　ＢＰアルゴリズムによる学習の結果

次に，同様のニューラルネットを用い，3.2 で提案したμ^* アルゴリズムおよび$\mu_\cdot$ アルゴリズムにより10,000回の学習を行った結果を，Fig. 5 およびFig. 6 に示す．Fig. 5 では，第1群に属するデータ点を重視した結果が得られており，Fig. 6 では，逆に第2群に属するデータ点を重視した結果が得られていることがわかる．このようにして得られた二つのニューラルネットを用いて，三つの領域Ω_1，Ω_2，Ω_{12}を式(26)-(28) より求めた結果を，Fig. 7 に示す．Fig. 7 では，Ω_1 は明らかに第1群に属している領域を，Ω_2 は明

らかに第２群に属している領域を，Ω_{12}は二つの群の間の境界領域を表わしている．Fig.７から，提案手法で求めた三つの領域は，我々の直観的な認識と非常によく一致していることがわかる．

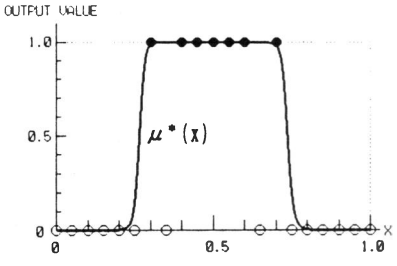


Fig.５　μ^* アルゴリズムによる学習の結果

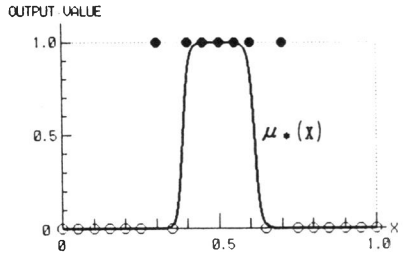


Fig.６　$\mu_\bullet$ アルゴリズムによる学習の結果

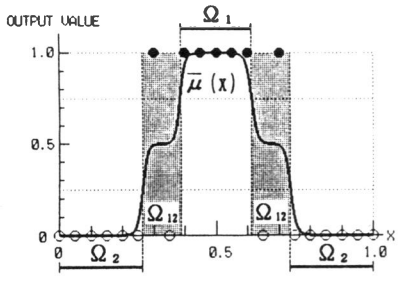


Fig.７　提案手法により求められた３領域

[例題２]

全体集合Ωを[0,1]×[0,1]とし，121 個のデータ点が，Fig.３のように与えられているとする．このとき，通常のＢＰアルゴリズムおよび提案手法により，中間層に５個のユニットを持つニューラルネットを用い，て10,000回の学習を行った結果を，それぞれ，Fig.８およびFig.９に示す．ただし，Fig.８は，ニューラルネットからの出力値$\mu(x)$が，$0.49 \leqq \mu(x) \leqq 0.51$である点をプロットしたものである．Fig.９から，提案手法により，我々の直観的な理解と非常によく一致した結果が得られていることがわかる．

５．おわりに

本研究では，２群判別問題を対象に，近似識別のためのニューラルネットの学習アルゴリズムを提案した．学習アルゴリズムに関する従来の多くの研究は，できるだけ短い計算時間で与えられたデータを正しく判別することを目的としている．これに対し，提案手法では，多次元属性空間内にどちらの群にも属する可能性のある境界領域が存在するということを前提としている．したがって，提案手法を用いて未知データの判別を行う場合では，二つの群のどちらかに強制的に振り分けるのではなく，どちらとも言えるという判断を行うことが可能となる．これは，例題で示したように，人間の判断と非常によく一致したものである．また，本研究で提案したμ^* アルゴリズムおよび$\mu_\bullet$ アルゴリズムにより得られるニューラルネットからの出力値は，それぞれ，区間値メンバーシップ関数の上限値および下限値とみなすことができる[4,5]．

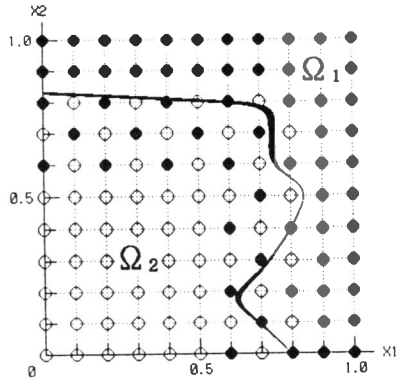


Fig.８　ＢＰアルゴリズムによる２群判別

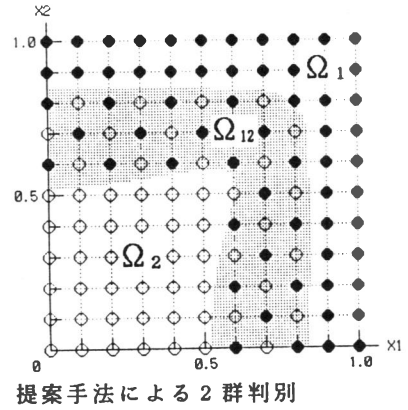


Fig９　提案手法による２群判別

参考文献

1) D.E.Rumelhart, G.E.Hinton, R.J.Williams: Learning Representations by Back-Propagating Errors, Nature, Vol.323, pp.533～536 (1986)

2) D.E.Rumelhart, J.L McClelland and the PDP Research Group: Parallel Distributed Processing (Vol.1), pp.318～364, MIT Press (1986)

3) K.Funahashi: On the Approximate Realization of Continuous Mappings by Neural Networks, Neural Networks, Vol.2, pp.183～192 (1989)

4) 石渕久生，田中英夫，藤岡亮介，田村亮二：ニューラルネットによるメンバーシップ関数の同定，電子情報通信学会論文誌ＤⅡ（1990年８月号）

5) H.Ishibuchi and H.Tanaka : Identifications of Real-valued and Interval-valued Membership Functions by Neural Networks, Proceedings of International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks (IIZUKA '90)

問い合わせ先

〒591 堺市百舌鳥梅町4-804
大阪府立大学工学部経営工学科
石渕久生
TEL. 0722-52-1161　EXT.2377
FAX. 0722-59-3340

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SA4-3

ニューラルネットワークとファジィ推論を用いたパターン認識

PATTERN RECOGNITION BY NEURAL NETWORKS AND FUZZY INFERENCE

高木敏幸　　采原敬三　　中西祥八郎
Toshiyuki TAKAGI, Keizo UNEHARA and Shohachiro NAKANISHI

東海大学　工学部
Faculty of Engineering, TOKAI University

Abstract

The authors propose a system to classify noisy patterns, which consists of some neural networks and fuzzy inference. Entire pattern to classify is divided into some blocks, and a neural network is corresponding to one of these blocks. The single neural network can not classify the very noisy pattern in which its feature parts are still remained. Then, we use some neural networks which are corresponding to each divided blocks of entire pattern, and use the fuzzy inference to classify the noisy pattern, like a human thinking.

1．はじめに

ニューラルネットワークは、生体の脳、神経系が持つ機能や原理に学んだ工学的情報処理システムである。近年、その特徴である並列処理機能や学習機能が注目され、画像処理、制御などさまざまな分野でパターンの認識等多方面に用いられている。パターンの認識を行う場合、認識対象の一部分を覆い隠すようなノイズや、一部分が欠落したノイズが対象に入ってくることがある。しかしながら、ニューラルネットワークは対象の全体の特徴抽出を行っているので、1個のニューラルネットワークでこのようなノイズで汚された対象のパターンを認識することは困難である。これに対して、人間はノイズによって隠れずに現れている対象の特徴的な部分からその全体像を連想することができる。つまり、対象の特徴的な部分が現れていれば、その他の部分が汚されていたり欠損したりしていても人間はその対象を正確に認識することができる。そこで、少しでも人間の認識に近い機能を持つニューラルネットワークを構成する方法として、複数個のニューラルネットワークとファジイ推論を用いてパターンを認識する方法を示す。すなわち、この方法を用いれば、かなりの部分が覆い隠されたり、あるいは情報が欠落したりしているようなノイズに汚されたパターンでも特徴的な部分が残されていれば正確なパターンを識別できることを示す。

2．ニューラルネットワーク

ニューラルネットワークは結合の型によって、Perceptronに代表される階層的ネットワークと、Hopfieldのネットワークに代表される非階層的ネットワークに大別されるが、本システムでは、階層的ネットワークの学習法である誤差逆伝播学習 (Error Back Propagation Learning) ネットワークを用いる。この学習法は、望ましい入出力パターンの組 $\{x_r, y_r\}$ を決め、望ましい入力パターンx_rを入力したときの出力値と望ましい出力パターンy_r との差を誤差情報とし、これを基に結合を逐次修正する誤り訂正型の学習法である。ただし、rはあるパターンを示す。また、入力ユニットがm個，出力ユニットがs個のニューラルネットワークにおける望ましい入出力パターンの組は、(1),(2)式のように記述される。

$$x_r = (x_{r1}, x_{r2}, \cdots, x_{rm}) \quad (1)$$

$$y_r = (y_{r1}, y_{r2}, \cdots, y_{rs}) \quad (2)$$

$$(r = 1, 2, \cdots, s)$$

3．システム構成

パターンの認識を行うとき、何らかの理由で図1のような対象パターンの一部分を覆い隠すようなノイズや、一部分が欠落したノイズで対象が汚されることがある。ニューラルネットワークは対象の全体の特徴抽出を行っているので、このように多くの部分がノイズで汚されたような対象のパターンを1個のニューラルネットワークで認識することは困難である。

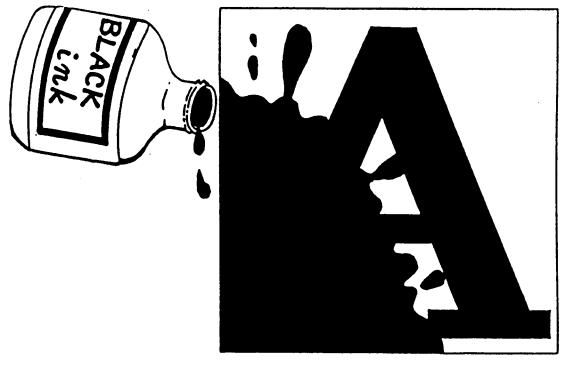


図1．ノイズが入っているパターン

一方、人間は対象パターンの特徴的な部分からその全体像を連想することができるので、このようにノイズで汚された対象パターンでも正確に認識することが可能である。このような人間の能力に少しでも近い能力をニューラルネットワークに持たせるために、複数個のニューラルネットワークを用いて認識対象パターンの部分的な特徴の各ニューラルネットワーク学習させる。

一般に、ニューラルネットワークは複数の出力ユニットを持っており、この各出力ユニットの値によってパターンの類別等の判断を行っている。すなわち、これらの各出力ユニットの値はなんらかの情報を提供していて、この情報に基づいてニューラルネットワークは判断していると考えられる。、しかし、これらの情報が完全に生かされているとは考えにくい。例えば、あるパターンを類別する場合、そのパターンに対応するユニットの値があるしきい値以上で、かつその他のユニットの値があるしきい値以下の場合のみパターンの類別が可能となる。しかし、このような値を各ユニットが取る場

合ばかりではない。このような場合には、各ユニットの値はなんらかの情報を示しているにもかかわらず、その情報は生かされることなく判断不能として葬りさられる。そこで、本システムではこれらニューラルネットワークの出力ユニットの値はそのユニットに対応する対象に関する情報を示しているものとして、これらの情報をファジィ的に取り扱うことにする。すなわち、ファジィ推論を用いて、パターンのある一部分の特徴を学習している複数のニューラルネットワークの各出力ユニットの値から全体のパターンを推論してそのパターンを判別・認識する。

システムの概略図を図２に示す。本システムは特徴抽出プロセスと推論プロセスの２つのプロセスから構成されている。特徴抽出プロセスでは、複数個のニューラルネットワークを用いて、パターンの各部の特徴をそれらに対応するニューラルネットワークに学習させる。これら複数個のニューラルネットワークの出力情報はつぎの推論プロセスに送られる。推論プロセスでは、複数個のニューラルネットワークの出力情報から、ファジィ推論を用いてパターンを認識するための処理が行われ、その結果が出力される。

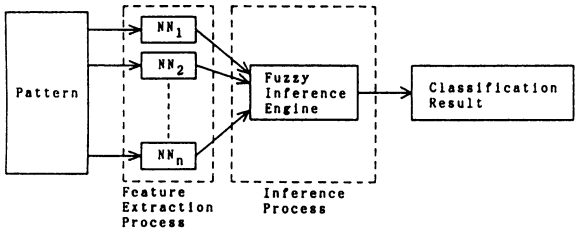


図２．システム概略図

３－１．特徴抽出プロセス

認識の対象となるパターンの部分的な特徴を抽出するために、まず、このパターンを図３に示すようにいくつかのブロックに大きく分割する。この分割によって生成されるブロックをX_i(i= 1, 2, …, n) で表し、これらのブロックにはニューラルネットワークNN_i(i= 1, 2, …, n) をそれぞれ対応させる。ただし、nはブロックの数を表す。従って、パターンの分割個数だけのニューラルネットワークが必要となる。これらの分割を用いて、パターン全体をつぎのようなベクトルXによって表される。

$$X = (X_1, X_2, \cdots, X_n) \qquad (3)$$

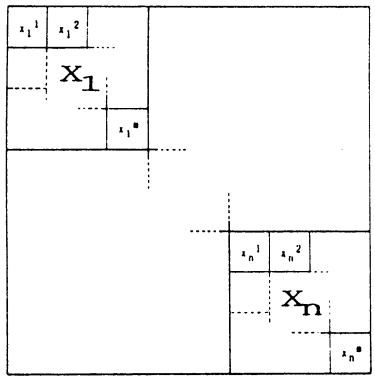


図３．パターンを分割したブロック

つぎに、それぞれのおおきなブロックX_i を図３に示すようないくつかのさらに小さなブロックx_i^j(j= 1, 2, …, m)に分割する。 ただし、x_i^jはブロックX_iの中のｊ番目の小さなブロックを示す。 このことより、ブロックX_iはつぎのように記述される。

$$X_1 = (x_1^1, x_1^2, \cdots, x_1^m)$$
$$X_2 = (x_2^1, x_2^2, \cdots, x_2^m)$$
$$\vdots$$
$$X_n = (x_n^1, x_n^2, \cdots, x_n^m) \qquad (4)$$

ブロックX_iの情報は、ニューラルネットワークNN_iの入力情報として用いられる。 たとえば、ブロックX_2に対応するニューラルネットワークNN_2への入力情報は x_2^1, x_2^2, …, x_2^m によって表される。 それぞれのニューラルネットワークNN_i は、その出力層に分類するパターンの数と同数の出力ユニットを持つ。各ニューラルネットワークNN_i の出力情報をO_i(i= 1, 2, …, n) によって表し、そのニューラルネットワークの各出力ユニットの出力値を o_{ik}(k= 1, 2, …, s) によって表すと、各ニューラルネットワークの出力情報O_iはつぎのように記述される。

$$O_1 = (o_{11}, o_{12}, \cdots, o_{1s})$$
$$O_2 = (o_{21}, o_{22}, \cdots, o_{2s})$$
$$\vdots$$
$$O_n = (o_{n1}, o_{n2}, \cdots, o_{ns}) \qquad (5)$$

ここで、sは分類するパターンの数を表している。これらの出力情報はつぎの推論プロセスに送られ推論機構の入力となる。

３－２．推論プロセス

大半の部分がなんらかのノイズで汚されているようなパターンを１個のニューラルネットワークで判断・認識するとき、このネットワークの各出力ユニットの情報は正確に生かされない。すなわち、このニューラルネットワークでパターンを判断・認識することができない。そこで、このパターンを分割し、それらの部分に対応するニューラルネットワークに分割部分の特徴を学習させる。これらのニューラルネットワークの各出力ユニットの出力情報にはパターンがノイズに汚されていてパターンを認識するのに使用できないものと、ノイズがなくて特徴を把握しているものがある。しかしながら、どのニューラルネットワークにノイズで汚されている部分が対応しているかを各ネットワークは判断することができない。従って、各ニューラルネットワークの出力情報がいかなる組合せのとき正確なパターンを認識するかを考えて、これに対応するルールを構成する。このとき、各ニューラルネットワークのそれぞれの出力ユニットの値はファジィ的な情報を提供していると考えられるから、これらの情報を取り扱うルールにはファジィ推論で用いられているルールを用いる。すなわち、ファジィ推論によってノイズに汚されているパターン全体を認識する。

図４にファジィ推論に用いられるファジィ変数を表すメンバーシップ関数μ_{ik}^l（o_{ik}）を示す。ただし、l (l= 1, 2, 3)は図３に示すファジィ変数のラベルＺＯ，ＰＭ，ＰＢにそれぞれ対応し、ｋは分類するパターンに対応する。これらのファジィ集合は、ニューラルネットワークの出力値を台集合に持ち、区間［０，１］に規格化されたものである。まず、

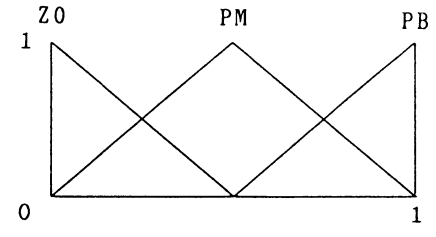


図４．ニューラルネットワークの出力を分類するためのメンバーシップ関数

任意のニューラルネットワークＮＮiの出力値ｏik がこれら３個のファジィ集合の中のどれに最も属するかを検出する。たとえば、ニューラルネットワークＮＮ2 の第３番目の出力値ｏ23 が0.8のとき、図４に示すメンバーシップ関数より $\mu_{23}^{1}(0.8)=0.0$, $\mu_{23}^{2}(0.8)=0.4$, $\mu_{23}^{3}(0.8)=0.6$ となる。これらのグレードより、出力値ｏ23 はラベルＰＢのファジィ集合に最も属すことが図４から容易に検出される。他の出力値についても同様の処理を行い、出力値が大きな順に、$L_{ik}^{1}(1)$, $L_{ik}^{1}(2)$, …, $L_{ik}^{1}(s)$とする。このとき、出力値が最も大きな$L_{ik}^{1}(1)$と次に大きな$L_{ik}^{1}(2)$が示すファジィ変数のラベルを基に判断を行う。ファジィ変数のラベルが等しいときは、このニューラルネットワークの出力情報を除き、他のニューラルネットワークについても同様の処理を行う。

上記の手順によって決定される分類パターンに対して、次のファジィ推論を行う。ファジィ推論ルールは「If … then ～ 」の形式をとり、前件部及び後件部のファジィ変数は図５に示すメンバーシップ関数によって特徴づける。これらのメンバーシップ関数に付いているラベルＺＯ、ＰＢ、などは次のようなものを表している。

ZO: Zero,　　PS: Positive Small,
PM: Positive Medium,　　PB: Positive Big,
PL: Positive Large.

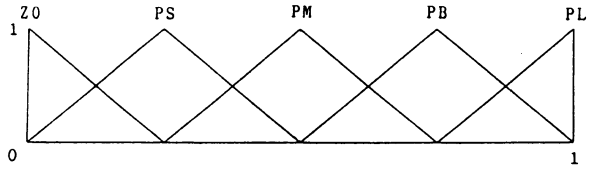


図５．ファジイ推論用メンバーシップ関数

また、前件部のファジィ変数はニューラルネットワークの出力値を台集合に持ち、後件部のファジィ変数はパターンをどの程度認識できたかを表す数値を台集合に持つ。これらは共に、区間［０，１］に規格化されている。また、推論ルールはつぎのように記述される。

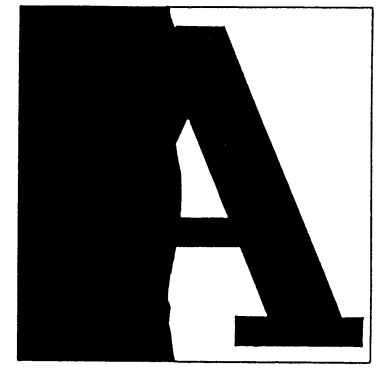
$$\text{If } O_{1k} \text{ is } Q_{1ku} \text{ and } O_{2k} \text{ is } Q_{2ku} \text{ and } \cdots \text{ and } O_{nk} \text{ is } Q_{nku} \text{ then } y_k \text{ is } P_{ku} \quad (u=1, 2, \cdots, t) \tag{6}$$

ここで、Q_{1ku}, P_{ku}はそれぞれ前件部，後件部のファジィ変数を表す。ｕは各ニューラルネットワークの出力情報に対して上記の処理を行うことによって決定される分類するパターンの組合せを表している。つまり、与えられたパターンについての適切な解は、各ニューラルネットワークの出力状態の組合せから得られる。

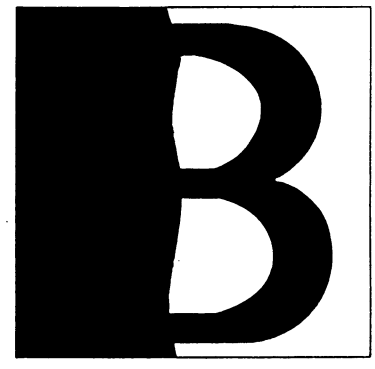
複数のニューラルネットワークとファジィ推論を用いた本システムは、ノイズによってかなりの部分が覆われてはいるが特徴的な部分が現れているパターンを認識することが可能である。

４．適用例

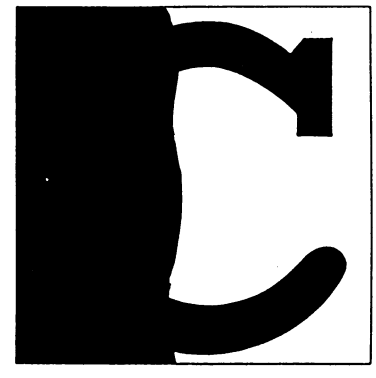
まず初めに、パターン全体を入力情報として分類を行うニューラルネットワークＮＮ0を構築し、このニューラルネットワークに図６，７に示すアルファベットの大文字 ”Ａ”，”Ｂ”，”Ｃ”のパターンを学習させる。次に、与えられるパターンを４つのブロックＸi(i= 1, 2, 3, 4)に分割し、それぞれのブロックのパターン情報を入力とする４つのニューラルネットワークＮＮi(i= 1, 2, 3, 4)を構築する。各ニューラルネットワークＮＮiには、ブロックＸiをさらに６つ



（ａ）ノイズが入っているパターン” Ａ ”



（ｂ）ノイズが入っているパターン” Ｂ ”

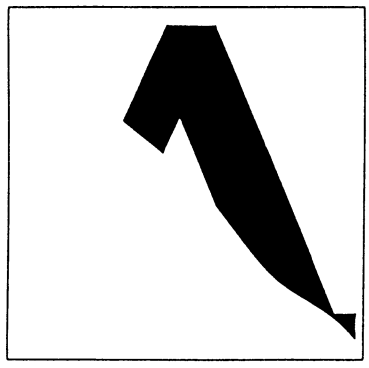


（ｃ）ノイズが入っているパターン” Ｃ ”

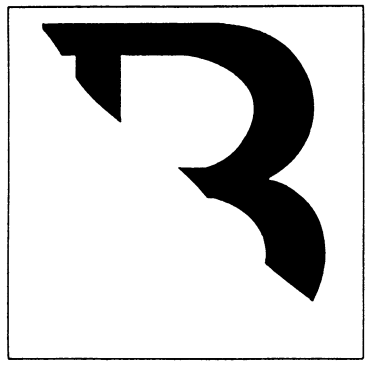
図６．ノイズが入っているパターンの例１

Pattern	k	NN_0		NN_1				
		O_0	Result	O_1	O_2	O_3	O_4	Result
A	1	0.043	No classification	0.003	0.966	0.408	0.978	Classify into A
	2	0.543		0.997	0.012	0.206	0.201	
	3	0.033		0.018	0.004	0.001	0.000	
B	1	0.004	No classification	0.003	0.023	0.408	0.016	Classify into B
	2	0.883		0.997	0.964	0.206	0.991	
	3	0.110		0.018	0.015	0.001	0.021	
C	1	0.004	No classification	0.003	0.011	0.408	0.007	Classify into C
	2	0.450		0.997	0.015	0.206	0.010	
	3	0.960		0.018	0.953	0.001	0.967	

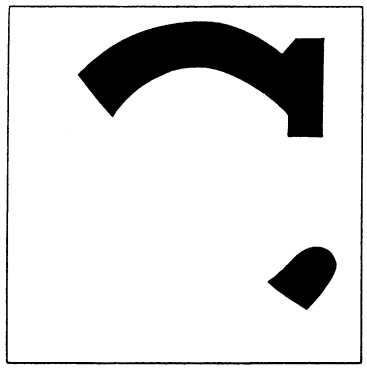
表１．例１の出力結果



（ａ）ノイズが入っているパターン”Ａ”



（ｂ）ノイズが入っているパターン”Ｂ”



（ｃ）ノイズが入っているパターン”Ｃ”

図７．ノイズが入っているパターンの例２

Pattern	k	NN_0		NN_i				
		O_0	Result	O_1	O_2	O_3	O_4	Result
A	1	0.480	No classification	0.002	0.966	0.021	0.366	Classify into A
	2	0.074		0.006	0.012	0.015	0.806	
	3	0.063		0.211	0.004	0.018	0.001	
B	1	0.041	No classification	0.000	0.023	0.021	0.140	Classify into B
	2	0.563		0.035	0.964	0.015	0.906	
	3	0.213		0.977	0.013	0.018	0.000	
C	1	0.060	No classification	0.000	0.011	0.021	0.028	Classify into C
	2	0.207		0.035	0.013	0.015	0.004	
	3	0.787		0.977	0.953	0.018	0.120	

表２．例２の出力結果

に分割したブロックx_i^j(j= 1, 2, …, 6)のパターン情報を学習させる。ここで、パターン”Ａ”，”Ｂ”，”Ｃ”を学習したニューラルネットワークNN_0，NN_iにノイズが入っているパターンを入力し、このときのニューラルネットワークの出力情報O_0，O_iを表１，２に示す。この表において、ｋ（＝１，２，３）はそれぞれ分類するパターン”Ａ”，”Ｂ”，”Ｃ”を表す。

図６に全体のほぼ半分がノイズで覆われた認識対象を示す。これらのパターンをニューラルネットワークに与えたときの出力値を表１に示すが、対象の特徴的な部分が現れているにもかかわらず、これらのパターンの分類がニューラルネットワークNN_0には不可能であることをこれらの数値は表している。また、図７に図６と異なり全体のほぼ半分がノイズによって欠落している認識対象を示し、これらのパターンをニューラルネットワークNN_0，NN_1に与えたときの出力結果を表２に示す。この出力結果は、従来のニューラルネットワークNN_0が図７に示すこれらのパターンを分類できなかったのに対し、分割された各ブロックのパターンを分類するニューラルネットワークNN_iがこれらのパターンの特徴を抽出できたことを表している。

次に、図７－（ａ）に示す認識対象を例にとって、ファジィ推論の説明を行う。この応用例では、ファジィ推論ルールは一般に(7)式の形をとる。

$$\text{If } O_{1k} \text{ is } Q_{1ku} \text{ and } O_{2k} \text{ is } Q_{2ku} \text{ and } O_{3k} \text{ is } Q_{3ku} \text{ and } O_{4k} \text{ is } Q_{4ku} \text{ then } y_k \text{ is } P_{ku} \qquad (7)$$

表２より、ニューラルネットワークNN_1において、$L_{13}^1(1)$と$L_{12}^1(2)$が示すファジィ変数のラベルは共にＺＯであるので、NN_1の出力情報は取り除かれる。NN_3においても同様に、$L_{31}^1(1)$と$L_{33}^1(2)$が示すファジィ変数のラベルは共にＺＯであり、NN_3の出力情報も取り除かれる。この処理によって、(7)式の推論ルールは次式に等しい働きをする。

$$\text{If } O_{2k} \text{ is } Q_{2ku} \text{ and } O_{4k} \text{ is } Q_{4ku} \text{ then } y_k \text{ is } P_{ku} \qquad (8)$$

５．まとめ

本稿では、複数個のニューラルネットワークとファジィ推論を用いて、パターン認識を行うシステムを構成した。本システムでは、ニューラルネットワークによって認識対象のパターンの部分的な特徴の抽出を行った。また、ニューラルネットワークの出力を基に、ファジィ推論によって人間の判断に相当する処理を試みた。ノイズが入っている認識対象のパターンをこの手法によって分類した結果を表に示したが、これらの結果は、本手法がノイズが入っている対象の認識にも有効であることを表している。

参考文献

1) 菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社（1988）
2) R.P. Lippmann: An Introduction to Computing with Neural Nets, IEEE ASSP MAGAZINE, 4/22 (1987)
3) 麻生英樹：ニューラルネットワーク情報処理，産業図書(1988)
4) 舟久保登：視覚パターンの処理と認識，啓学出版(1990)

[問い合わせ先]
〒259-12 神奈川県平塚市北金目１１１７
東海大学 工学部 電気工学科
中西 祥八郎
TEL.0463-58-1211 EXT.4025
FAX.0463-58-1812

SA4-4

人間の問題解決モデルを利用したヒューマンインタフェース用人工感情の実現

Development of Artificial Emotion by Psychological Problem Solving Models Resulting in an Improvement of Human Interface Systems.

上石 陽一、 中村 健、 八重樫 清美
Yohichi AGEISHI Ken NAKAMURA Kiyomi YAEGASHI
小山田 茂、 村上 由美子
Shigeru OYAMADA Yumiko MURAKAMI

株式会社 アドイン研究所 システム開発部
AdIn Research, Inc. System Development Dept.

[Abstract]: In this paper, we present the development of "artificial-emotion" using a problem solving model and present an application of this model to human interface systems. The human interface using dynamic world models is one of important factors in multi-objective systems because human interface using knowledge-based reasoning cannot explain the system's dynamics. We also propose a method to describe dynamic world models using fuzzy sets in the state space.
[Keywords] : problem solving model , human interface , artificial emotion , dynamic state model , state space , nonmonotonic reasoning

1. まえがき

システムは時間遷移とその状態への人間の理解という個別的要素を含む。そのため問題解決にはオペレータやユーザの存在が重要で、システム工学では人間－機械協調システムとして捉える。系の部分な運用は数理的モデルや手続き型データ処理で十分だが、個別的・非普遍的要素を含むシステム全体の問題解決には、熟練者の問題解決方略を積極的に活かすインテリジェント化が必要である。単なる自動化の拡大や人間－機械間の対話性の改善では達成できず、問題の予測と解決方略をシステムが人間に分かりやすく説明するヒューマンインタフェースが相互の協調を可能とする。認知工学のJ. Rasmussen[1][2]は人間の問題解決処理を３段階（ｽｷﾙﾍﾞｰｽ、ﾙｰﾙﾍﾞｰｽ、知識ﾍﾞｰｽ）の行動に分けた、示唆に富む考え方を示している。

課題として【１】問題解決法に関し、当面の改良と将来の問題解決モデル構築の検討。【２】知識表現パラダイムに関し枠組みと静的知識の限界を超える推論空間の検討。【３】ヒューマンインタフェースの知識記述に関し、動的世界モデルの可能性検討、などが必要である。

動的推論空間は、今後プロダクションシステムに代わる推論のパラダイムになると考えられる。実験で人間の動的情報処理が構成できれば、問題解決モデルなどのファジィのモデル論に意味があったことになる。動的世界モデルの非単調性（来歴から推論結果が変動）と、問題解決モデルの有効性とを同時に検証できる実験テーマとして【人工感情 :造語】の構築を取り上げた。実験の目標は複数の登場人物が、来歴に及ぶ自己診断や独自の判断をし、対話では適切な発話を表出できることとした。

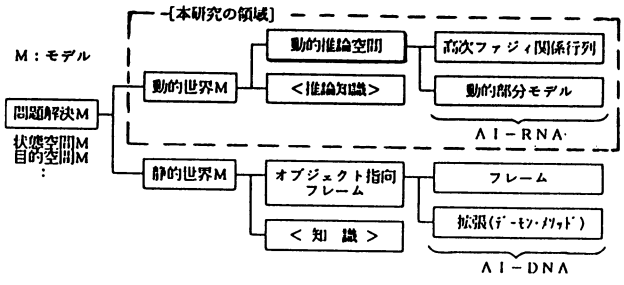


図1 問題解決モデルの構成

動的世界モデルは複数の推論空間（定量的予測関数と高次ファジィ関係行列を連動：図１）の階層的配置で構成、各インタフェースを定義し知識を入力した。動的推論空間のルール層以上への応用を探るためと、評価に当たり疑似的な感情表現（思考過程を伴わない検索だけの表面的な対話）と混同しないために、フレーム型知識ベースやデータベースを除外、表情・発話データと動的推論空間のみで実験した。以下本論では検討内容と、実験と評価、そして今後の研究の方向などに付いて述べる。

2. ヒューマンインタフェース

2.1 人間の問題解決モデル

以下がインテリジェント化を要するシステムである。

1. 問題構造が明確でないシステム
2. 高度の多目的システム

前者は自然界のバラつきや非線形性など数理的モデル化が困難なシステムで、熟練者の感によるファジィ制御の実例が有効性を示した。後者には、人間社会の多様性と関わり動的目的変更などの自律性を必要とする、意思決定、公報、セキュリティ、プラントのガイダンスなどが相当する。システムの状態をグラフなどよりさらに簡潔に表現できるヒューマンインタフェースによって、人間の意思決定を十分に支援できる人間－機械協調システムが可能となる。ヒューマンインタフェースの要件は：

1. 状況分析と問題点（原因）の解明ができる。
2. 自分の意思で方略と行動を決定できる。
3. 言語を解し、的確な言語、図形で説明できる。

Rasmussen はプラントのオペレータを対象にその情報処理過程を分析、問題解決を３段階の行動レベルに分け、レベル毎に情報処理（識別、決定、計画）の流れを持つモデルを考えた。簡単にまとめると

［行動レベル］	［行動内容］
1. スキルベース	反応的、ズレを修正
2. ルール 〃	傾向を判断し最適な行動を計画
3. 知識 〃	根本的な問題を分析的に診断

［処理の種類］	［処理内容］
a. 観測、同定	状況問題の把握(Identification)
b. 決定	方略の決定(Decision)
c. 計画	タスクの計画(Planning)

レベル1.の処理システムはメータで危険を表示、人間側はレベル2.と3.を受け持ち状況把握と予測を立てる。レベル2.の傾向表示で人間は、レベル3.の原因把握に専念できる。大規模プラントでは把握が困難で危険なため次第にレベル3.までを計算システムが支援する傾向にあり、さらにマクロな説明性を要求される。ヒューマンインタフェースは人間－機械協調作業の誤りを無くすため、問題分析や方略立案過程の良い説明性を必要とする。

2.2 問題解決モデルの改良

図２の問題解決の構造で破線内が Rasmussenの人間の問題解決モデルに近似する。横軸のレベル 1は観測誤差最小とするよう補正を行うfeedback的動作である。従来のルールや関数はレベル2(S2,P2)に記述され、成立条件に対応するシーケンスを生起する。Rasmussenはレベル3.を知識ベース的行動とするが現在の知識表現の枠組みでは動的な世界を記述しにくく、下記の検討を要す。

1. レベル3.情報処理の具体的要件
2. 動的世界モデル構築の検討[7][8][9]

筆者らはレベル 3を目標(object)ベース的行動と定義

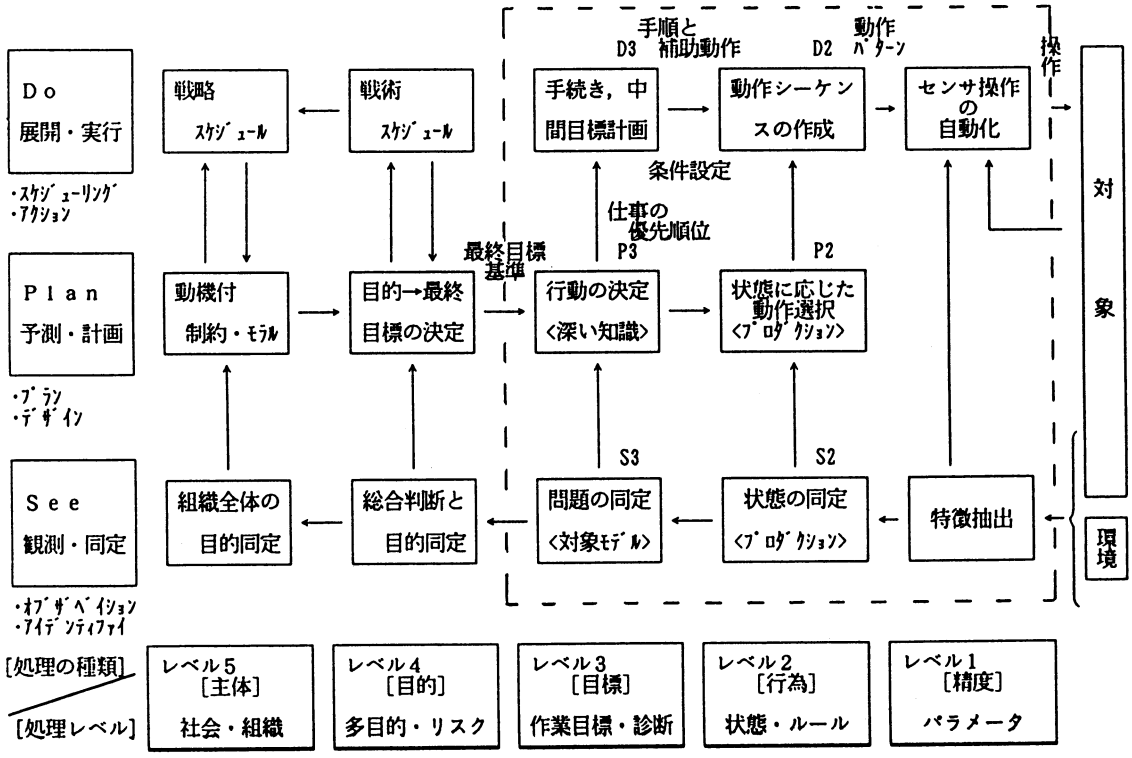


図2 問題解決モデルの区分

し直し、そのメタレベル概念をレベル4に目的(purpose)的行動として設定した。レベル 5に近いほど社会的機能を持つ。レベル 3は対象が正常か否かを診断、目標を達成し得る判断と計画を行う。エキスパートシステムでいう対象モデルはS3に静的構造知識と関係が記述される。S2,S3 は状態空間であり、状態予測から問題のモードへの写像化を行い、次段で意思行動の決定を可能とさせる。

P3→P2への情報伝達も Rasmussenのモデルにはないが、P2が、P3の行動規範に見合う評価関数から動作選択を行う予見型制御部分である場合には必要となる。

縦軸は処理の種類[Plan, Do, See]を表す。RasmussenのDecision, Planning, Identificationに区分top-down的意思を決定→計画展開する方法はシステム目的がよほど固定できないとルール作成ができない。決定部には計画しつつ意思を決定する日本流のPlanning（弱決定）を当て、同様に次段処理にはDoを当てて知識記述性を高めた。なおSeeは語呂の選択で、実際はIdentificationが正しい。

次に、レベル 4が多目的追求システム[9](目的空間モデル）で、効用が最大となる最終目標を決定しレベル 3に与える。レベル 5は組織知能の範囲に等しく多目的追求の指針を決定しレベル 4に与える主に人間側の階層。

3．知識表現のパラダイムの問題点

ファジィ理論が知識工学分野に浸透するようになった現在、問題を明確にせずに知識表現のパラダイムを取り込むことはファジィの良い性質を失う危険性がある。

3.1 プロダクションシステムの問題点

ルールが詳述される実用システムでは推論treeの記述洩れや矛盾が発見しにくい。

オブジェクト指向フレームに静的普遍的知識が記述されるAI-CADはデーモンのフレーム間の制約条件など直接的情報取得によりプロダクションルールは不要となる。

また非普遍的な対象の認識では、動的問題解決のために分布、連続、非線形、動的過程の記述が必要で、不確実性推論（確信度, Dempster-Shafer理論）は無理があり、かつ多大の処理時間を要す。定性的ルールでは定量関数で予測機能を補完するが、多入力多出力系への対応（数式が複合ルールから作動し複合ルールに値を返す）は照合順序の定まらないため不可能である。ルールのファジィ化でも空間構成の貧弱さという欠点は改善できない。

3.2 フレーム型知識ベースの問題点

当初プロダクションルールに平板に記述された対象問題の構造は、後でフレーム型知識ベースへ移行し、さらにオブジェクト指向フレームに至り対象の多重関係付けを記述できるようになった。しかしフレーム型知識ベースは基本的に定性知識を記述する枠組みであり、動的な予測のための定量推論がなく、動的世界モデルを記述できない（浅い知識）。このためルールの関数として数式（深い知識）を記述することになり、前述のようにプロダクションでは多入力多出力状態空間を構成できず単純な入出力系に分割した予測のみにとどまる。

4．状態空間の形成

4.1 知識表現パラダイムの改善策

1）知識表現パラダイムの問題点は

1. 定量推論に向かない　Production-System
2. 多入力多出力を記述できない　Production-System
3. 動的世界モデルが記述できない　Frame-Base

2）動的世界モデルを記述できる知識表現の改善策は

1. 表（空間）形式のルール記述　＜多入力多出力記述
2. 動的予測関数とルール連動　＜定量推論化

4.2 動的世界モデルを記述できる推論機構

関係行列型ファジィ推論システム[6][7]（図３）を使用した、動的推論空間構築への改善法を説明する。

1）ファジィ関係行列：

一般に時系列の情報解析は時点t0, t1, ‥ti, ti+1‥のデータx0, x1, ‥とy0, y1, ‥の値の関係を式(1)に表し影響関数kijを関係行列に記述する。列の多次元入力ベクトルYを要素kijと照合して各合致度Xを行ベクトルと

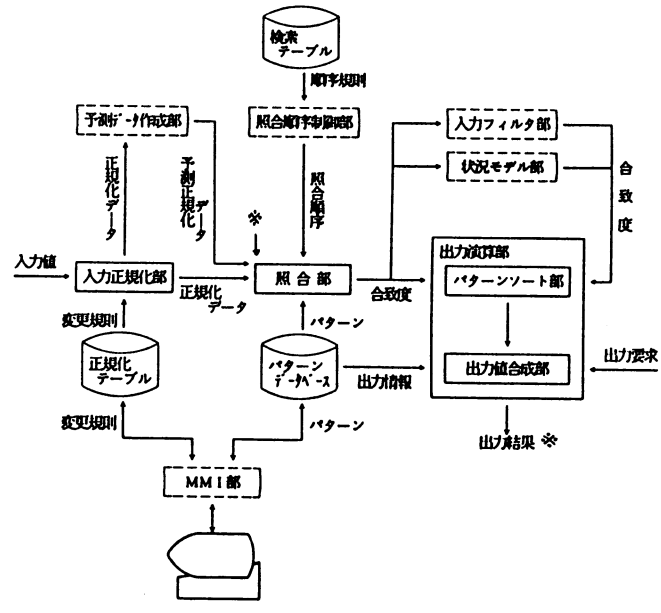


図3　ファジィ推論システム／AI-RNA

して出力（代数積－加算）。要素はファジィ関数、言語、数値、数式、状況モデルを記述できる。また入力正規化、入力重みフィルタ、推論実行制御検索テーブルなど入出力処理を記述。入出力の関係を（重みなどを省き）簡単に記すと　　$y_i = k_{ij} \cdot x_j + c_i$　　(1)

2）状況モデル：

状況モデルはばらつきの多い信号から微少な兆候を同定する定量化推論のための積分モデルで，式(1)を入力とし$Y_t = Y_{t-1} + k_c \cdot y_t$より係数$k_c$を積分周期として

$$Y = \sum_{j=0}^{i} k_c \cdot k_{ij} \cdot x_j + c_i \qquad (2)$$

Y_t, Y_{t-1}を平均値とすれば式(2)は忘却関数となる。

3）動的推論空間：

推論空間は高次ファジィ関係行列と各複合ルールを入出力に設定できる状況モデル（部分モデル）の複合。予測関数等により構成され多入力他出力に対応。また部分行列化ができモデル構築に対応できる。5.3項。

4）プロダクションシステムの撤廃：

列側の入力データに対し全要素の照合を行い照合後の状態量を再入力もできる。推論方向は列の入力で決まるだけ。ルール以上のち密な空間を構成し、競合解消の必要がなく探索枝爆発もなく時間管理が可能。動的問題では後向き推論、プロダクションシステムは不要となる。

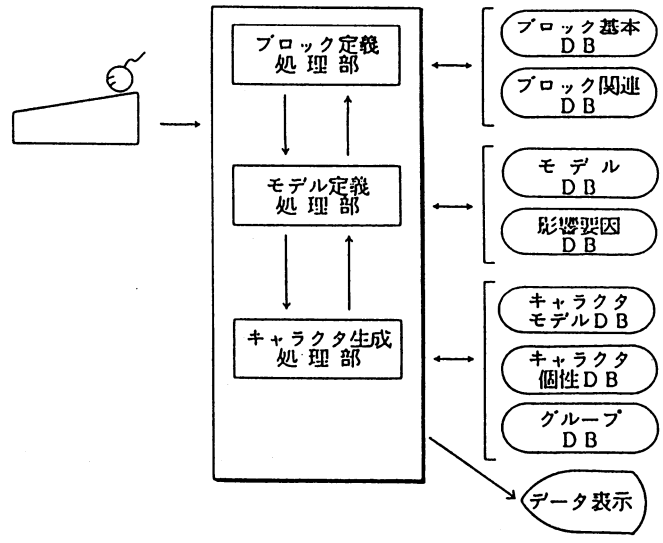


図4　ファジィ推論システム開発支援システム

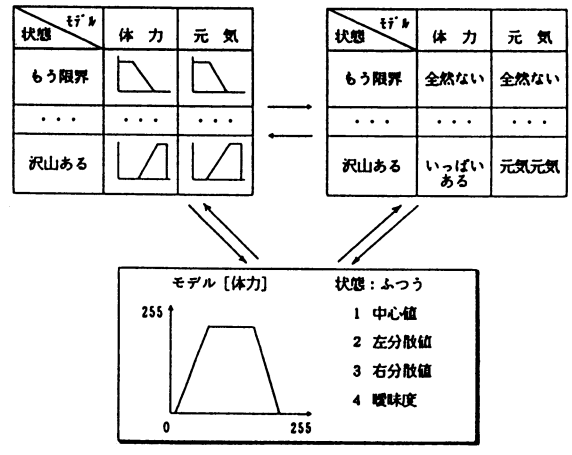


図5　知識入力MMI

5．実験システム構築と検証

5.1 実験テーマ

1）推論ツールの技術的実験目標

1. プロダクションシステムに代わるファジィ推論空間
2. 定量化予測関数とファジィ推論空間の連動
3. 複数の動的推論空間の分割と連動
4. フレームの静的な知識を補完する動的世界モデル

以上で1.2.はある程度実績あり、3.4.は初の実験項目。

2）問題解決モデル構築の実験目標

1. 動的部分モデル（気分、ストレス・・）の構築
2. 複数動的推論空間の階層化による問題解決の分割
3. 過去の重要来歴の管理と自己診断
4. 意思決定と心理ブロック（障壁）
5. 複数の個性間の相互対話、と相互影響（雰囲気）
6. 環境からの心理的影響

3）実験構築システムと、動作上の制約条件

1. 日本語による性格設定（ルール入力）
2. 知識ベース、データベースを持たない
3. 容量（MS-DOS:数十名）応答速度（0.5秒以下）

5.2 実験システムの構築支援

人間の問題解決モデルの構造を持つファジィ推論システムと動作確認のため、開発支援システムと実験システムとを製作した。支援システムの構成は問題解決モデルの構造に基ずくブロック（分割した動的推論空間）の利用の有無や関連付けを記述するブロック定義処理部、部分モデル定義処理部、性格付けのためのキャラクタ生成処理部からなる（図4）。知識入力ＭＭＩによる個性の定義は（図5に示すように推論空間を表形式で表現）設計者の言葉（日本語）で入力する。

5.3 実験システム「ファジィキャラ」動作結果

デモシステムは、桃太郎とその仲間の会話のやり取りや、戦いの結果などの"文脈"が各人の気持ちや行動に影響（非単調性）するよう、個別的な性格を問題解決モデル上に構成し、外部環境メインルーチンと共に相互の対話のやり取りや、相互の影響を実現している。図6参照。

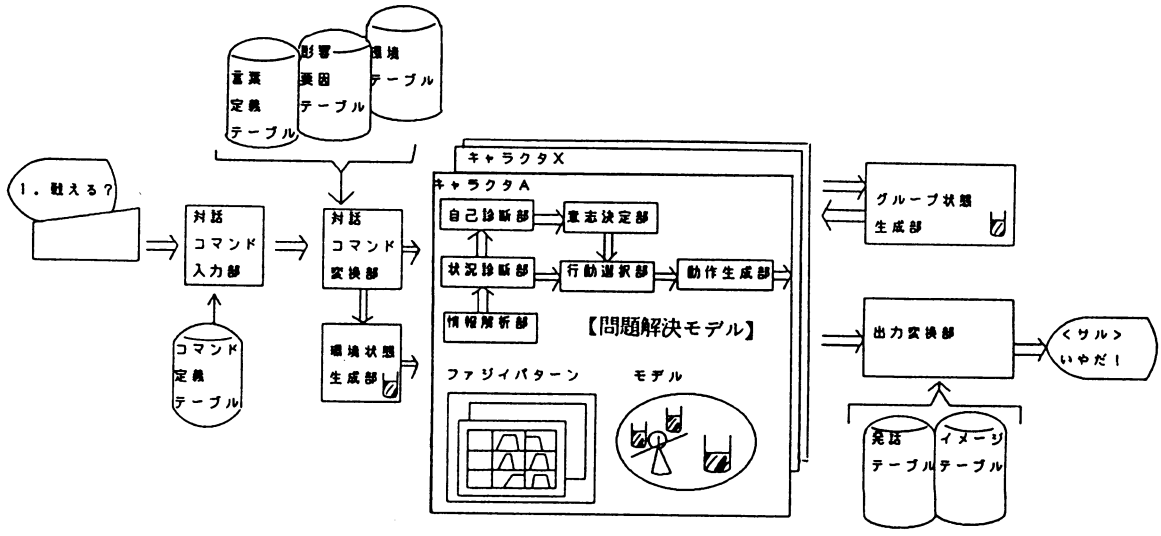


図6　実験システム構成

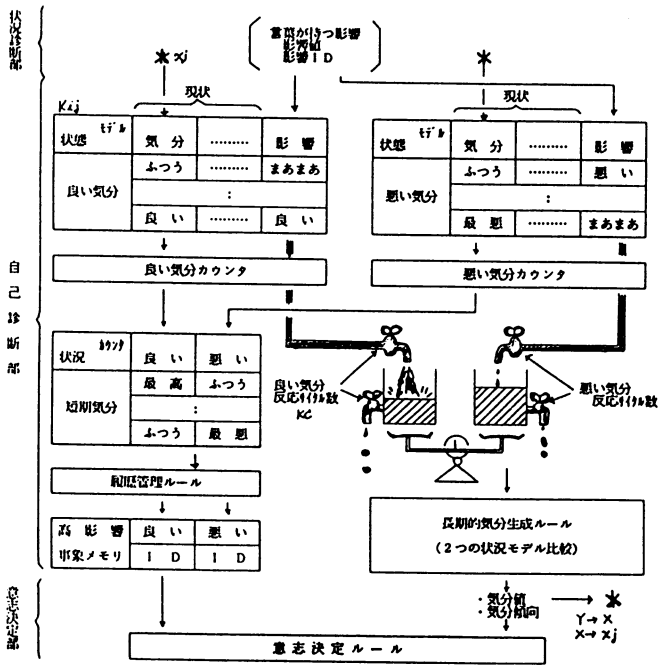


図7　部分モデル（自己診断部：気分）

本研究では心理的様相を自己相関大と捉え、図7の出力を再入力とした(図7)。この結果式(1)の時系列 yがx自身となり、式(2)は履歴(hysteresis)現象を表す。

積分要素を持つファジィ推論空間でfeedbackを行う部分モデルは様々な経済的予測関数を作ることができる。即ち

$$X = \sum_{j=0}^{\lambda} kc \cdot kij \cdot xj + ci \quad (i=0,1,2,\cdots) \quad (3)$$

外界の情報が加工されて"気分"になるのではなく、その影響の基に自己伝達ゲインKijが変化すると考えた方が良い。正しくは式x自身以外の入力（外界情報）は、状況診断部で影響度にまとめた上でKijバイアス情報とすべきであるが、極端に系統の複雑さを増すため入力の1つとした。感情表現は、生理的モデル（体力、損傷、元気など）と心理的モデル（気分、不安、グループの雰囲気など）の複合による。それぞれの状況変化からモデル同士相互に影響を与える、多重ネットワーク的な履歴モデルになっている。バケツと称する積分モデルは長期の影響を正負2方向にわけて管理する動的予測関数である。

図8は桃太郎（ﾌﾟﾚｲﾔ）の質問に対しサルは、戦える状態かどうかその時点の体力や気分などを調べ意思「絶対嫌だ！」を決定し表現する。次に一番もっともらしい理由とさらに過去に遡って自己診断して原因（重要来歴）を発話する。お喋りな性格に設定しているため、もう一つの決定理由をさらに出している（発話選択、手順）。

図9は感情の起伏（非単調的）表現の例で、文脈が心理的影響を及ぼしポテンシャルはさらに変化する。桃太郎の「元気出して」の話しかけにも、キジは自分の状態が今一つ、そこへ「なにやってんだよ」とプレッシャを掛けられたため、怒りの表現へ変化する。チグハグな対

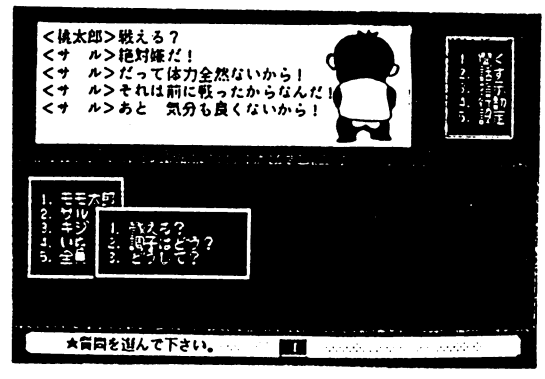


図8　動作結果例（対話と自己診断）

図9　動作結果例（感情の起伏）

話が悪影響となることもあり、心理的影響を受けやすい複雑な性格付けが可能である。その他、グループの雰囲気や環境からの影響なども確かめられた。

5.4 処理の容量と速度

本推論は部分行列に空間を分割し、照合をすべて素演算処理過程に展開して知識の圧縮と高速処理を図る。標準処理速度の比較では同一ＥＷＳ上で

1. Lisp版ＡＩツール　　0.1--10 rule/S
2. Ｃ版ＡＩツール　　100--300 rule/S
3. Ｃ高速ＡＩツール　　800 rule/S
4. ＡＩ－ＲＮＡ　　14,000 rule/S（平均３FIN）

容量もPC基本メモリで数千ルールが走りリアルタイム診断（処理サイクル<0.5秒）ができる。複雑なキャラクタ（ルール数120＊20名）の動作環境が全 240KBに入った。上記のデモの4キャラクタのルールは約500でPC上の作動の応答は推論以外の処理を含めて 0.1秒程度であった。

6．結論

本研究の目的の【第１】ヒューマンインタフェース構築のための問題解決法の有効性把握については、階層モデルによる感情の抑圧など、複雑な人工感情を実現した。また来歴管理による自己診断結果など高度の人間的な情報処理の達成を確認した。ファジィにおけるモデル論の有効性と、応用の拡大が確信できた。【第２】プロダクションに代わる動的推論空間と定量化部分モデルなどの有用性を示し、今後種々の予測問題への可能性を得た。【第３】フレームの静的知識を補完する動的世界モデルの実験を達成し、非単調推論の確認も含めて目標レベルに置けるヒューマンインタフェースのダイナミクス記述の方法と応用の可能性を得た。

今後のインテリジェントシステムあるいはヒューマンインタフェースの構築は、対象問題の理解と、定量的モデリングの可能性にかかっていると考えられる。

以上、実験は目標通りの成果を得て、知的ヒューマンインタフェースや動的世界モデルを必要とするシステムの構築に向けて一歩前進したと考える。

すぐに応用が考えられるシステムには、公報システムの状況と情報受信者の行動予測をモデル化した緊急ガイダンス出力や、プラントの意思決定支援などが考えられる。もちろんアミューズメントやＣＡＩへの応用も可能である。また複数の自律的システムが分散して問題を解決する自律分散系構築への糸口も掴めたように思われる。

本研究のさらなる進展を図るテーマは

1. 動的世界モデルとフレーム型知識ベースとの連動
2. レベル4.目的主導型意思決定機構"の研究

が考えられる。年々複雑になりすぎるシステム（機械）と人間との協調に、少しでも役に立てれば幸いである。

最後に、本研究を含む一連のファジィ関連の研究機会を与えて頂いたアドイン研究所・佐々木浩二代表取締役に深謝致します。

参考文献

1) Rasmussen, J. : Outline of the Hybrid Model of the Process Plant Operators ; Behavior and Supervisory Control, Plenus U.S.A, (1981)
2) J. ﾗｽﾑｯｾﾝ, 海保, 加藤, 赤井, 田辺・訳：インタフェースの認知工学；,, 啓学出版, (1990)
3) 上石：ファジイ推論を用いた自律的制御システム，第２回人工知能学会全国大会論文集，, pp269-272, 1988
4) 上石，中村，小山田，堀川，橋詰：目的主導型推論による車体制御；第５回ファジイシステムシンポジウム講演論文集，, pp. 101-106(1989)
5) 上石，佐々木：インテリジェント制御への新たな展開；システム／制御／情報学会誌，34巻，6号，pp324-331(1990)
6) 中村，小山田，堀川，上石：ファジィ演算による特徴ベクトル演算；第５回ファジイシステムシンポジウム講演論文集，, pp. 449-454(1989)
7) 中村，上石，堀川，小山田，山口：知識コンパイル・パターン型推論システム，第３回人工知能学会全国大会論文集，pp. 295-298(1988)

連絡先 ： 〒１５０　東京都 渋谷区 神南 １－１５－８
兼仲ビル ４Ｆ
株式会社　アドイン 研究所　　システム開発部
上石 陽一，　八重樫 清美
TEL: 03(770)7311(代)　FAX: 03(770)7319

SA5-1

ファジィアルゴリズムによる加速度制御系を用いたモーション制御

MOTION CONTROL BASED ON FUZZY ACCLERATION CONTROLLER

土川　浩史,　　松田　聡,　　大石　潔
H. Tsuchikawa,　　S. Matsuda,　　K. Ohishi

大　阪　工　業　大　学
Osaka Institute of Technology

Abstract : This paper describes the new robust force and compliance control based on the fuzzy acceleration controller. Using the proposed acceleration controller, as the servo motor has only two integral elements and has no mechanical system parameter, the servo motor is driven by the acceleration control command. The characteristics of this controller is very effective for the robust force and compliance control on the basis of the virtual inertia. The proposed force control systemis realized by the software algorithm of DSP (digital signal processor), and it well regulates the force to the target environment.

1．はじめに

ロボットマニピュレータの各関節を駆動するアクチュエータには，アームの姿勢や位置等その動作に伴って重力・慣性力・摩擦力等の様々な外力が印加される．この外力を瞬時に且つ確実に補償してロバストなモーション制御を行うために，筆者等はモデル追従加速度制御系に基づく加速度制御手法を提案してきた．[1),2)] このモデル追従加速度制御系は，アクチュエータのパラメータ変動や外力の影響を瞬時に相殺して，加速度指令によってロバストなモーションコントロールを実現することができる．しかしながら，このモデル追従加速度制御系を構成するには制御対象によって規範モデルの構造を決定し，規範モデルの逆システムに相当する並列補償要素を一意に決定しなければならない．しかるに，この作業は非常に難しく且つあいまいな点が多い．

そこで我々は，ファジィアルゴリズムを用いてロバストな加速度コントローラを構成することを提案する．これは，規範モデルに２個の積分器のカスケード結合を用い，その出力と実際のアクチュエータの出力との偏差を補償する要素に，ファジィアルゴリズムを採用している．これによって加速度コントローラを実現する際に思案する箇所は，補償要素のファジィアルゴリズムだけに集約させることができる．本論文はこのファジィアルゴリズムを用いた加速度コントローラをＤＳＰ上のソフトウェアで構成し，ＤＣサーボモータによる力制御系と，仮想機械インピーダンスに基づくコンプライアンス制御系を実現する．

2．ファジィアルゴリズムによる加速度コントローラ

本論文で提案するファジィアルゴリズムを用いた加速度コントローラのブロック図を図１に示す．本加速度コントローラは規範モデルに２個の積分器のカスケード結合を用いている．この規範モデルに２個の積分器のカスケード結合を用いることによって，制御対象が他のモータとなった場合でも，補償要素であるファジィアルゴリズムのパラメータを調整するだけで加速度コントローラのゲインを調整することができる．従来までのモデル追従加速度制御系は制御対象の公称伝達関数に合わせて規範モデルの構造を決定し，その規範モデルの構造に合わせて補償要素の逆システムを決定しなければならなかった．さらに，もし制御対象の構造やパラメータが変わると，モデル追従加速度制御系は最初の作業である規範モデルの構築から検討し直す必要がある．これに対して本論文で提案するファジィアルゴリズムを用いた加速度コントローラは，ファジィアルゴリズムのみにコントローラのパラメータを調整する部分が集約されている．加速度コントローラのパラメータ調整をファジィアルゴリズムの部分だけに集約させることによって加速度コントローラのパラメータ調整がより簡単に行えるようになった．

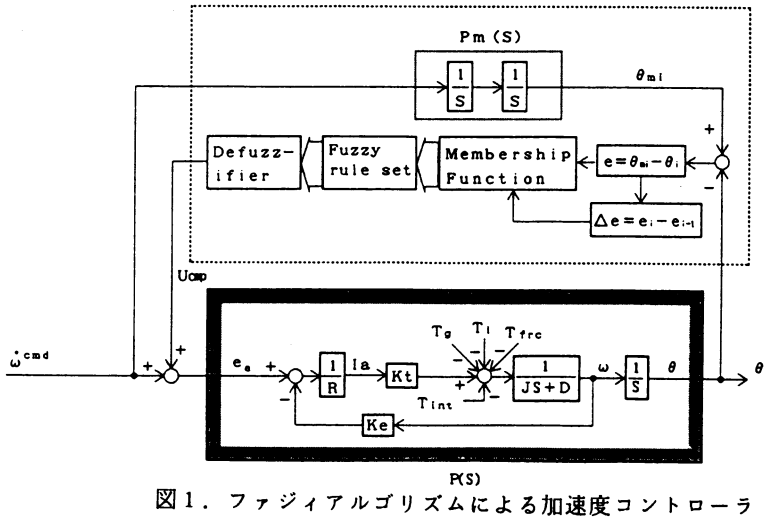


図１．ファジィアルゴリズムによる加速度コントローラ

本加速度コントローラで用いたファジィアルゴリズムのファジィルールを図２に示す．このファジィルールは，規範モデルである加速度コントローラからの出力θmとアクチュエータの実際の位置θとの偏差ｅ，およびその偏差ｅのサンプリング間の変化△ｅを前件部としている．このファジィルールは，「現在の偏差ｅが大きくその時の変化△ｅが増加している時は，△ｅを減少させる方向にゲインを与える．」等の簡単な２５個のルールで構成されている．このファジィルールの前件部は，図３に示されるようなメンバシップ関数により適合度を出力している．このメンバシップ関数は，ｅmaxと△ｅmaxの値を各々変化させることによってファジィルールの前件部のパラメータが調整される．ファジィルールの後件部は，Ｄ／Ａコンバータから出力される値である．ファジィルールからの各要素の出力Ωは，（１）式のように前件部メンバシップ関数の適合度の積によって算出する．また，各出力の非ファジィ化には（２）式の重み付き平均を用いてUcmpを算出する．このUcmpをアクチュエータに与えて，加速度コントローラを実現する．本加速度コントローラのファジィアルゴリズムは，アクチュエータの位置を規範モデルからの出力に一致させるファジィの論理を組むことによって，ファジィルールを決定している．これより，本加速度コントローラは，制御対象がどのような伝達関数を構成していても，加速度コントローラを構成することができる．また，一般的なファジィ制御系のように，使用頻度の少ないファジィルールを省いていく作業は本アルゴリズムでは行わない．

また，ファジィルールの後件部であるＰＢ，ＮＢの各値はアクチュエータの最大出力で決ってくる．これよりＰＭ，ＰＳ，ＮＭ，ＮＳの各値も必然的にその選択の範囲は制限される．従って，前件部メンバシップ関数のｅmax，△ｅmaxの調整だけでファジィアルゴリズム全体のパラメータ調整を行うことに等しくなる．そこで，本加速度コントローラのパラメータ調整は，補償要素であるファジィアルゴリズムの前件部メンバシップ関数の調整のみで行うことにする．これにより，加速度コントローラを構成するために思案する場所は２ヶ所となり，制御対象を他の対象に変化させた場合でも簡単にコントローラのパラメータ調整を行うことができる．このことは，本加速度コントローラが将来的にＡＩ等を応用してオートチューニングでのパラメータ調整を行えることを示唆するものである．現在ファジィ制御系の多くは，調整するパラメータの数が多く，パラメータを自動的に調整させるためには，パラメータ調整のためのアルゴリズムを構成するのがなかなか困難である．しかし本加速度制御系は，調整する部分が限られているので，比較的簡単にパラメータ調整の自動化を行えるのではないかと考える．

		△e				
		ＰＢ	ＰＳ	ＺＯ	ＮＳ	ＮＢ
	ＰＢ	ＰＢ	ＰＢ	ＰＭ	ＰＳ	ＺＯ
	ＰＳ	ＰＢ	ＰＭ	ＰＳ	ＺＯ	ＮＳ
e	ＺＯ	ＰＭ	ＰＳ	ＺＯ	ＮＳ	ＮＭ
	ＮＳ	ＰＳ	ＺＯ	ＮＳ	ＮＭ	ＮＢ
	ＮＢ	ＺＯ	ＮＳ	ＮＭ	ＮＢ	ＮＢ

図２．ファジィルール

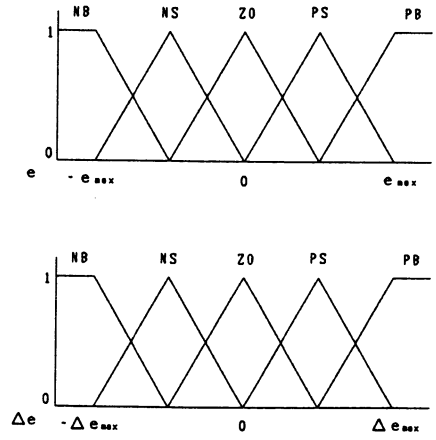


図３．メンバシップ関数

$$\Omega 11i = PB(e) \times PB(\Delta e)$$
$$\Omega 12i = PM(e) \times PB(\Delta e)$$
$$\vdots$$
$$\Omega 55i = NB(e) \times NB(\Delta e) \cdots\cdots eq.(1)$$

$$U_{cmp} = \frac{\Omega 11i \times PB + \cdots + \Omega 55i \times NB}{\Omega 11i + \cdots + \Omega 55i} \quad \cdots\cdots eq.(2)$$

３．ファジィ加速度コントローラによる力制御

先ず，本加速度コントローラが加速度コントローラを構成しているかどうかの確認のため，シミュレーションを行った．シミュレーションは，図１の本加速度コントローラのブロック図において，ステップ状の加速度指令ω^{ref}を与えた時のモータの回転速度ωの応答結果である．シミュレーション結果を図４に示す．図４より，ステップ状の加速度指令ω^{ref}に対してモータの回転速度ωが一定速度で加速しているので，本加速度コントローラによってサーボモータが加速度コントローラを構成していることが確認できる．この加速度コントローラを構成する際のファジィアルゴリズムのパラメータの調整は，経験的にｅmax，△ｅmax共に始めは大きい値を選択し，徐々に小さい値を選択していく調整法が良好である．また，どちらの値も余り小さすぎる値を選択すると制御系が振動することが経験的にわかった．そこで，ｅmax，△ｅmaxの各値は，振動しない程度の小さい値を選択すると良好な加速度コントローラが構成できる．

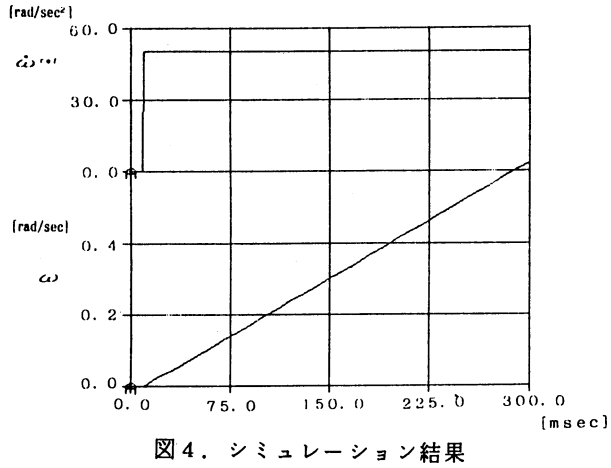
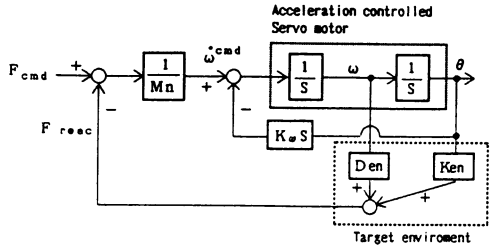


図４．シミュレーション結果

次に本加速度コントローラを用いて力制御系を構成した．力制御系は，力指令Ｆcmdにアクチュエータのトルクから発生される力Ｆreacを追従させる制御系である．力制御系はファジィアルゴリズムによってサーボモータが加速度コントローラを構成しており，摩擦力，干渉力等の外力を瞬時に打ち消しているので，図５のようなブロック図で構成される．また，力指令Ｆcmdから力の応答Ｆreacの間の伝達関数は（３）式のようになる．ここで，Ｋωは力制御系と目的環境の間に生じる振動を抑制する為のフィードバック項で，Ｍｎは任意に設定することのできる仮想質量の項である．

この力制御系を構成するためのコントローラのゲイン調整は，加速度コントローラのパラメータ調整を行う場合にｅmax，△ｅmaxの値の選択によっては系が振動するのであるが，系が振動した場合にその振動が加速度コントローラからの振動か，それとも力制御系と目的環境とのとの間で起こる振動か判断しなければならない．この判断を誤った場合には，調整不可能になる可能性がある．そこで，ファジィ加速度コントローラのパラメータ調整を行う前に，加速度コントローラを外して（３）式のＫωの値を振動しない値を選択して加速度コントローラのパラメータを後から調整していく．



$$\frac{F_{reac}}{F_{cmd}} = \frac{D_{en}S + K_{en}}{M_nS^2 + (M_nK_\omega + D_{en})S + K_{en}} \cdots\cdots \text{eq. (3)}$$

図５．力制御系ブロック図

４．ファジィ加速度コントローラによるコンプライアンス制御

ファジィ加速度コントローラを用いてコンプライアンス制御系を構成した．コンプライアンス制御系は，マニピュレータに力Ｆが印加された時の仮想機械インピーダンスに基づく力に対する応答を制御する系である．仮想機械インピーダンスは，バネ定数Ｋｖ，粘性定数Ｄｖ，仮想質量Ｍｖで構成される．この仮想機械インピーダンスを任意に設定することによって，力Ｆに対する応答を変えることができる．図６にコンプライアンス制御系のブロック図を示す．この図の左側部分は，任意の機械インピーダンスによって求められた力Ｆに対応するマニピュレータの位置，速度，加速度を算出するブロック図である．さらに右側部分は，ファジィ加速度コントローラによって，加速度コントローラを構成しているアクチュエータを用いて位置制御系を構成するブロック図である．この位置制御系により，マニピュレータは機械インピーダンスに基づいて算出された指令値どうりに動く．

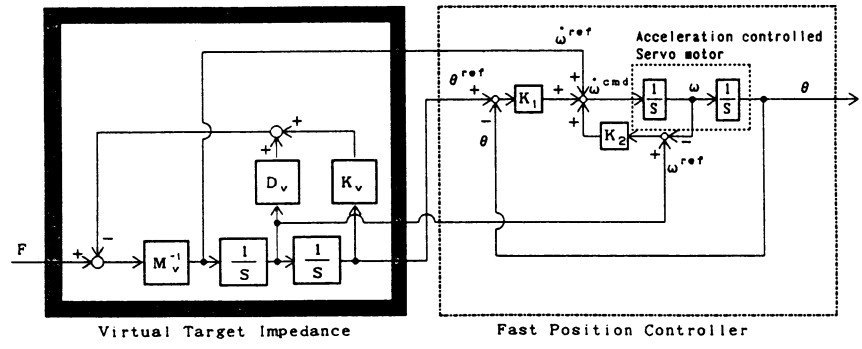


図６．コンプライアンス制御系ブロック図

５．実験結果

仮想質量Ｍｎに基づく力制御系と，仮想機械インピーダンスに基づくコンプライアンス制御系の実験システムを図７に示す．このシステムにおいてファジィ加速度コントローラは，ＤＳＰμPD77230によるソフトウェアによって構成されている．力制御系，コンプライアンス制御系全体のソフトウェアのサンプリングタイムは，４００［μsec］である．

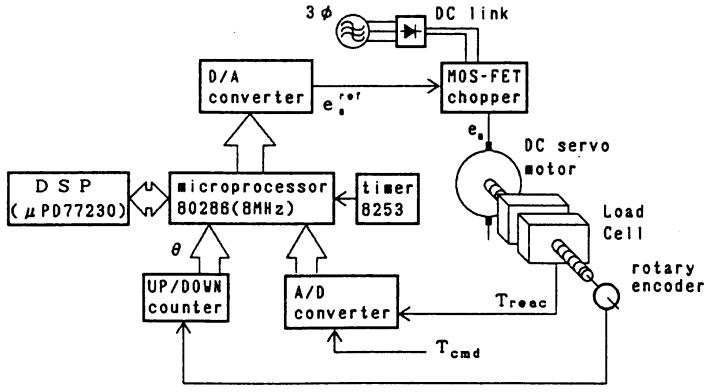
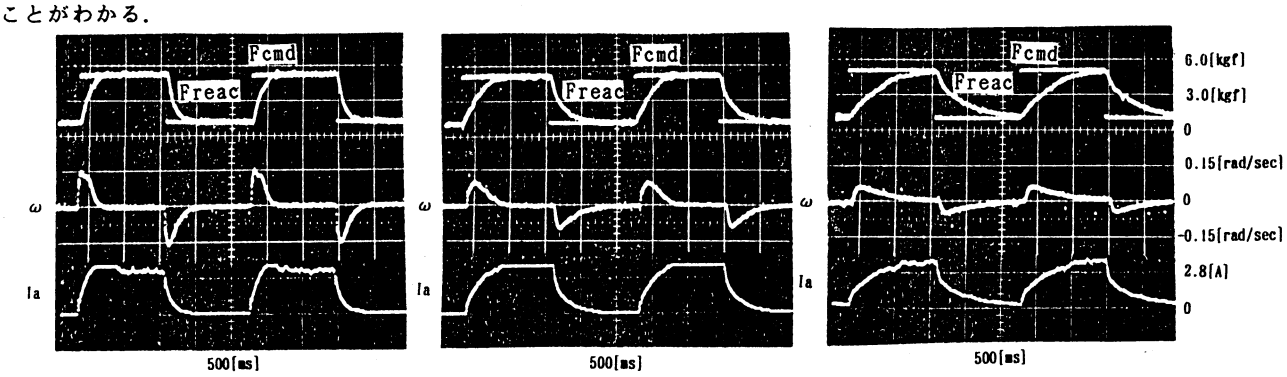


図７．実験システム

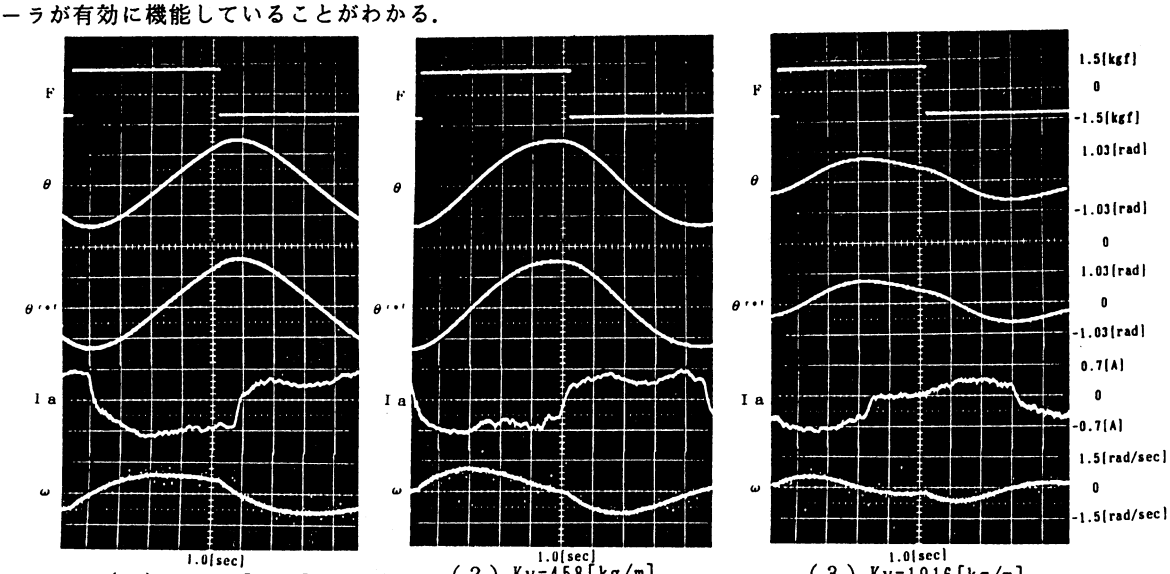
力制御系の実験結果を図８に示す．本論文における実験は仮想質量Ｍｎ を２倍・４倍に設定したときに，ステップ状の力指令Ｆｃｍｄ に対する反力Ｆｒｅａｃの応答を計測している．実験結果より，本ファジィ加速度アルゴリズムが有効に機能していることがわかる．



（１）仮想質量：０．０８３［ｋｇ］（２）仮想質量２倍：０．１６［ｋｇ］（３）仮想質量４倍：０．３３［ｋｇ］

図８．力制御　実験結果

図９にファジィ加速度コントローラによるコンプライアンス制御系の実験結果を示す．実験は，バネ定数Ｋｖを２倍，４倍に設定した時にステップ状の力Ｆ（ｓ）を与えたときの位置指令θ_{ref}に対するマニピュレータの位置θを計測している．実験結果より位置指令θ_{ref}にマニピュレータの位置θが位相遅れなく追従しており，このことからも本ファジィ加速度コントローラが有効に機能していることがわかる．



（１）Kv=229[kg/m]
Dv=458[kg･s/m]
Mv=91.6[kg]

（２）Kv=458[kg/m]
Dv=458[kg･s/m]
Mv=91.6[kg]

（３）Kv=1916[kg/m]
Dv=458[kg･s/m]
Mv=91.6[kg]

図９．コンプライアンス制御　実験結果

６．まとめ

提案するファジィアルゴリズムを用いた加速度コントローラは，位置情報のみで外力やパラメータ変動の影響を瞬時に抑圧し，アクチュエータを加速度指令によって駆動することができる．本論文では，このコントローラを用いて仮想質量に基づいた力制御系と，仮想機械インピーダンスに基づいたコンプライアンス制御系を実現することができた．

また，ファジィ加速度コントローラは，ゲインの調整をファジィアルゴリズムに集約させ，且つファジィアルゴリズムのパラメータ調整も２ヶ所に限定することができた．これにより制御対象が変わった場合でも簡単にパラメータ調整することができる．また，このことは将来的にＡＩ等の応用で本加速度コントローラのゲインの自動調整ができることを示唆するものである．今後は本加速度コントローラを用いてゲインの自動調整のアルゴリズムについて研究していく予定である．

参考文献

１）駒田，村上，大西：「加速度に基づく多自由度ロボットの力フィードバック制御」，　電学論Ｄ，９巻，５号，p.325,(平元-5).

２）堀，内田：「加速度制御に基づく新しいモーションコントロール法の提案」，　電学論Ｄ，109巻，７巻，p.470,(平元-7).

３）松田，大石：「位置情報だけを用いたＤＳＰによる加速度制御系」，電学論Ｄ，110巻，　2号，p.101,(平2-2).

４）K.Ohishi,S.Matsuda,K.Ohnishi :"DSP-Based DC Servo Acceleration Control Without Speed Sensor" in Proc.IEEE IAS Annual Meeting, Vol.1,p.480, (1989-10).

SA5-2

確率的バンバン制御について

On Stochastic Bang Bang Control

小 田 中 敏 男
Toshio ODANAKA
東京都立科学技術大学
THE TOKYO METROPOLITAN INSTITUTE
OF TECHNOLOGY

Abstract

The name bang bang control is often given to the type of process which operates at a constant level either in one made or another. This paper investigates that the similar equivalence in a stochastic setting, establish new definition of the stochastic bang bang control in stochastic control processes that the state variables over all stage prevent to run out from the fixed level in a fuzzy environment. We shall lead the application of the theory of fuzzy sets.

1. 緒　　言

フィードバック制御の使用によって，要求された平衡状態にシステムを制御させることを考えよう．バンバン制御という名は一方式又はそれ以上の方式の固定水準で作動するという制御機構の簡単な種類のみ使用する過程の型に与えられる．[1]

解析的に問題は次の型で設定せられる．平衡状態 $x=0$ で，方程式

$$\frac{dx}{dt}=g(x, y)\,, \qquad x(0)=c \tag{1.1}$$

を与えて，

$$|y(t)|\leqq m \tag{1.2}$$

又は

$$y(t)=m \tag{1.3}$$

という制約に関して制御 $y(t)$ を決定しようとする．これはバンバン制御となる．[1]

確率関数 $z(t)$ に関して，方程式

$$\frac{dx}{dt}=h(x, y, z)\,, \qquad x(0)=c \tag{1.4}$$

を仮定しよう．ファジイ環境に於て，制約

$$|y(t)|\leqq m \tag{1.5}$$

に関して，状態 $x(t)$ がある領域から飛び出すことを防ぐ制御 $y(t)$ を決定しようと思う．一般にある S と s_1, s_2 に対して，制御はつぎのようなバンバン制御

$$\begin{aligned} y(t)&=S-s_1\,,\\ &=s_2-S\,,\\ &=0 \end{aligned} \tag{1.6}$$

である．この型の制御は確率的在庫過程において "s, S-政策" と呼ばれている．[2], [3].

本論文に於いて，ある確率的制御過程におけるファジイ集合理論の法則を考察しよう．ここではまずベルマンとザデェのある定義を述べよう．[4], [5]

1) $Z=\{z\}$ は対象のある集合を記するとしよう．そのとき z のファジイ集合 A は順序対の集合

$$A=\{(Z, \mu_A(z))\} \qquad z\in Z \tag{1.7}$$

である．ここに $\mu_A(z)$ は A における z のメンバーシップの程度を示す．$z\to[0, 1]$ は A のメンバーシップ関数と呼んでいる．

2) z におけるファジイ集合 A と B の交わりはメンバーシップ関数

$$\mu_{A\cap B}(z)=\min\left(\mu_A(z), \mu_B(z)\right)\,, \qquad z\in Z \tag{1.8}$$

をもった z のファジイ集合であると定義せられる．

3) z におけるファジイ集合 A と B との代数積は

$$\mu_{A\cdot B}(z)=\mu_A(z)\cdot\mu_B(z)\,,\qquad z\in Z \tag{1.9}$$

によって定義されるファジイ集合である．

4) $Z=\{z\}$ は与えられた集合であるとする．そのときのファジイ目標又は簡単に目標とはメンバーシップ関数 $\mu_G(z)$, $z\in Z$ によって特徴付けられた z のファジイ集合であると定義せられる．

5) z のファジイ制約 C とはメンバーシップ関数 $\mu_C(z)$, $z\in Z$ によって特徴付けられた z のファジイ集合であると定義せられる．

6) z のファジイ目標 G とファジイ制約 C とが与えられると仮定する．そのとき G と C とは，G と C の競合 (confluence) から得られるファジイ集合であるファジイ決定 D を形成するよう結合する．すなわち

$$D=G*C \tag{1.10}$$

ここに $*$ は "競合" を意味する．競合は交わり又は代数積として解釈せられる．

7) z の最大決定とは z に関して $\mu_D(z)$ を最大にする手段である．

8) P は R^n に関する確率測度であるとする．R^n のファジイ事象は R^n のファジイ部分集合であると定義せられる．そのメンバーシップ関数 μ_A は可測である．そのとき A の確率はルベックースチェルチェス積分によって定義せられる．すなわち

$$P(A)=\int_{R^n}\mu_A(z)dP \tag{1.11}$$

すなわち，$P(A)=E(\mu_A)$, ここに E は期待値を意味する．

[5] に，代数積は最適制御の定式化により適当であることが示されている．

2. 数学的モデル

ファジイ環境における確率制御過程を含む問題を考えよう．確率システムにおける時刻 $(t+1)$ における状態は

$$x_{t+1}=ax_t+y_t+z_t\,,\qquad (t=0,1,2,\cdots) \tag{2.1}$$

によって記述されると仮定しよう．ここに y_t は入力で，確率変数 z_t は時間に関して独立で，確率密度関数 $\varphi(z)$ をもつと仮定せられる．各時刻 t で，入力 y_t はメンバーシップ関数 $\mu_C(y_t)$ によって特徴付けられたファジイ集合であるファジイ制約 C^t に従うとする．

いまファジイ目標に於て有限区間又は無限区間上のあるメンバーシップ関数を最小にする問題を議論するとしよう．

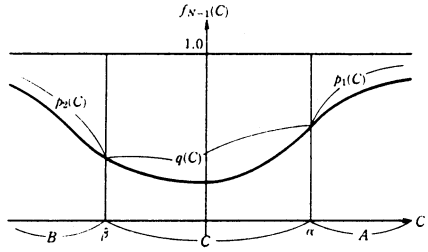


Fig. 1

いま $f_{k,N-1}(c)$ は x_t が段階 k に於て初期状態 c で出発し，ファジイ目標に於て，ファジイ制約に関して，最適政策を用い，段階 $(N-1)$ で終るとき，区間 (β,α) から飛び出すメンバーシップ関数として定義する．

すなわち

$$f_{k,N-1}(c)=\min_{u_k,\cdots,u_{N-1}}[\mu_c(y_k)\cdots\mu_c(y_{N-1})\cdot\mathrm{Prob}\{(\max_{k\le n\le N-1}x_n\ge\alpha)\ \text{or}\ (\min_{k\le n\le N-1}x_n\le\beta)\}]\,. \tag{2.2}$$

ここに $x_k=c$ $(k=0,1,\cdots,N-1)$．いまファジイ集合は

$$\begin{aligned}A&=\{(c,p_1(c))\}\\ B&=\{(c,p_2(c))\}\\ C&=\{(c,q(c))\}\end{aligned} \tag{2.3}$$

であると仮定しよう．ここに $p_1(c)$, $p_2(c)$, $q(c)$ は A, B, C における C の所属の程度を表わすとする．そのとき

$$f_{k,N-1}(c)=\begin{cases} p_1(c), & (c\geq\alpha) \\ \min\limits_{w}\left[\mu(w-c)\left\{L(w)+\int_{\beta-w}^{\alpha-w} f_{k-1,N-1}(w+z)\varphi(z)dz\right\}\right], & (\beta<c<\alpha) \\ p_2(c), & (c\leq\beta) \end{cases} \tag{2.4}$$

初期関数は

$$f_{N-1,N-1}(c)=\begin{cases} p_1(c), & (c\geq\alpha) \\ q(c), & (\beta<c<\alpha) \\ p_2(c), & (c\leq\beta) \end{cases} \tag{2.5}$$

ここに

$$L(w)=\int_{\alpha-w}^{\infty} p_1(w+z)\varphi(z)dz+\int_{-\infty}^{\beta-w} p_2(w+z)\varphi(z)dz \tag{2.6}$$

で，$w=ac+y$.

3. 最適政策

政策 y はメンバーシップ関数

$$\mu_c(y_t)=\rho\exp[d(y_t)] \tag{3.1}$$

を持つと仮定せられる．ここに

$$d(y)=\begin{cases} K+d(\alpha-\beta)^2, & |y|\geq(\alpha-\beta) \\ K+dy^2, & (\alpha-\beta)>|y|>0 \\ 0 & y=0 \end{cases}$$

で

$$\rho=\exp\{-(K+d(\alpha-\beta))^2\}$$

そのとき方程式は

$$f_k(c)=\begin{cases} p_1(c), & (c\geq\alpha) \\ \min\limits_{w}[\mu(w-c), T(w,c,f_{k+1})], & (\beta<c<\alpha) \\ p_2(c), & (c\leq\beta) \end{cases} \tag{3.2}$$

ここに

$$T(w,c,f_{k+1})=\int_{\alpha-w}^{\infty} p_1(w+z)\varphi(z)dz+\int_{-\infty}^{\beta-w} p_2(w+z)\varphi(z)dz+\int_{\beta-w}^{\alpha-w} f_{k+1}(w+z)\varphi(z)dz \tag{3.3}$$

初期関数 $f_{N-1}(c)$ は式 (2.5) のそれと同一である．

最適政策の性質は次の定理に示される．定理の主な部分は確率的バンバン制御の最適性を証明している．

定理 もし

a) すべての z に対して，$\varphi(z)\geq 0$, $\int_{-\infty}^{\infty}\varphi(z)dz=1$. そしてすべての w に対して，$\int_{\beta-w}^{\alpha-w}\varphi(z)dz\leq\alpha<1$.

(3.4) b) すべてのに対して $0\leq p_1(z)\leq 1$, $0\leq p_2(z)\leq 1$, $0\leq q(z)\leq 1$, $q(z)=(q_1(z), q_2(z))$

c) $p_1(z)$ と $q_1(z)$ は単調増加連続関数で，$p_2(z)$ と $q_2(z)$ は単調減少連続関数である．

d) $\log\left(L(w)+\int_{\beta-w}^{\alpha-w} f_{k+1}(w+z)\varphi(z)dz\right)$ は K-凸関数．

そのとき最適政策は次の通りである．

$$w_k^*(c)=\begin{cases} S_k & (c<s_k', c>s_k'', s_k'<s_k'') \\ c & (s_k'<c<s_k'') \end{cases} \tag{3.5}$$

ここに S_k は $G_k(w)$ を最小にする w の値で，s_k', s_k'' は

$$G_k(w)=KG_k(S_k), \quad K>1 \tag{3.6}$$

を満足する w の値である．又

$$G_k(w)=e^{d(w-c)^2}\left(L(w)+\int_{\beta-w}^{\alpha-w} f_{k+1}(w+z)\varphi(z)dz\right) \tag{3.7}$$

K-凸関数の性質は証明なしで次の補助定理に示される．その本質的部分は G_k が (3.7) を満足するときバンバン制御 (3.5) の最適性を証明することである．

補助定理 もし $\log g(y)$ が連続的 K-凸関数であり，$y\to\infty$ のとき $g(y)\to\infty$ であれば，$g(y)$ は連続的 K-凸関数で，p_1 は全区間とすると

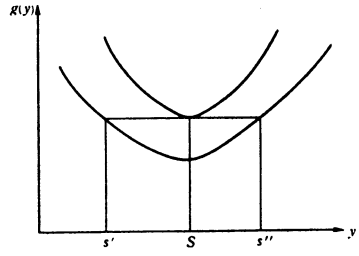


Fig. 2

(3.8) i) $g(S)\leq g(y)$, $\forall y\in R$.
ii) $Kg(S)=g(s')=g(s'')<g(y)$, $s'>\forall y$, $s''<\forall y$, $K>1$.
iii) $g(y)$ は $(-\infty, s')$ で減少関数で，(s'', ∞) で増加関数である．
iv) $s'\leq y\leq z$ で，$y\leq z\leq s''$ であるすべての y, z に対して $g(y)\leq Kg(z)$

であるような $s'\leq S\leq s''$ である s', s'', S が存在する．

定理の証明 (3.9) の関数 G_{N-2} を考えよう．

$$G_{N-2}(w)=e^{d(w-c)^2}\left\{L(w)+\int_{\beta-w}^{\alpha-w} f_{N-1}(w+z)\varphi(z)dz\right\} \tag{3.9}$$

であるから

$$\log G_{N-2}(w)=d(w-c)^2+\log\left(L(w)+\int_{\beta-w}^{\alpha-w} f_{N-1}(w+z)\varphi(z)dz\right) \tag{3.10}$$

$\log G_{N-2}(w)$ は K-凸関数であるから，$G_{N-2}(w)$ は K-凸関数である．$K=0$ の場合の解析と条件 a), b), c) を用いて

$$f_{k-2}(c)=\begin{cases}\rho e^{K}G_{N-2}(S_{N-2}), & c<s'_{N-2},\ c>s''_{N-2}\\ G_{N-2}(c), & s'_{N-2}<c<s''_{N-1}\end{cases} \tag{3.11}$$

ここに S_{N-2} は $G_{N-2}(w)$ を最小にするものであり，s'_{N-2} と s''_{N-2} は $G_{N-2}(w)=KG_{N-2}(S_{N-2})$ を満足する w である．$K>1$ であるから，$s'_{N-2}<S_{N-2}<s''_{N-2}$．$G_{N-2}$ は K-凸であるという事実に基づいて f_{N-2} は K-凸であることを示そう．

$|w|\to\infty$ のとき $G_{N-2}(w)\to\infty$ という事実と $G_{N-2}(w)$ の K-凸性と連続性は f_{N-2} の K-凸性を意味するということを証明した．加えて f_{N-2} は連続であることが容易にわかる．さて G_{N-3} は K-凸関数であることが補助定理を用いて (3.7) 式から導出される．さらに，w_{N-3} の有界性を用いて，G_{N-2} は連続で，$|w|\to\infty$ のとき $G_{N-3}(w)\to\infty$ である．上の証明を繰返して，f_{N-3} は K-凸で，さらにすべての k に対して $G_k(w)$ の K-凸性と連続性と $|w|\to\infty$ のとき $G_k(w)\to\infty$ ということが得られる．同時に (3.5) 式の多期間政策の最適性を証明した．

4. 数値計算例

5. 結　　語

ここに議論しようとする制御問題は実際問題として次のようにして生じた．過程は長期間に亘って，繰返し特別なサービスを実行するように設計されている．過程は自動的に作動するが，しかし，実際には事象の質は時間から時間にわたって検査し，必要なときに補修しなければ悪化するであろう．この観点から，状態変数の観測が行われ，各観測の後に過程を停止しないか，停止して分解掃除するかが考慮される．政策決定者は過程の運転と関連した長期間のメンバーシップ関数を最小にする問題を有したことになる．そのとき問題は将来にわたっての期待メンバーシップ関数を最小にするような各段階の決定政策を見出すことである．この解析は最適停止問題におけると同様な形式を持つであろう．[9]

最後にこの数値計算は相良信子氏によって，東大大型計算機を使用して実行された．

参 考 文 献

[1] R. Bellman: Adaptive Control Processes—A Guided Tour—, Princeton University Press (1961).
[2] A. Bensonssan and others: Management Applications of Modern Control Theory, North-Holland/American Elsevies (1974).
[3] D. P. Bertsekas: Dynamic Programming and Stochastic Control, Academic Press (1976).
[4] R. E. Bellman and L. A. Zadeh: Decision-making is a fuzzy environment, Management Science, 17 (1970).
[5] D. H. Jacobson: On fuzzy goal and maximizing decisions in stochastic optimal control, Journal of Mathematical Analysis and Applications, 55 (1976).
[6] T. Odanaka: Stochastic Control Processes, Morikita Pub. Co., (1976) (in Japanese).
[7] T. Odanaka: On some stochastic control processes in a fuzzy environment. (to appear).
[8] T. Odanaka: Control chart and the stochastic bang bang control. Proceeding of JCQC'78-Tokyo.
[9] J. A. Bather: Control charts and the minimization of costs, J.R.S.S. (1963).

SA5-3

ファジィ状態メモリを利用したブレーキ制御回路

fuzzy brake controled circuit using fuzzy state memory

白井 雄二† 佐々木 守†† 上野 文男†† 井上 高宏††
Yuji SHIRAI, Mamoru SASAKI, Fumio UENO and Takahiro INOUE
†八代工業高等専門学校 情報電子工学科
Yatsushiro National College of Technology
††熊本大学 工学部 電気情報工学科
Faculty of Engineering, Kumamoto University

Abstract : While a car is travelling at a constant speed, suddenly it encounters an object a few meters lying along its path. Considering the speed of the car, and its distance from the object, an accurate application of the brakes is necessary to avoid collision. The application of the brakes with regards to speed and distance of the moving car is to be executed using fuzzy operation.

Using the fuzzy state memory which can store some fuzzy states, a satisfactory fuzzy brake control is verified according to computer simulation.

This fuzzy brake control circuit which utilizes fuzzy state memory is simple construction. Because of this the construction of small and light control circuit is possible. Also, the membership functions as well as the construction is not complicated that both can be easily obtained.

1. まえがき

車がある速度で進行中に，急に正面に障害物の飛び出しがあった場合，障害物に衝突しないように，かつできるだけスムーズに停止できるように，車の速度と障害物のまでの距離に応じてブレーキ操作を行なう必要がある．このブレーキ操作を速度と距離によりファジィ制御で行なうわけであるが，ファジィ状態が記憶できるファジィ状態メモリ[1]を利用することによって満足のいくファジィ・ブレーキ制御が行なわれることをシミュレーションによって確認した．

このファジィ状態メモリによるブレーキ制御の回路は構成が簡単で，小型・軽量の制御回路が製作可能であるとともに，メンバーシップ関数も簡単な関数で実現可能であり，回路も簡素化できる．

2. ファジィ・ブレーキ制御

ファジィ論理を利用した制御はまずそれぞれの前件部に対応する入力変数をファジィ集合のラベルに分け，そのラベルに属する割合をメンバーシップ関数で０から１のグレードに対応させ，ファジィ演算を行い制御量を求める[2]．

本論文では，車の速度（ｘ［ｋｍ／ｈ］）と，障害物までの距離（ｙ［ｍ］）によるブレーキ制御量（ｗ）について検討した．メンバーシップ関数の一例として図１のように，速度については，Ｂ：速い，Ｍ：中くらい，Ｓ：遅いの３について表現でき，距離については，Ｂ：遠い，Ｍ：中くらい，Ｓ：近いの３つに表現できる．ブレーキの制御量は最大にブレーキを踏み込む量を１とし，ブレーキを踏まない状態を０として，０～１の制御量で表わす． そこで，

「もし，速度が速く距離が近いならばブレーキをいっぱい踏め」

if ｘ is Ｂ, and ｙ is Ｓ then ｗ is 1

とか「もし，速度が遅く距離が遠いならばそのまま進め（ブレーキ操作は何もしなくても良い）」

if ｘ is Ｓ, and ｙ is Ｂ then ｗ is 0

等のように表１のようなブレーキ制御量が考えられる．

これらのメンバーシップ関数(前件部)よりそれぞれのＭＩＮを取り表１の制御量(後件部)で最終制御量を出力する．しかし，このブレーキ制御ではスピードが遅いときと速いときの制御量を変えないとうまく停止できなかったり，停止はできてもずっと手前で静止したする．そこでうまく制御するためには速度に対する

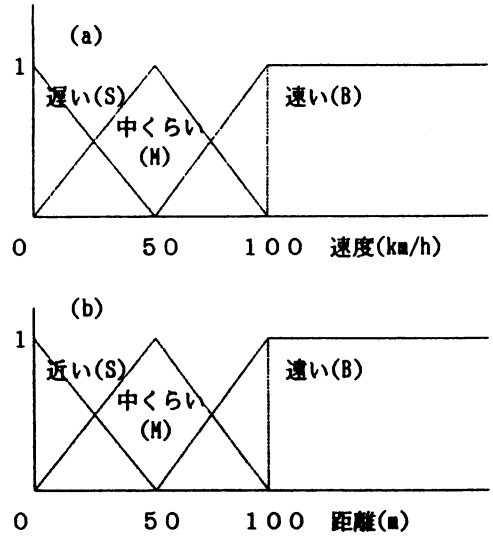


図１ 速度(a)と距離(b)のメンバーシップ関数

制御量を遅いときは表１を利用し，速度が速いときは新たに制御量の表を表１とは別の表として表２のように複数準備する必要がある．この表を１つで行なうためには図１のメンバーシップ関数のラベルをもっときめ細かくする必要がある．

表１，表２による車の速度（ｘ）と障害物までの距離（ｙ）のファジィブレーキ制御量の図を図２に示す．この図からはどんな速度や距離でも制御を行なうことになるため通常の走行では問題となる．そこで速度ｘが距離ｙより小さいときは制御しない（if ｘ＜ｙ then ｗ is ０）という条件（たとえば速度１００ｋｍのとき障害物が１００ｍ以上あればブレーキをかけない等）を入れる必要があり，この条件を入れた図を図３に示す．ｘ＝ｙのところで急激な制御量の変化が生じている．この変化を滑らかにするためには，さらになんらかの条件を加えなければならない．このためこの制御をハードウエアで実現するためには複雑な回路となるであろう．

表１　速度が遅いときの制御量

速度＼距離	近い (S)	中くらい (M)	遠い (B)
遅い (S)	０．２	０	０
中くらい(M)	０．８	０．２	０
速い (B)	１．０	０．８	０．２

表２　速度が速いときの制御量

速度＼距離	近い (S)	中くらい (M)	遠い (B)
遅い (S)	０．７	０．１	０
中くらい(M)	１．０	０．７	０．１
速い (B)	１．０	１．０	０．７

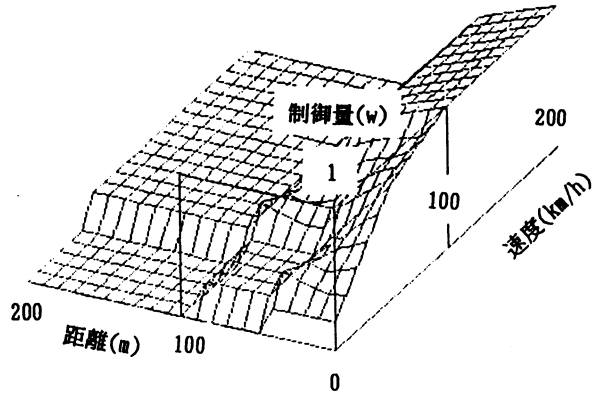


図２　速度の遅いときの制御量の図

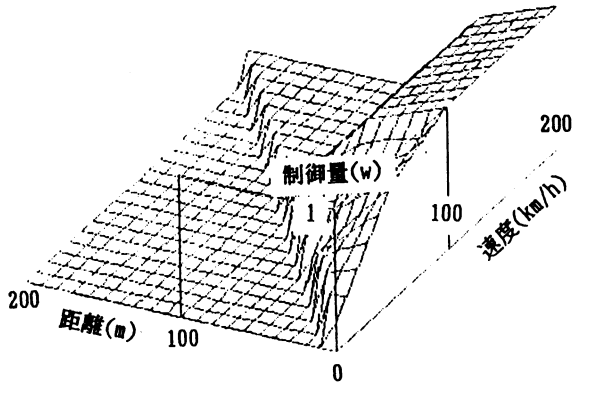


図３　図２に制御条件を入れた制御量の図

３．状態メモリを用いたファジィ・ブレーキ制御

２章の通常のファジィ・ブレーキ制御による制御量の図は速度ｘと距離ｙによる形がちょうど図４のファジィ状態メモリ[1]の限界積限界和１８（ＢＰＢＳ１８）に似ている．

さらにこのＢＰＢＳ１８の図は，速度ｘ，距離ｙのほかに変数としてｚがあり，このｚは２章の速度による制御量の表を表１，表２のように複数用意する代わりにｚを速度に関する変数ｘとは別のメンバーシップ関数によるパラメータとして利用できる．

また，速度ｘと距離ｙのメンバーシップ関数は図１のＢ，Ｍ，Ｓ等のようなに幾つものラベルを用意せずに，図５のように簡単なメンバーシップ関数で行なうことで制御量の表を連続な値とした．

図４と表１，表２の関係より，パラメータｚは速度の遅いときはｚを小さく，速度の速いときはｚを大きくする必要がある．

さらに，２章ではif ｘ＜ｙ then ｗ is ０ のような速度と距離の関係でブレーキ操作の必要無い条件を加えなければいけなかったが，この速度と距離の関係でのブレーキ制御不用の条件を考慮すると，ｚ自身も限界積限界和（ＢＰＢＳ１８）を利用すると最適な形が得られることが分かった．

ファジィ状態メモリの限界積限界和１８は，

$$BPBS18(x,y,z)=(x\oplus\bar{y})\odot(z\oplus x)\odot(\bar{y}\oplus z) \quad (1)$$

と表せる．ここで，⊕，⊙はそれぞれファジィ論理の演算である限界和(⊕)と限界積(⊙)である．

パラメータｚを決める速度x_0と距離y_0のメンバーシップ関数は図６とすると良い．このときの変数ｚをz_0とすれば，z_0はx_0が０に近いときでもある程度ブレーキを踏む必要があるためz_0＝０．１を採用する．z_0をさらに可変することで停止したときの障害物までの距離を変えることが可能である．

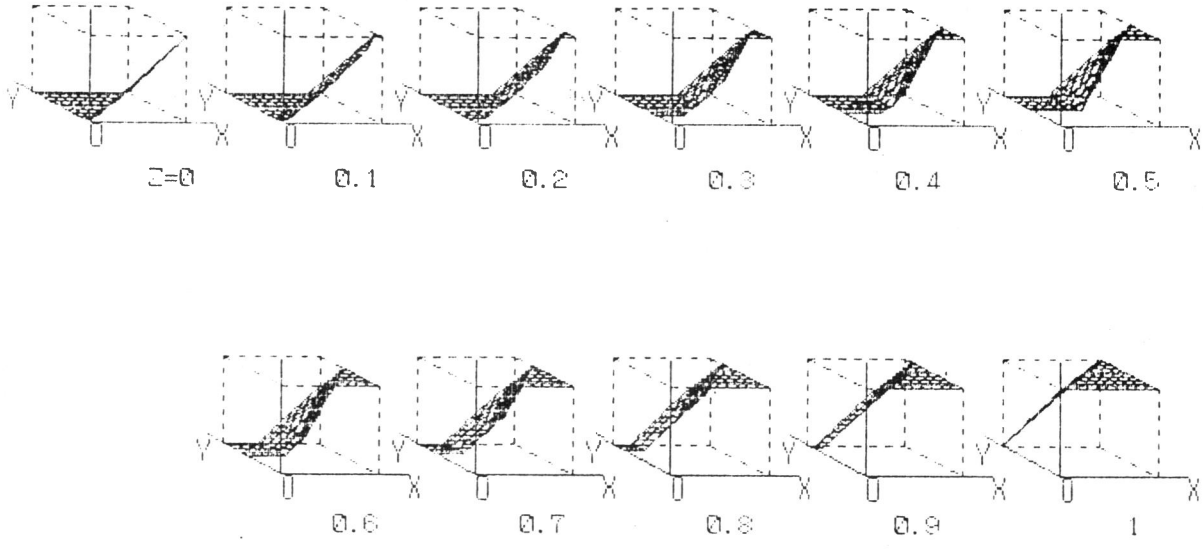


図４　ＢＰＢＳ１８のファジィ状態メモリ

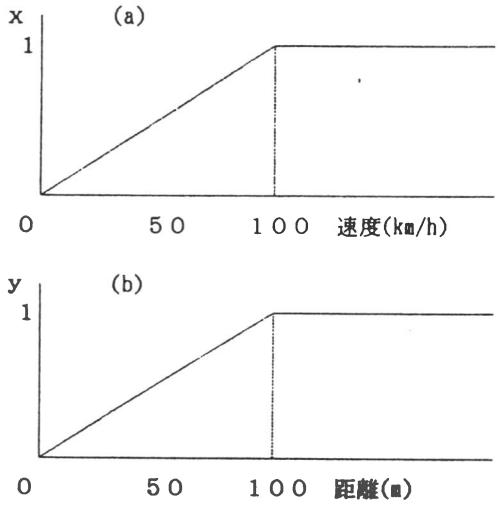


図５　速度(a)と距離(b)のメンバーシップ関数

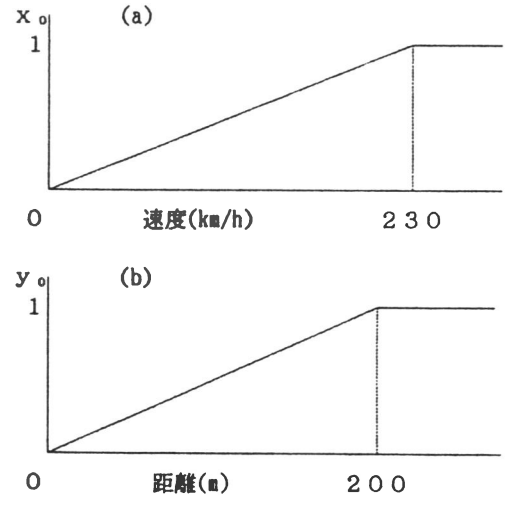


図６　ｚを決めるための速度(a)と距離(b)のメンバーシップ関数

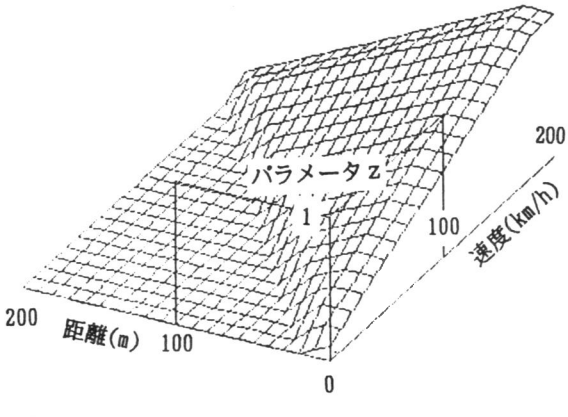


図７　x_0，y_0，z_0によるｚの図

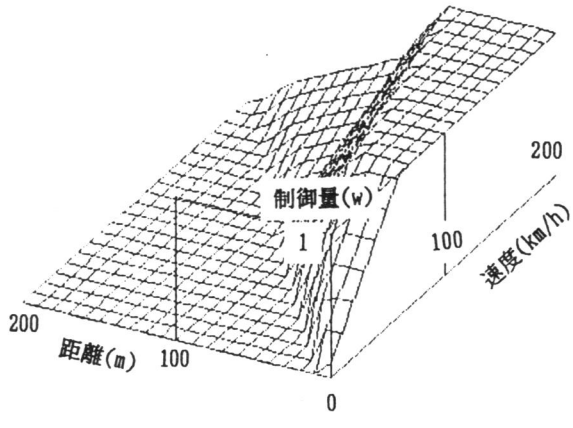


図８　ＢＰＢＳ１８による制御量の図

このx₀，y₀，z₀によるｚの図は図７となる．この図は図６のメンバーシップ関数により，図４にx₀，y₀，z₀を代入し，ｘ軸とｙ軸はもう一度実際の速度と距離に戻して表示している．

以上より速度と障害物までの距離によるブレーキ制御量の図は図８となり，図３と似た形となる．この図は急激なブレーキ制御量の変化が図３と比べると無いためスムーズなブレーキ制御が行なわれることになる．

図８を利用したファジィブレーキの制御結果を図９に示す．速度が速く，距離が短いときは障害物に当然衝突するが，うまく停止できるときは衝突する速度と距離のところとその付近を除いてどの場合も同一距離で停止している．

４．ファジィ状態メモリよるファジィ・ブレーキ回路

ファジィ状態メモリ[1]はスイッチによって状態を可変できるようにし，多くの状態を実現するわけであるが，本稿では状態が１８と決まっているので図１０の回路が限界積限界和１８となる．さらに，x₀，y₀，z₀による変数ｚを得るための回路も限界積限界和１８の回路である図１０となるため，ファジィ・ブレーキ制御回路は図１１となる．

本回路は回路構成が簡単であり，高速演算が可能であり，小型・軽量化が可能である．

５．むすび

車の速度と障害物のまでの距離に応じてブレーキ操作を行なうために，ファジィ状態が記憶できるファジィ状態メモリを利用したファジィ制御により行なわれることをシミュレーションによって確認した．

このファジィ状態メモリによるファジィ・ブレーキ制御の回路は構成が簡単で，小型・軽量の回路が製作可能である．さらにメンバーシップ関数も簡単な関数で実現可能となった．

また，ファジィ状態メモリには全部で６４通りの形が有るが，今回はブレーキ制御に最適な状態メモリとしてそのうちの１つである限界積限界和の１８を利用した．

通常の各状態に対するメンバーシップ関数を定義し，それらの演算よりファジィ制御量を決定する回路に比べ，演算回路やメンバーシップ回路が簡単である．

他の制御に最適な状態メモリが存在するであろう．

本研究の一部は平成元年度の文部省･科研費(奨励研究A 課題番号01750376)によるものである．

参考文献

(1)白井,佐々木,上野,井上:“限界和と限界積による簡単なファジィ状態メモリ回路”,第５回ファジイシステムシンポジウム講演論文集,pp.31-36(平成元年6月)
(2)菅野:“ファジィ制御”,日刊工業新聞社,(昭和63年5月)

［問い合わせ先］
〒８６６　熊本県八代市平山新町２６２７
八代工業高等専門学校　情報電子工学科
白井　雄二
ＴＥＬ：０９６５－３５－１６１１
ＦＡＸ：０９６５－３３－０６１６

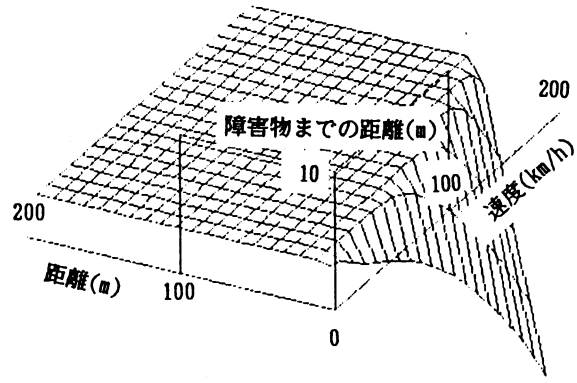


図９　ＢＰＢＳ１８による制御結果の図

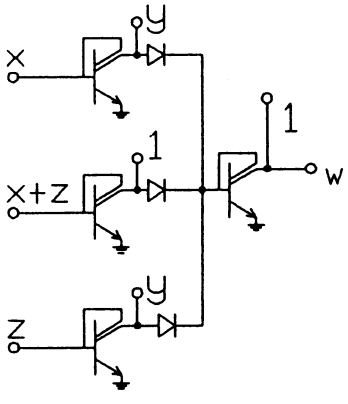


図１０　ＢＰＢＳ１８の回路

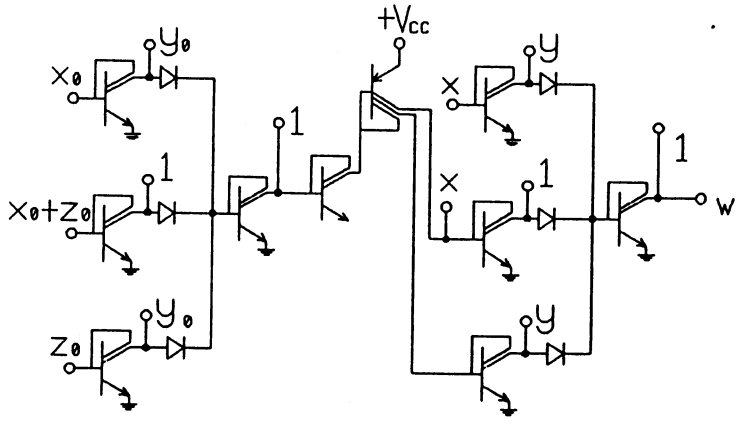


図１１　状態メモリによる
ファジィ・ブレーキ制御回路

SA5-4

光学法によるファジィ推論法
OPTICAL FUZZY INFERENCE METHOD

玉野　和保
Kazuho TAMANO
広島工業大学　工学部
Fac. of Engineering, HIROSHIMA Institute of Technology

Abstract: A new system, which is composed with the optical parts, the Fresnel lenses and the frosted glass plates, by which the fuzzy rules can be infered optically, has been proposed. This system can operate a fuzzy reasoning based on a Product-Sum-Gravity Method which has been proposed newly by Dr. M.Mizumoto. This paper shows that the principle of this optical inference system, and it became clear that the system can be applied to infer two rules composed of AND/ELSE clauses.

1．はじめに

あいまいな概念で表される対象の迅速計量化装置開発を目的として、インコヒーレント光の幾何光学演算に基づく新規なファジィ推論装置を開発した。

ファジィ演算を高効率で実行するためのソフトウエアや演算装置開発は、近年意欲的に進められており[1,2]、また多数のファジィ規則を高速に推論できる光学推論法の開発も期待されている[3,4]。

著者は、レンズや各種のフィルターを用いて光を透過・拡散させ、光速で各種のファジィ演算を行なおうとしている。

本報告では、すでに光学法で実現したMIN－MAX－重心法をもとにして[5～8]、光学的に代数積－加算－重心法に基づく推論を可能にしたことについて、その方法を紹介する。また、本方法の(A_1 and B_1) → C_1、(A_2 and B_2) → C_2." で表される多重規則推論に対する適用実験から、本方法がファジィ推論に十分適用できることの検証結果が得られたことについても報告する。

2．代数積－加算－重心法によるファジィ推論法

ファジィ集合間の演算は、MIN、MAX、限界積、限界和、代数積、代数和などの各種演算法で表される[9]。とくに、MIN、MAX 演算はファジィ制御における主要な演算法として、多くのファジィコントローラに取り入れられている。しかし最近、水本はMAX-MIN演算と重心値で推論結果を得る "MIN-MAX-重心法" と呼ばれている推論法より制御結果が良好で、しかも直観に合う" 代数積－加算－重心法" と名付けられた推論法を提案している[10]。この推論法は、代数積・加算演算と重心値で推論結果を得るもので、線形な補間結果を得ることができるものである[10]。

代数積－加算－重心法では、ファジィ規則が (A → B) で表されるとき、その事実を表すシングルトン u=u_0 に対する推論結果 B' は、前件部の値 $\mu_A(u_0)$を後件部 $\mu_B(v)$ に掛けて表す式 $\mu_{B'}(v)=\mu_A(u_0)\cdot\mu_B(v)$ で得ることができる。この演算過程を図 1に示す。

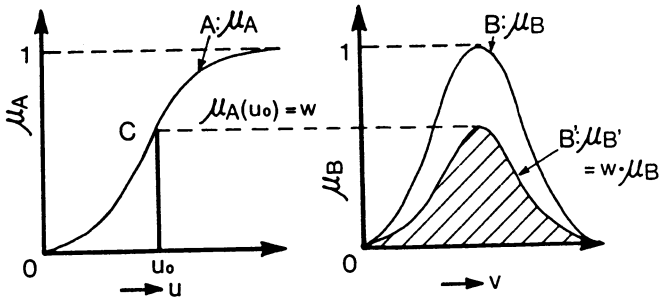


図1　A → B で表される規則の代数積－加算－重心法によるファジィ推論

このようなファジィ推論法は、i番目の規則が(A_i and B_i) → C_i で表される多重規則にも同様に適用できる。 すなわち、シングルトンの入力 $u=u_0$、$v=v_0$に対するi番目の推論結果 $\mu_{Ci}'(w)$は、and を代数積で表し $\mu_{Ci}'(w)=\mu_{Ai}(u_0)\cdot\mu_{Bi}(v_0)\cdot\mu_{Ci}(w)$で表すことができる。 これらの各推論結果は加算演算により$\mu_C'(w)=\Sigma\,\mu_{Ci}'(w)$で合成される。 合成された推論結果の重心値は、非ファジィ化代表値としてファジィ制御に用いられる。

3．光学法によるファジィ推論

2章で述べた推論法は、レンズやフィルターにより構成した光学系で演算できる。 図2は $A_1 \rightarrow B_1$、$A_2 \rightarrow B_2$ で表されるファジィ規則に対する光学推論装置の構成図である。

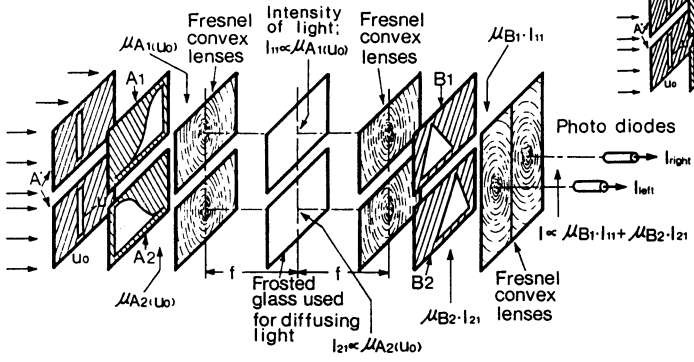


図2 光学法によるファジィ推論装置の構成

本光学法は、インコヒーレントな平行光線を演算媒体として演算する。 前件部のメンバーシップ関数μ_{A1}、μ_{A2}は、メンバーシップ関数の形状通りに光を透過させることのできる開口をもって表す。 入力シグルトンは同様に$u=u_0$の位置に細い幅で表したスリットで与え、これらの2つの開口の重ね合わせによりMIN 演算を行い前件部の値$\mu_{A1}(u_0)$および$\mu_{A2}(u_0)$を表す投影像を得るようにしている。 推論演算である代数積は、前件部の値が後件部の高さを変える重みとして作用することから、後件部のメンバーシップ関数の高さを直接幾何学的に変化させるのではなく、開口を透過する光量を前件部の値で変化させ、関数の高さを光量に対応させるようにして演算する。 演算法は、$u=u_0$で表されるシングルトンが一定の幅を持つ開口であることから$\mu_{Ai}(u_0)$を表す投影像は$\mu_{Ai}(u_0)$に比例した光量となることを利用して、その投影像をフレネル凸レンズで曇りガラス面の一点に集光し、さらに焦点距離に配置したフレネル凸レンズで再び平行光線にして前件部の値に比例した照度を得るようにする。 この光線は後件部の開口に照射され、後件部のメンバーシップ関数の高さを前件部で変化させたことに等価な投影像を得る。 それぞれの規則の推論結果の投影像は、後述する重心値計算の電気回路のフォトダイオードにフレネル凸レンズを用いて集光することにより、加算し合成する。

図3は (A_1 and B_1) → C_1、(A_2 and B_2) → C_2 で表される and を含む多重規則に対する光学推論法である。

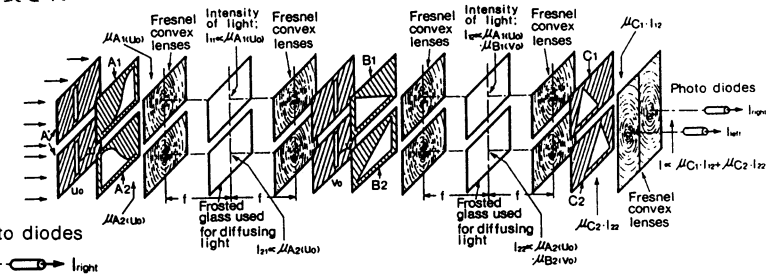


図3 規則(A_1 and B_1) → C_1、(A_2 and B_2) → C_2に対する光学ファジィ推論法

and句は前章で述べたように代数積で演算されるから、$\mu_{Ai}(u_0)$に比例した照度を表す光線で$\mu_{Bi}(v_0)$ を表す開口を照射し、その投影像を再びフレネル凸レンズで集光しその後平行光線に変える操作によって、$\mu_{Ai}(u_0)\cdot\mu_{Bi}(v_0)$に比例する照度を表す光線を得るようにする。

4．重心値計算法

ファジィ推論法を制御や判断に適用する場合には、集合の形態ではなく非ファジィ化した確定値が必要である。 そのような非ファジィ化はファジィ論理に基づく情報処理系とクリスプな論理による情報処理系とのインタフェースでもある。 非ファジィ化法には重心法、面積法、最大値法など多くの方法がある[10,11]が、ファジィ制御では重心法がよく用いられている。

本研究では、演算結果のメンバーシップ関数の重心値を電気

回路により測定するようにした。　図４に重心値を得る電気回路構成を示す。

推論結果の投影像の重心値Cgは、メンバーシップ関数の変数の軸に対して積分計算により求める。　本方法では次式のように簡便な２項近似区分積分式で計算する。

$$Cg=\frac{(1/4)\cdot I_1 + (3/4)\cdot I_2}{I_1 + I_2} \qquad (1)$$

すなわち、図４に示す回路構成では、投影像の左半分の像の面積 $\mu_C'\{(1/2)\Delta w\}\cdot\Delta w$に対応する光量をフォトダイオードの光電流$I_1$で検出し、同様に右半分の像の面積 $\mu_C'\{(3/2)\Delta w\}\cdot\Delta w$をもう一つのフォトダイオードの光電流$I_2$で検出し、これらをブリッジ回路とアナログ割り算器で式(1) に基づく計算を行なう。

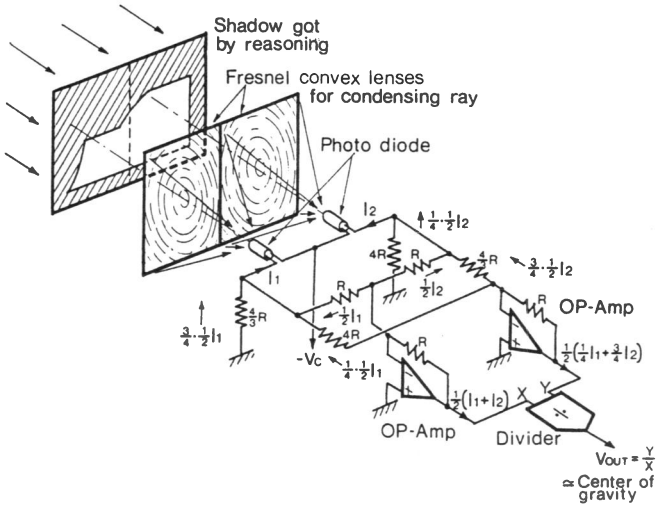


図４　重心値測定のための電気回路構成

式(1) は変数w の最大値を１として規格化しΔw を1/2 としている。　I_1、I_2の重み値 (1/4)と (3/4)は加算回路の抵抗値により与える。

図５に推論結果の投影像を単調増加関数とした場合の、その投影像の形状変化に対する重心値 と式(1) による計算値、ならびに式(1) に基づく実験値を示す。

実験結果は、重心値が図形の中心では、重心値と式(1) に基づく計算値・実験値はよい一致を示している。　しかし、重心値が中心を離れると両者の差は大きい。　これは２項近似で積分計算したことに基づくものと考えている。

本実験結果から、図４に示す回路構成が中心付近の重心値計算に十分適用できることが確認できた。

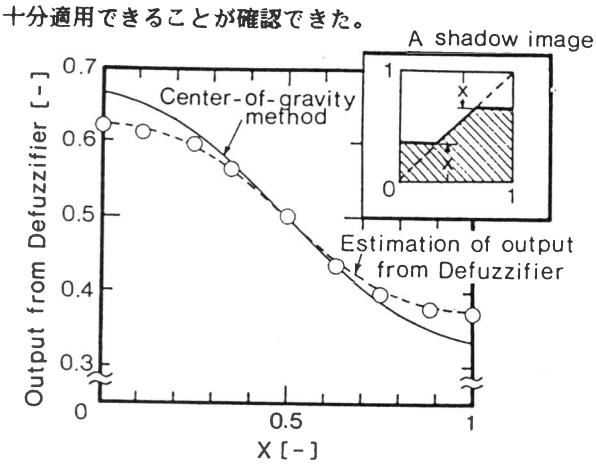


図５　推論結果の投影像の形状変化に対する重心値と式(1)による計算値ならびに、式(1) に基づく実験値の変化

５．　２規則からなる多重規則推論への適用実験

(A_1 and B_1) → C_1、(A_2 and B_2) → C_2で表される多重ファジィ規則に対する本方法の適用性を検証した。

実験は図３に示す装置構成で行った。　図６に実験装置を示す。

図７に１つの事実の集合に対する推論結果の投影像を示す。また、その投影像に対する重心値と電気回路により測定した重心値を図中に示す。

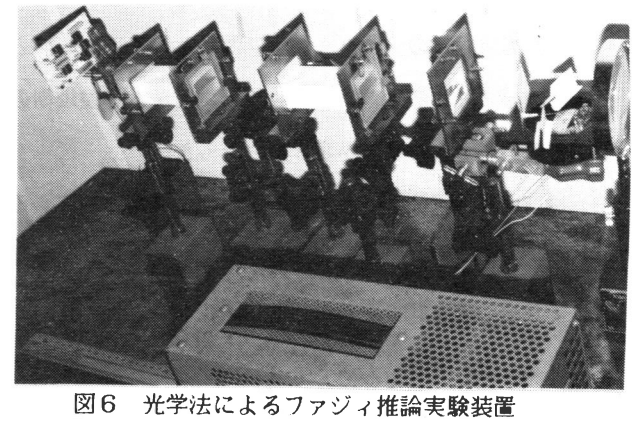


図６　光学法によるファジィ推論実験装置

実験により得られた投影像は、図中に示す各概念のメンバーシップ関数の作図法による推論結果の図形とよく一致した。また、電気回路により測定した重心値も図形から計算した値とよく一致した。　この結果から本方法が２命題からなる多重規則の推論に十分適用できることが確認できた。

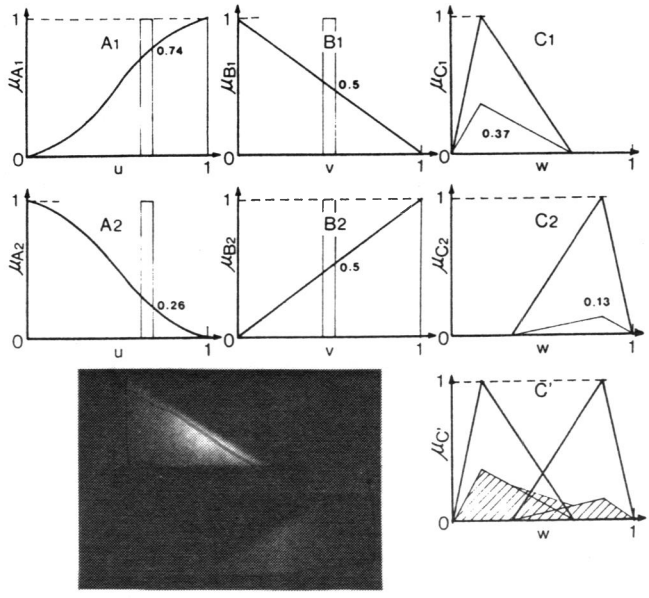


図７（A':u_0=0.667、B':v_0=0.5）に対する光学推論結果

重心値：0.39　　実験値：0.37

６．おわりに

本研究によりつぎの結論が得られた。

(1) メンバーシップ関数形状に光を透過できるようにした開口、とフレネル凸レンズ・曇りガラスを組合せた光学演算法により、代数積－加算－重心法によるファジィ推論を可能にする方法を確立した。

(2) 本方法の２規則の推論への適用実験から、図形操作により求めた推論結果のメンバーシップ関数と実験により得られた投影像がよく対応した。　これより本方法が多重規則の推論に適用可能であることが明らかになった。

(3) 投影像を２区分しそれぞれの投影像の面積に対応する光量をフォトダイオードにより測定することによって、電気回路により重心値を計算することを可能にした。

本方法は光学系と電気系の入出力における結合法に課題をもっている。　また、光学法は立体回路になることから、様々な分野への適用にはコンパクト化が課題となる。　さらに、ファジィ論理の演算法は多様である。　このような各種の演算への適用性も課題である。　今後、これらの課題解決を進めていく予定である。

（参考文献）

1)Takeshi Yamakawa：Fuzzy Microprocessors-Rule Chip and Defuzzifier Chip, Proc. of Int. Workshop on Fuzzy System Applications (Iizuka), A4, 51/52 (1988)

2)有川晴彦、広田　薫：アドレスルックアップ仮想ページング方式によるファジィ推論チップ、計測自動制御学会論文集、26(2)、180/187 (1990)

3)広田　薫：ファジィ制御の現状と展望、計測と制御、27(5)、431/439 (1988)

4)菅野道夫：ビジネスマンのための『ファジィ読本』、サイエンス社 (東京) (1988)

5)玉野和保：光学的Fuzzy推論法、電子情報通信学会春季全国大会講演論文集、C398 (1990)

6)玉野和保：光学的Fuzzy推論法、多値論理とその応用研究会研究報告（電子情報通信学会）、MVL90-5 (1990)

7)玉野和保：光ファジィコンピュータ、（セミナ・ニューラル／ファジィの新しい展開を探る）テキスト、システム制御情報学会 (1990)

8)玉野和保：光ファジィコンピュータの開発、CAD & CIM、No. 16 、７月号 (1990)

9)寺野寿郎、浅居喜代治、菅野道夫：ファジィシステム入門、オーム社 (東京) (1987)

10)水本雅晴：ファジィ制御向きの　ファジィ推論法、計測と制御、28(11) 959/963 (1989)

11)Masaharu Mizumoto : Fuzzy Contorols under Various Defuzzifier Method, Proc. of Int. Workshop on Fuzzy System Applications (Iizuka), D7, 252/253 (1988)

問い合わせ先：〒731-51 広島市佐伯区三宅二丁目１－１
広島工業大学　工学部　電子工学科
玉　野　　和　保
TEL　0829-21-3121　EXT. 317
FAX　0829-22-1480

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SB1-1

高速化と回路の超小型化を実現するファジィコントローラのハードウエア化

IMPLEMENTATION OF A FUZZY CONTROLLER WITH REALIZATION OF HIGH INFERENCE SPEED AND REDUCTION OF CIRCUITRIES

佐々木守　上野文男　井上高宏　白井雄二
Mamoru SASAKI, Fumio UENO, Takahiro INOUE and Yuji SHIRAI

熊本大学　工学部
Fuculty of Engineering, KUMAMOTO University

八代高専
Yatsushiro National College of Technology

abstract : This paper describes a method of implementation of a fuzzy controller using digital circuits. The objects of design are not only realization of a high speed inference but also reduction of the circuitries, because we would like to implement the hardware fuzzy controller in a single chip with CPU and other function blocks as a micro computer. So, a simple inference method using MAX/MIN operations is introduced, and a simple membership function circuit consist of an adder, shift-register and comparator. Further, to realize a high speed inference, the antecedent block and the weighted average operation are implemented using SIMD(Single-Instruction Multi-Data-Stream) architecture and a multi-operand adder with Wallace tree, respectively.

1. まえがき

ファジィ制御は多目的制御，論理型制御として，また熟練オペレータの制御を自動化できることから盛んに研究されている．主にプロセス制御への応用例[1]が多いが，メカトロ・システムなどを制御する場合，プロセス制御だけでなく，シーケンス制御，さらに，それら双方の性質を持つ制御へのファジィ理論の応用が進んでいくと考えられる（例えば，シーケンスの流れをファジィ推論で決定したり，ファジィコントローラやPIDコントローラをシーケンス制御によって使い分けるなど）．一方，シーケンス制御などの実現には，コアとなるCPUに各種周辺回路（I/Oやタイマ，カウンタなど）を組み合わせて，１チップ化したマイコンが使われる．マイコンにソフトウエアによってファジィ推論を組み込むと，上記のような柔軟な制御を行なわせたい場合，ファジィ推論に時間がかかり，実時間制御は難しい．

本稿では，ディジタル回路によるファジィコントローラのハードウェア化手法を提案する．組み込み用途への応用を考えて，既存のCPUコアといっしょに周辺回路として１チップ化できるように，推論の高速化と共に回路の小型化を設計の目標にした．２章では，今回採用したハードウェア化に適したファジィ推論法を説明する．３章ではコントローラの構成要素（メンバーシップ関数回路，MAX/MIN演算ブロック，荷重平均回路）を説明して，さらに，それらの構成要素を用いて，コントローラの全体のアーキテクチャ示す．４章では本回路を組み込むマイコンの構成，その使い方などを考察する．

2. ハードウェア化に適したファジィ推論法

説明を簡単にするため以下では２入力１出力の制御器を考える．次のような制御規則を用いる（説明を簡単にするため制御規則は２つにしている）．

if (x1 is A11, x2 is A12)(x1 is A31, x2 is A32)
then y is B1 with C1

if (x1 is A21, x2 is A22)(x1 is A41, x2 is A42)
then y is B2 with C2 (1)

ここで，x1,x2は入力，yは出力，Ai1,Ai2は前件部メンバーシップ関数，B1,C1,B2,C2は後件部メンバーシップ関数を表わすパラメータである．また，前件部の括弧内はAND結合，括弧間はOR結合され，前件部全体は加法標準形を構成する．後件部メンバーシップ関数は図１に示す三角形型である．このメンバーシップ関数は図１に示すパラメータBi，Ciで表わされる．これらは，式(1)のB1,C1,B2,C2に対応する．MAX/MIN演算を採用すると推論方法は以下のようになる．メンバーシップ関数Aのx'におけるグレードをA(x')で表わすと，入力x1=x1'，x2=x2'の各規則の前件部に対する適合度giは，

$$gi=\{Ai1(x1')\wedge Ai2(x2')\}\vee\{Ai3(x1')\wedge Ai3(x2')\} \quad (i=1,2) \tag{2}$$

ただし，∨,∧はそれぞれMAX,MIN演算を表わす．i番目の規則による推論結果は，

$$y \text{ is } gi\cdot Bi\cdot Ci \tag{3}$$

２つの規則による全体の推論結果y'は，次式のような荷重平均として求める．

$$y' = \frac{\Sigma\, gi\cdot Bi\cdot Ci}{\Sigma\, gi\cdot Ci} \tag{4}$$

従来の推論法では各規則の推論結果をメンバーシップ関数として求め，その結果をMAX演算などで重ね合わせて全体の推論結果を得ていた．さらに推論結果のメンバーシップ関数から重心法等によって確定値を決定

した．一方，本推論法では後件部のメンバーシップ関数を中心と幅で表わすことで，規則の適合度から確定値を荷重平均として直接求める．推論結果としてメンバーシップ関数は得られないが，推論アルゴリズムが簡単化され，ハードウエアで実現した場合，回路の小型化，推論速度の高速化に役立つ．

3．構成要素

3．1．メンバーシップ関数回路

従来のディジタルファジィプロセッサでは，メンバーシップ関数をRAMやROMによるテーブルルックアップによって実現していた[2]．この場合，メモリ容量が大きくなり，マイコンの周辺回路としての応用は難しい．そこで，図2に示すような台形型メンバーシップ関数を加算器や比較器等を用いた簡単な構成で実現した．その回路図を図3に示す．台形型メンバーシップ関数を定めるパラメータは，2つの変曲点の位置p1,p2(p1<p2)と幅w1,w2である（図2参照）．図4に示すように，台形型メンバーシップ関数はS字型,Z字型のメンバーシップ関数に分解でき，また，それらのMIN演算で合成できる．S字型，Z字型のメンバーシップ関数は次の式で表わせる．

$$S(x) = \begin{cases} 1 & (1 < (x-p1)/w1) \\ (x-p1)/w1 & (0 \leq (x-p1)/w1 \leq 1) \\ 0 & ((x-p1)/w1 < 0) \end{cases} \quad (5)$$

$$Z(x) = \begin{cases} 1 & (1 < (p2-x)/w2) \\ (p2-x)/w2 & (0 \leq (p2-x)/w2 \leq 1) \\ 0 & ((p2-x)/w2 < 0) \end{cases} \quad (6)$$

ここで，S(x)，Z(x)はそれぞれS字型，Z字型のメンバーシップ関数，xは入力または全体集合を表わす．
式(5),(6)は加算器を用いて図3の前段の回路で実現できる．まず，パラメータp1（入力x）をExclusive ORで反転させ，入力x（パラメータp2）との加算でx-p1(p2-x)を求める．ここで，符号ビット（最上位ビット）でx-p1(p2-x)の正負を調べ，正の場合x-p1(p2-x)を，負の場合0をレジスタに送る．次に1/w1(1/w2)の各ビットで（1/w1,1/w2は計算しておく），ANDゲートを制御しながら，累算器（レジスタ）とMSBへ1ビットずつシフトしたシフトレジスタの内容を繰り返し加算して，(x-p1)/w1 ((p2-x)/w2) を求める．ファジィ論理値1はfull-bitに対応するので，加算を繰り返すときの桁あふれにより，(x-p1)/w1 > 1 が検出でき，その場合，累算器の値でなくfull-bitを出力する．S(x)，Z(x)を順番に求めて，図3の後段の比較器とセレクタでS(x),Z(x)の小さい方を出力する．

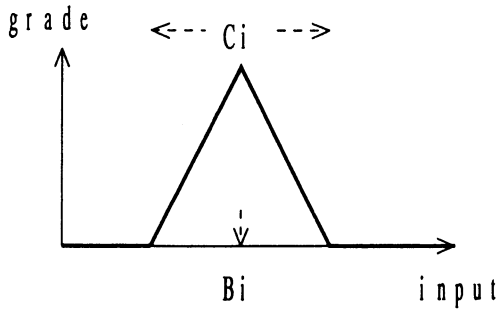


図1　後件部メンバーシップ関数

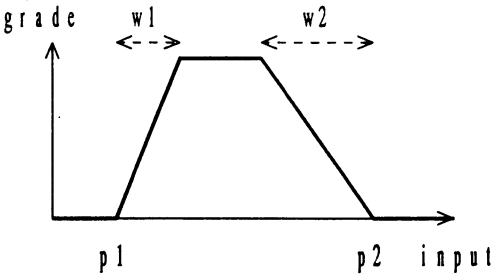


図2　前件部メンバーシップ関数

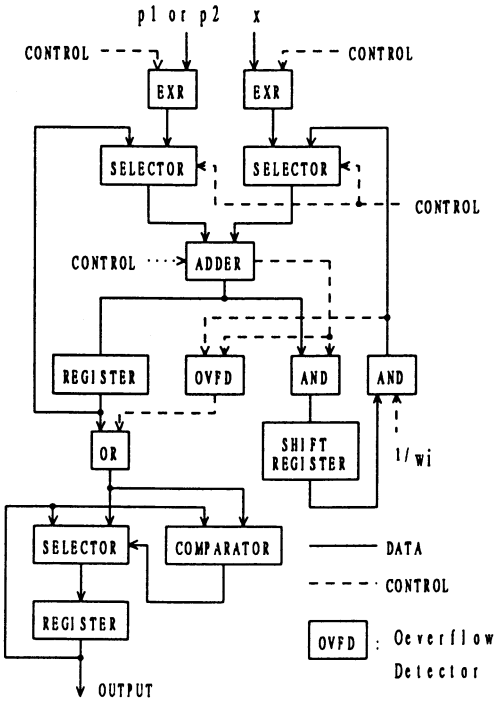


図3　メンバーシップ関数回路

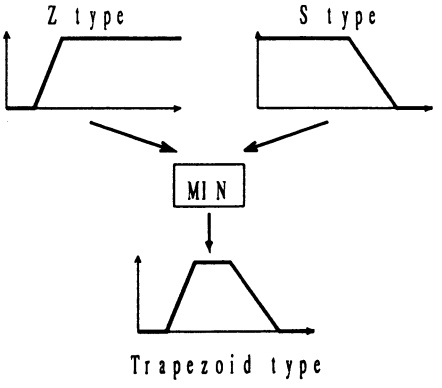


図4　台形型メンバーシップ関数の合成

3．2．MAX/MIN演算ブロック

図5にMAX/MIN演算ブロックの構成図を示す．1つのMAX/MIN演算ブロックが式(1)の1つの規則に対応する．その動作は，まず，入力バス上の数種類のラベルのグレードから必要なラベルのグレードをセレクタで選ぶ．次にセレクタからのデータとレジスタの内容とのMIN演算を行ない，その結果を読みだしたレジスタに書き込む．各レジスタには式(1)の各項の現在までのMIN演算結果が記憶される．以上の動作を全てのレジスタ（全てのMIN演算項）に対して行ない，1つの推論入力に対する演算が終了する、これを推論入力数だけ繰り返す．その後，MAX演算器で全てのレジスタの内容に対するMAX演算を行って，各規則の適合度を求める．最後に求めた適合度とその規則の後件部のメンバーシップ関数の幅を表わすパラメータCiとの積gi･Ciを加算器とシフトレジスタを用いた加算シフト型乗算器で計算して，荷重平均回路に送る．引き続いて求めたgi･CiとBiとの積を計算して再び荷重平均回路に送る．図5では，MIN演算器，MAX演算器，乗算器の各ブロックは独立動作が可能でパイプライン処理を行う．

3．3．荷重平均回路

図6に荷重平均回路のブロック図を示す．まず，規則数のMAX/MIN演算ブロックから送られるgi･Ciを引き数とする加算（式(4)の分母の計算）をWallace-treeを用いた複数オペランド加算器で計算して，求めた加算結果を除数レジスタに送る．Wallace-treeとは，高速乗算器の実現等に用いられる複数オペランド加算方式で，1ビット全加算器を3-2カウンタとして用いて，それをtree状に接続して，オペランド数を2つまで縮小させていく[3]．オペランド数を縮小するのに，2入力加算器を用いないので，高速で，素子数の少ない複数オペランド加算器が実現できる．次に，引続きMAX/MIN演算ブロックから送られるgi･Bi･Ciを加算して式(4)の分子を計算する．計算結果を被除数レジスタに送り，減算シフト型除算器で推論結果を求める．図6の荷重平均回路で回路規模を大きくすると考えられる2入力加算器は，Wallace-treeの最終的な2つの引き数のための加算器と減算シフト型除算器で用いる加算器を共有させることで1つにでき，荷重平均回路を非常にコンンパクトに実現できる．

3．4　制御部

制御部はRAMを用いた水平型マイクロ命令メモリとカウンタから構成される．MAX/MIN演算ブロックに対する命令はMIN演算繰り返し終了フラグ，MAX演算繰り返し終了フラグ，推論の終了フラグから構成される．メンバーシップ関数回路に対する命令は入力変数の格納アドレス，その変数が使用するメンバーシップ関数のパラメータの格納アドレスである．荷重平均回路の制御信号はMAX/MIN演算ブロックに対する推論の終了フラグから作られる．マイクロ命令メモリの内容を書き換えることで制御タイミングを直接変えることができ，ルールの形式（入力変数の個数，前件部を加法標準形と見たときの項数など）を任意に設定できる．

3．5．コントローラ全体の構成

以上説明した3つの構成要素を用いて，コントローラ全体の構成図を図7に示す．前件部メンバーシップ関数のラベル数のメンバーシップ関数回路，後件部メンバーシップ関数のラベル数のMAX/MIN演算ブロック，

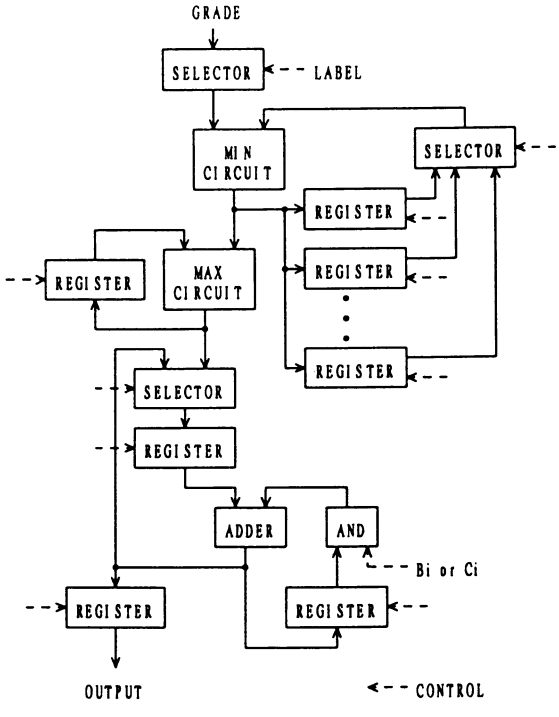


図5　MAX/MIN演算ブロック

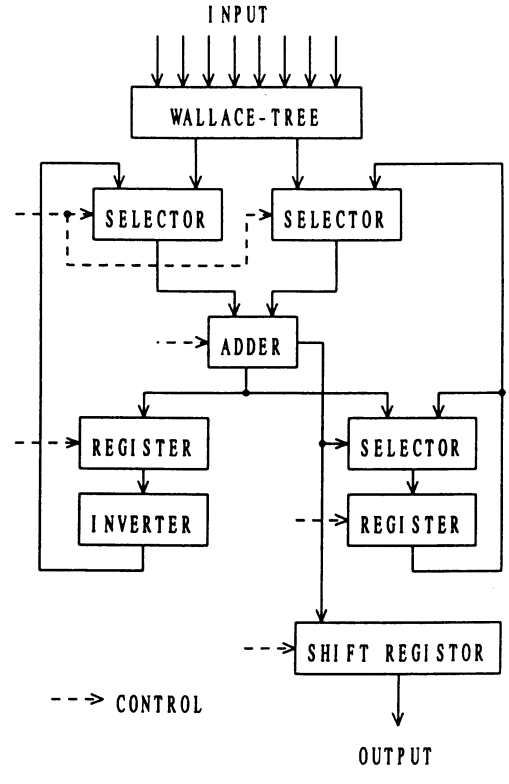


図6　荷重平均回路

1つの荷重平均回路，およびそれらを制御する制御部から構成される．処理の流れを簡単に説明すると，1つの推論入力が全てのメンバーシップ関数回路に与えられ，各メンバーシップ関数回路が自分の担当するラベルの与えられた推論入力に対するグレードを計算して，内部バスに出力する．内部バスには全てのラベルのグレードが一括して出力される．次にMAX/MIN演算ブロックで3．2節で説明した演算が全てのブロックで並列に行なわれる．ここまでを全ての推論入力に対して繰り返した後，MAX演算，乗算が行なわれ，MAX/MIN演算ブロックから各規則の推論結果が荷重平均回路に送られ，そこで最終的な推論結果が計算される．

4．考察

本ファジィコントローラを周辺回路として組み込む場合のマイコンの構成について考察する．構成法の1つとして，コアCPUが，ファジィコントローラをアクセラレータとして使用する場合を考えられる．この場合，例えば，内部メモリの一部をファジィコントローラとCPUの共有メモリに割り当てて，CPUは割り当てた共有メモリに推論入力を書き込み，ファジィコントローラを呼び出す．CPUは，その後，別の仕事を行なうことができる．呼び出されたファジィコントローラは推論入力を読みに行き，CPUとは独立にファジィ推論を始める．推論が終了すると，推論結果を共有メモリに書き込み，CPUに対して割り込みを行なう．また，複数のファジィ規則群をコントローラに用意して，コントローラのマイクロ命令の開始アドレスを共有メモリを通してファジィコントローラに送ることで，CPUは用意した規則群の中の任意の規則群を用いたファジィ推論を行なわせることもできる．この機能によって，状態によって使用するファジィ規則を切り換えたり，シーケンス制御において，ファジィ推論で判断させたい分岐ノードの個数を複数設けることができる．CPU側のソフトウエアとしては，ファジィコントローラを呼び出す命令等の拡張を機械語レベルで行なえばよい．

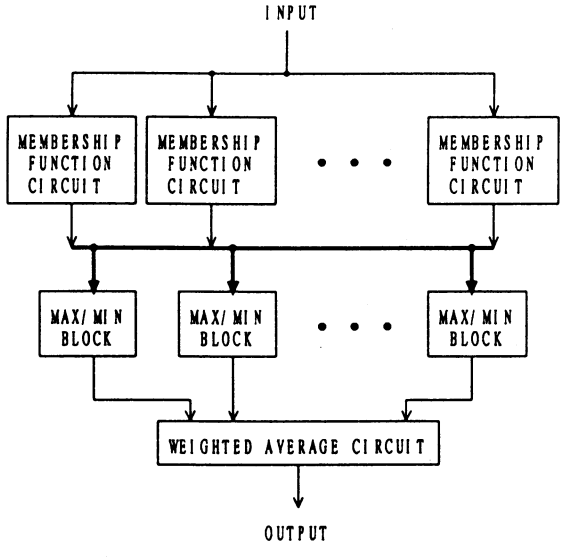


図7　コントローラの構成

5．まとめ

周辺回路としてマイコンに組み込むことを目的に，高速で小型なファジィコントローラのディジタル回路化について報告した．本回路によってファジィ制御の応用範囲がさらに広がることが期待できる．現在，スタンダードセル方式による詳細な回路設計を行なっている．

参考文献

(1)L.P.Holmbiad and J.J.Ostergraard : "Control of a cement kiln by fuzzy logic" , Fuzzy Information and Decision Processes, North-Holland, Amsterdam, pp.389-399, (1982).

(2)H.Watanabe, W.Dettloff and K.Yount : "A VLSI fuzzy logic controller with reconfigurable, cascadable architecture" , IEEE J. SC vol.25, no.2, pp.376-382, (1990).

(3)C.S.Wallace : " A suggestion for parallel multipliers " , IEEE Trans. Electronic Computers, vol.13, pp.14-17, (1964).

［問い合わせ先］
〒860　熊本市黒髪 2-39-1
熊本大学　工学部　電気情報工学科
佐々木　守
TEL : 096-344-2111(内)3842
FAX : 096-345-1553

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SB1-2

ファジイ推論を用いたテープ走行系調整用視覚認識装置

VISUAL RECOGNITION SYSTEM FOR THE ADJUSTMENT OF VTR TAPE-RUNNING MECHANISMS BY MEANS OF THE FUZZY REASONING METHOD

鈴木　規之[1)]　　岡橋　善一[1)]　　岡　活範[2)]　　藤原　博史[2)]
Noriyuki SUZUKI, Yoshikazu OKAHASHI, Katsunori OKA and Hirofumi FUJIWARA

1）松下電器産業（株）　生産技術研究所
Production Engineering Laboratory,
MATSUSHITA Electric Industrial CO.. LTD.

2）松下電器産業（株）　ビデオ事業部
Video Recorder Division,
MATSUSHITA Electric Industrial CO.. LTD.

Abstruct: An automatic adjustment machine for VTR tape-running mechanisms has been developed for use in the production process. Automation of the adjustment was difficult because the adustment depends on the operator's visual sensory judgement.

The adjustment machine has been developed by using visual recognition system which can sense and judge the state of adjustment by means of the fuzzy reasoning method. The machine makes self-judgement similar to the operator at the equal adjustment level.

1. はじめに

生産工程の自動化は組立分野を中心に進んでいるがそのなかでも、人間の官能判断に頼る調整検査工程は自動化が困難な分野でありネックとなっていた。

官能判断作業は多くの場合「限度見本」により規定され、明確な判断基準が言葉あるいは数値で表現されていないものである。したがって、プログラムで書けない、定量化方法がわからない、ということで実現できないケースが多い。また、検査対象から得るべき情報の種類も判断するに必要十分な範囲はどれだけかが不明確である。

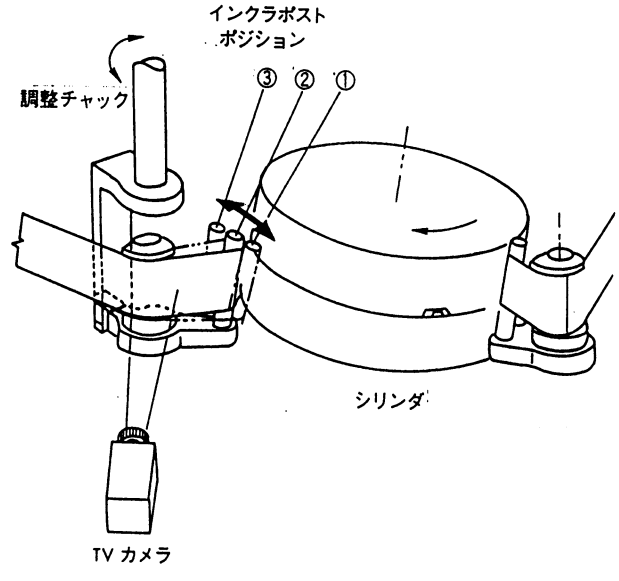
今回対象としたビデオデッキのテープ走行系調整作業は、テープと磁気ヘッドとの位置関係保証のためにテープ走行系規制ポストの位置調整を行うものである。

作業者は走行させたテープの規制状態を規制ポスト付近のテープのたわみ量を目視することによって判断し、その量が所定の状態になるまで調整ドライバーを微妙にコントロールしながら回している。たわみの状態変化は複雑かつ微妙であり、たわみ量の把握方法、官能判断との対応づけの実現方法が自動化する上でのポイントとなる。

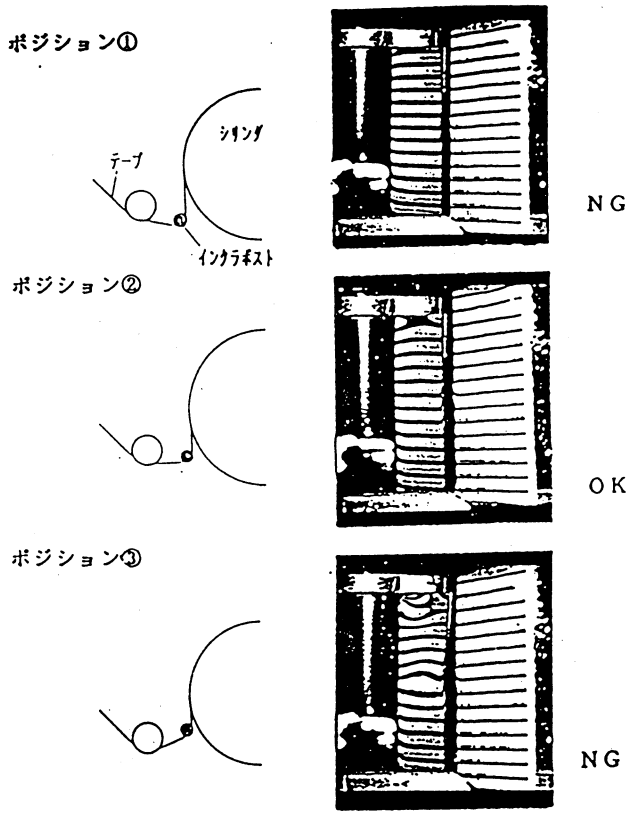
今回、この自動化のネックとなっている調整検査作業における「目視官能判断」に対し、たわみ量を人間の判断によりパターン分類して数量化した。そしてＩＦ－ＴＨＥＮルールをベースとし、ルール後件部が確定値推論であるファジイ推論機構を用いて「目視官能判断に基づくパターン分類認識」の判断論理を構成した。また、判断するための測定量として、テープ表面に投影したパターンのゆがみを画像処理し、特徴量として引き出して使用した。

2. 調整内容の概要

本装置では、テープに投影された縞パターンのゆがみを画像処理で解析することにより規制ポスト付近のテープのたわみを判断している。第１図にテープ調整部の構成を示す。規制状態の調整は、第２図に示すようなインクラポストの角度とたわみの状態との間の相関関係を利用し、視覚認識装置で判定されたたわみの情報をもとに調整アクチュエータでインクラポストの角度を変化させることによって行っている。このとき、たわみのパターンはインクラポストの位置の変化に伴って、順番に変化する。



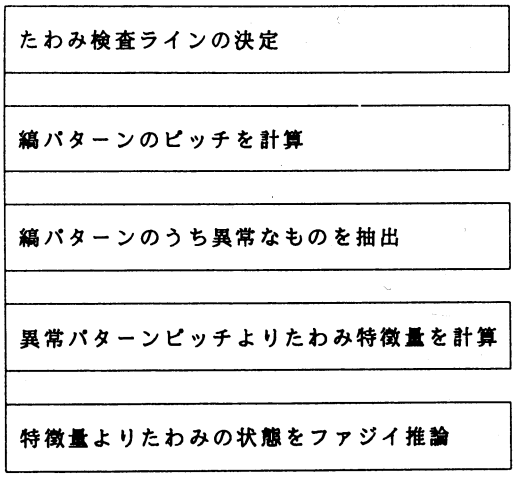
第１図　テープたわみ調整部の構成



第２図　インクラポストとテープのたわみの関係

３．たわみ判断処理の概要

第３図に、たわみ判断のアルゴリズム概要を示す。

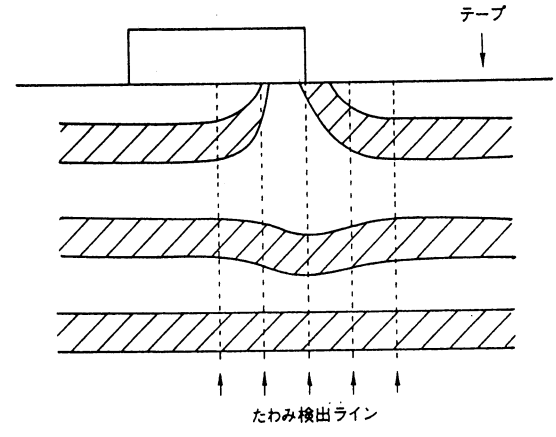


第３図　たわみ判断のアルゴリズム

４．たわみの特徴量抽出

次に、たわみの特徴量抽出アルゴリズムについて説明する。

まず、テープに投影された縞パターンに対し、第４図に示すような検査ライン上で、縞パターンの間隔（ピッチ）を計算する。次に、縞パターンピッチ長が正常であるか、異常であるかを分類する。ここで正常なパターンピッチとは、縞パターンにゆがみがみられないとき（テープにたわみがない状態）のパターンピッチのことである。そして、たわみ状態の分類結果に基づき、異常パターンピッチの２次元的分布より６つのたわみ特徴量を算出する。



第４図　たわみの検出

５．ファジィ推論機構の概要

本装置で用いられているファジィ推論機構の構成を第５図に示す。本装置で用いてるファジィ推論機構の特徴は以下の通りである。

(1) 本機構では、前述の６つのたわみ特徴量を入力し、推論の結果としてたわみの状態を出力する。なお、タワミの状態は人間の判断によりあらかじめ１０種類程度のパターンに分類して数値化しておく。

(2) 本機構は、一般のファジイ制御[1]で用いられているＩＦ－ＴＨＥＮルール形式の推論法を用いている。一般のファジイ制御との違いは、ルール前件部にのみファジイ集合を用いている点である。ルール後件部では、たわみ状態を表現する確定値で推論を行っている。本機構における推論ルールは以下の通りである。

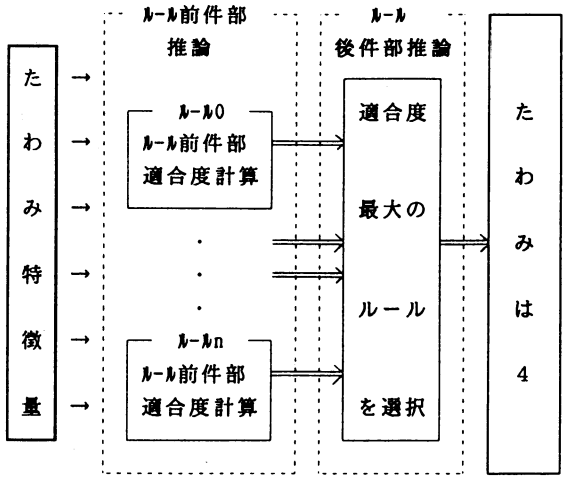
$$\text{IF } X_1 \text{ IS } A_{i1},\ X_2 \text{ IS } A_{i2},\ \cdots,\ X_6 \text{ IS } A_{i6}$$
$$\text{THEN } Y \text{ IS } B_i \quad ;\ i=1,\cdots,n \qquad (1)$$

式(1)において $X_1,\cdots,X_6$ は入力する６個のたわみ特徴量である。$A_{i1},\cdots,A_{i6}$ はルールｉにおける各特徴量に対応するファジイ集合である。Ｙが出力であり B_i はたわみの状態を表す数値である。

(3) ルール前件部に対する入力の適合度 W_i は式(2)により求めている。

$$W_i = A_{i1}(X_1) * A_{i2}(X_2) *,\cdots,\ A_{i6}(X_6) \qquad (2)$$

式(2)において、A(X)はファジイ集合ＡのＸにおけるメンバシップ値であり、＊は min演算である。



第５図　ファジィ推論機構の構成

(4) 第５図に示すように、各ルール適合度の最大値をとるルールに対応するたわみ状態Y_{out}を出力している。つまり、最大適合度W_{max}が

$$W_{max} = W_1 * W_2 *, \cdots, W_n = W_i \quad (3)$$

（＊はｍａｘ演算）のとき

$$Y_{out} = B_i \quad (4)$$

となる。

(5) メンバシップ関数は、ユーザーが任意の形状に定義できる構造とする。これは、たわみ状態定義の変更を柔軟に行うためである。

(6) メンバシップ関数は、人間のたわみ判断結果に基づいて、半自動的に生成できる。

6．「官能判断」におけるファジイ推論

本装置において、上述したような推論機構を用いた理由について述べる。

(1) 判断論理が非常に簡単であるため、生産現場導入の際に微調整が行いやすい。これは非常に重要なことで、「認識率をあと１％向上させたい」といった場合に、判断論理が複雑であったり、ニューラルネットワークのように論理がブラックボックスになっているようなものでは、「現状で正常認識している論理を変えずに、誤認識の場合のみ正常に認識させる論理にしたい」といった調整は非常に困難になると考えられる。

(2) 一般にファジイ制御で用いられる推論は、ルール後件部もファジイ集合を用いている。[1]代表的な方法は、式(1)のB_iをファジイ集合としルールｉの推論結果を

$$Y \text{ IS } W_iB_i \quad \text{ただし } W_iB_i(Y) = W_i * B_i(Y) \quad (5)$$

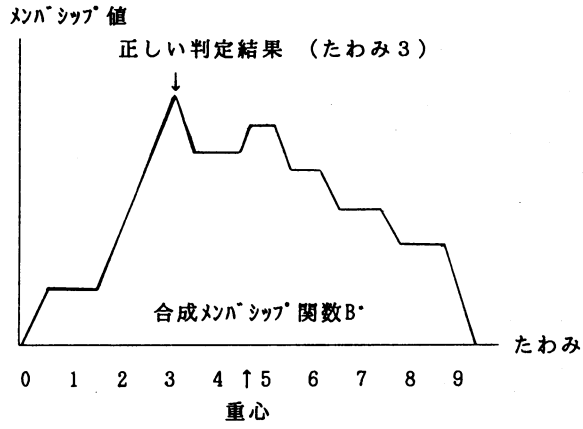
（＊はｍｉｎあるいは乗算）

とし、推論結果Y_{out}は

$$B' = W_1B_1 \cup W_2B_2, \cdots, W_nB_n \quad (6)$$

を作り、B'のメンバシップ関数の重心として求めるといった方法である。

しかし、今回の適用例に対してこの方法を実験的に用いた場合、第６図に示すような誤判定が非常に多かった。



第６図　一般的なファジイ制御による推論

その理由について考察してみる。今回の適用例の出力となるたわみのパターンは調整ポストの位置により順番に変化する。そこで、変化の順番に対応付けてたわみのパターンに数値を割りふっていけば、たわみのパターンを表す数値はその順序に意味のある数字、すなわち順序尺度であるといえる。[2]しかしたわみのパターンを表す数値は、加法性のある比例尺度でも、間隔に意味のある間隔尺度でも、はかることはできない。

前述した一般的なファジイ制御に用いられる方法では、後件部メンバシップ関数を合成してその重心を推論結果としている。このように「重心を計算する」といった積和演算は、出力値がその間隔に意味のある間隔尺度以上の場合に適用しなければ意味が無い。これをむりやり順序尺度ではかった数値に対して行うと、第６図のような結果になると考えられる。

7．メンバシップ関数の教示機構

本装置において最も課題となるのは、最適な推論ルールをどのようにして構築するかという点である。最近、この種の問題に対してニューラルネットワークを用いたオートチューニング手法[3]などが提案されている。しかし、本装置においては推論ルールが非常に簡単である点や、全体のシステムとしての規模の点などから、以下に示すような簡単なメンバシップ関数の半自動生成により、推論ルール構築の効率化を実現している。

本装置におけるメンバシップ関数作成方法は次のように行う。

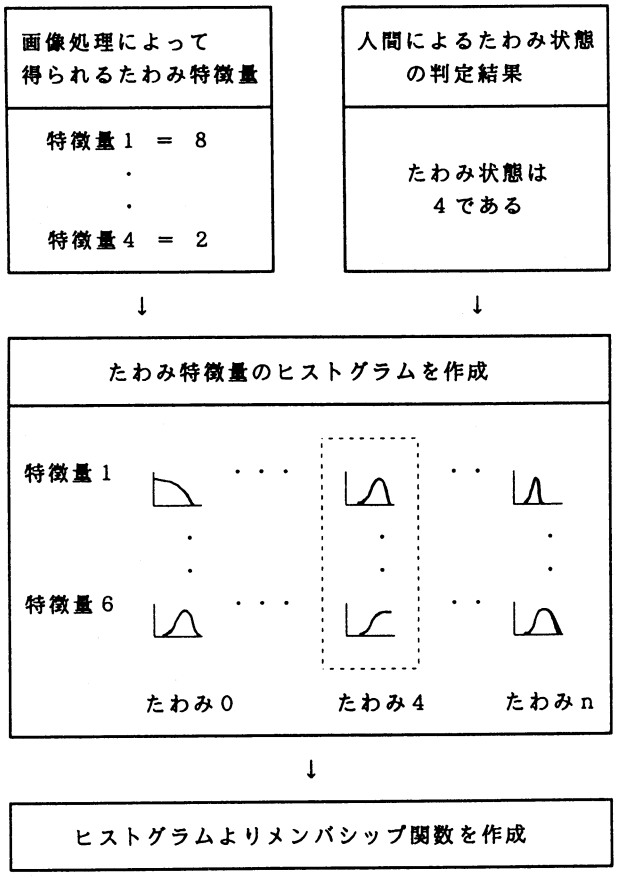
(1) 始めにメンバシップ関数を半自動的に生成し、おおまかなたわみ判断ができることを確認する。

(2) その後、人間が直接メンバシップ関数を編集して微調整を行う。

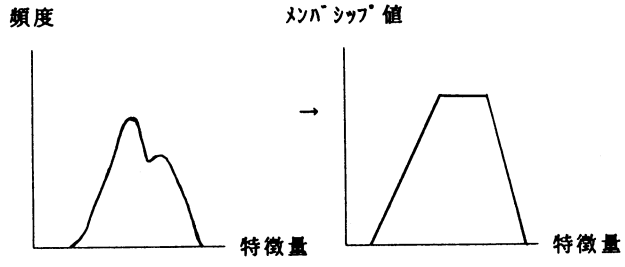
ここでは、（１）のメンバシップ関数を半自動的に生成

するアルゴリズムについて説明する。第７図にメンバシップ関数作成方法を示す。第７図に示すように、画像処理によるたわみ特徴量の計算と人間によるたわみ状態の判断を繰り返すことにより、たわみ特徴量のヒストグラムを作成する。そして、たわみ特徴量のヒストグラムの形状がメンバシップ関数の形状に類似していることを利用して、メンバシップ関数を作成する。その方法であるが第８図に示すようにまずヒストグラムを正規化し、そのヒストグラムの幅を少し広げたような台形型に修正を加えている。

この方法は非常に簡単であるが、各たわみのパターンに対して１０～３０回程度教示を行えば、７～８割程度正常な認識が可能であった。



第７図　メンバシップ関数教示方法



第８図　メンバシップ関数の作成

４．おわりに

本装置は現在ＶＴＲの生産ラインで稼動中であり、作業者とほぼ同等の精度で検査調整が可能であることが確認された。本適用例のような簡易ファジイ推論を用いたパターン認識は、他の分野にも簡単に応用可能であると思われる。

また、このシステムをよく知っている専門家による推論ルールの微調整が必要となる点が課題として残されている。この問題に対して、最適な推論ルールをニューラルネットワークを用いてオートチューニングする手法[3]や、微調整の方法をさらにルール化し簡単にチューニングを行う手法、あるいは、推論の過程が一見してわかるような支援ツールの導入などが必要であると思われる。

参考文献

（１）寺野　寿郎　他：ファジイシステム入門、オーム社（１９８７）
（２）森田　矢次郎　：計測と制御、朝倉書店（１９８４）
（３）林　他：ニューラルネット駆動型ファジイ推論による倒立振子の学習制御、第5回ﾌｧｼﾞｲｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ（１９８９）

問い合わせ先：〒５７１　大阪府門真市松葉町２番７号
松下電器産業（株）　生産技術本部
生産技術研究所　ロボット開発部
鈴　木　　規　之
TEL 06-901-1171 EXT.2391
06-905-4833(ﾀﾞｲﾔﾙｲﾝ)
FAX 06-905-4518

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SB1-3

磁気ディスク装置へのファジィ推論応用

Fuzzy Inference Algorithm applied to a Rigid Disk Drive

吉田　修一　　都倉　光生　　若林　則章
Shuichi Yoshida　Mitsuo Tokura　Noriaki Wakabayashi

松下電器産業（株）　　情報機器研究所
Matsushita Electric Industrial Co.,Ltd.　Information Equipment Research Laboratory

Abstract : We have applied Fuzzy Inference Algorithm to Bang-Bang access control of actuator in a Rigid Magnetic Disk Drive. The algorithm includes "fuzzy test access" and "fuzzy compensation of torque uneven-ness",both of which estimate optimal acceleration period of bang-bang current instruction.

1．はじめに

近年、パーソナルコンピュータの高性能化、ワークステーションの登場などに伴い、磁気ディスク装置（ＨＤＤ）をはじめとする外部記憶装置の小型化、大容量化および高速化が求められている。このうち、高速化は主として、データを読み書きするヘッドが、ある場所から目標の場所へ移動するのに要するアクセス時間によって決まる。さらに、アクセス時間はヘッドを移動するアクチュエータの性能ならびにそのアクセス制御方式によって制限される。

今回ＨＤＤのアクチュエータのアクセス制御にファジィ推論を採用することによって、アクセスの高速化を達成したので報告する。

2．ＨＤＤのアクセス制御方式[1]

従来ＨＤＤのアクセス制御では、アクチュエータの移動速度をフィードバックする閉ループ速度制御方式を用いていた。しかし、この方式では、アクチュエータ本来の性能を十分に引き出すことが困難であり、アクセス時間の短縮に限界があった。（図 1参照）

この方式に代わるものとして、バンバン駆動方式がある。これは、最大加速度で加速・減速する開ループ制御方式であり、アクチュエータの性能を最大限に生かすことができる。この方式の課題は、目標の移動距離に最も適合した加速・減速の切り替えタイミングを如何に設定するかにある。しかし、従来その設定は、主として次のような要因により、容易ではなかった。

《1》アクチュエータコイルのインダクタンス成分による通電流の立ち上がりの遅れ。

《2》アクチュエータ移動時にコイル内に発生する逆起電力による通電流の減少・増大。

《3》アクチュエータの磁気回路構造のアンバランス、加工公差、磁石の着磁むらなどに起因する発生力の位置および駆動方向によるむら。（図 2参照）

《4》アクチュエータ性能の経年変化。

我々は今回、《1》～《4》の問題点を総合的に対策するためにファジィ推論を用いた。

バンバン駆動方式では、目標移動距離に到達した時点で、速度が零になるような加速・減速時間を持つ駆動指令を与える必要がある。実際には、目標地点で速度が零となる（移動距離、バンバン加速時間）の関係は一意に

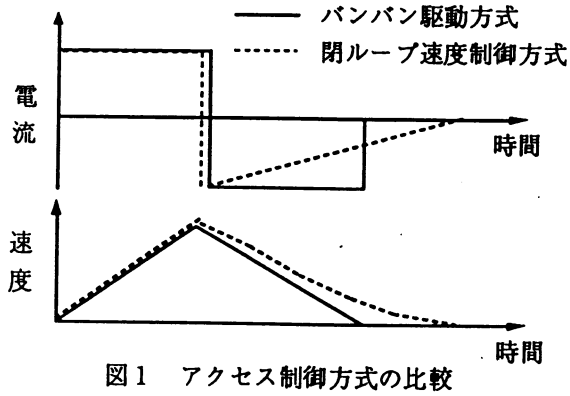


図1　アクセス制御方式の比較

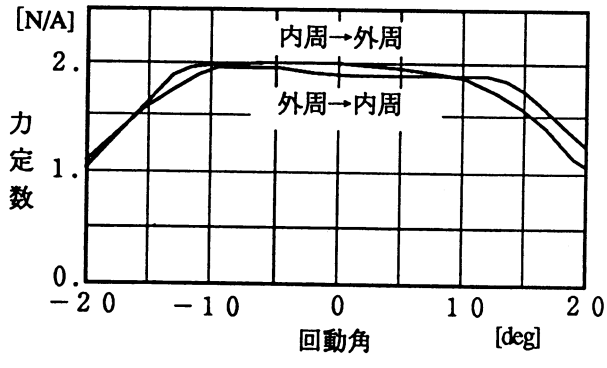


図2　アクチュエータ発生力の位置むら

表1　試行アクセスのファジィ推論ルール

Xr \ δX	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
S	PB	PM PB	PS	ZR	NS	NM NB	NB
M	PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB
B	PB	PM PS	PS	ZR	NS	NM NS	NB

表2　力むら補正のファジィ推論ルール

Ta \ Xs	OUT	MS	MB	B	IN
S	S	ZR	ZR		MB
SB		ZR		NS	
M	M	ZR			M
B	VB	ZR			MB

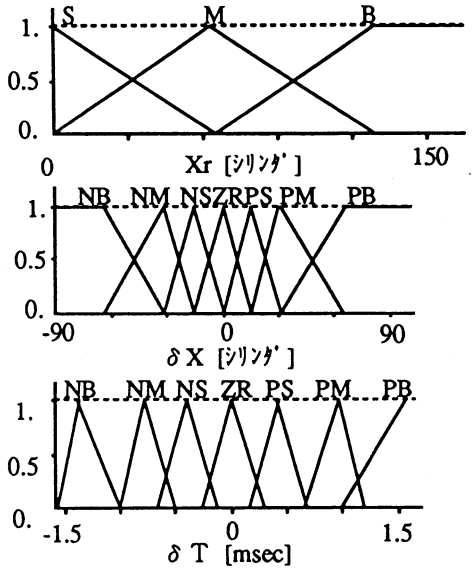


図3　試行アクセスファジィ推論の
メンバーシップ関数

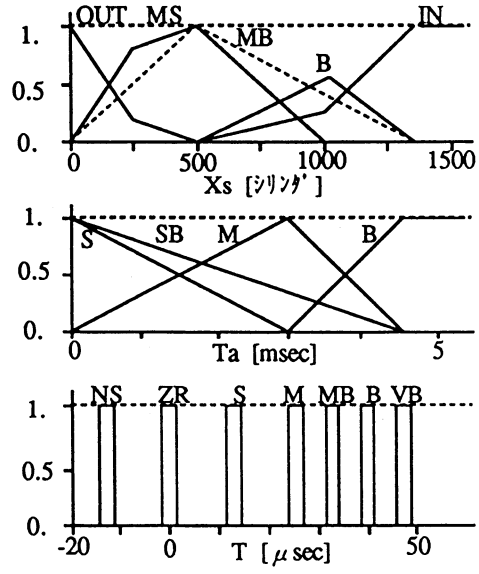


図4　力むら補正ファジィ推論の
メンバーシップ関数

決まるので、駆動指令としては、加速時間のみ与えれば十分である。なお、この場合の減速指令の終了は、速度が零になることで判断する。

3．ファジィアクセス方式

ファジィアクセス方式は、ファジィ試行アクセス方式とファジィ力むら補正方式からなる。このうち、ファジィ試行アクセスでは、アクチュエータ可動子がある位置からスタートした場合の目標移動距離とバンバン加速時間との関係を目標移動距離をある間隔で可変して求め、テーブルとして記憶する。ただし、このときアクチュエータの力むらの範囲はテーブルから除くようにする。このテーブルに基づいて、任意の目標移動距離に対応したバンバン加速時間を補間演算によって求める。その際に、加速する領域でアクチュエータの力むらが存在する場合には、加速時間に補正が必要になる。ファジィ力むら補正方式では、スタート位置と加速区間が力むらの範囲にかかる長さに応じて加速時間を補正する。

なお、通常、ファジィ試行アクセスはＨＤＤの工場出荷時に行ない、ファジィ力むら補正はアクセスの直前に行なう。

3．1　ファジィ試行アクセス方式

目標移動距離Ｘｒとそれに適合したバンバン加速時間Ｔａとの関係は、概ね次式のようになる。

$$Xr \propto Ta^2 \qquad \cdots (1)$$

しかし、２章に示した諸々の要因により、個体差、アクセス方向による違いなどが発生し、この関係を一意に定式化することは困難である。

我々は、上記諸々の要因を含めた形で（１）式の関係を求めるために、ファジィ試行アクセス方式を開発した。

ファジィ試行アクセス方式は、ある目標移動距離Ｘｒに対して、仮にあるバンバン加速時間を与えて試行アクセスし、その時に移動した距離と目標移動距離Ｘｒとの偏差δＸならびに（１）式の概略の傾向を基に、ファジィアルゴリズムの内挿推論の性質[2]を利用して、最も

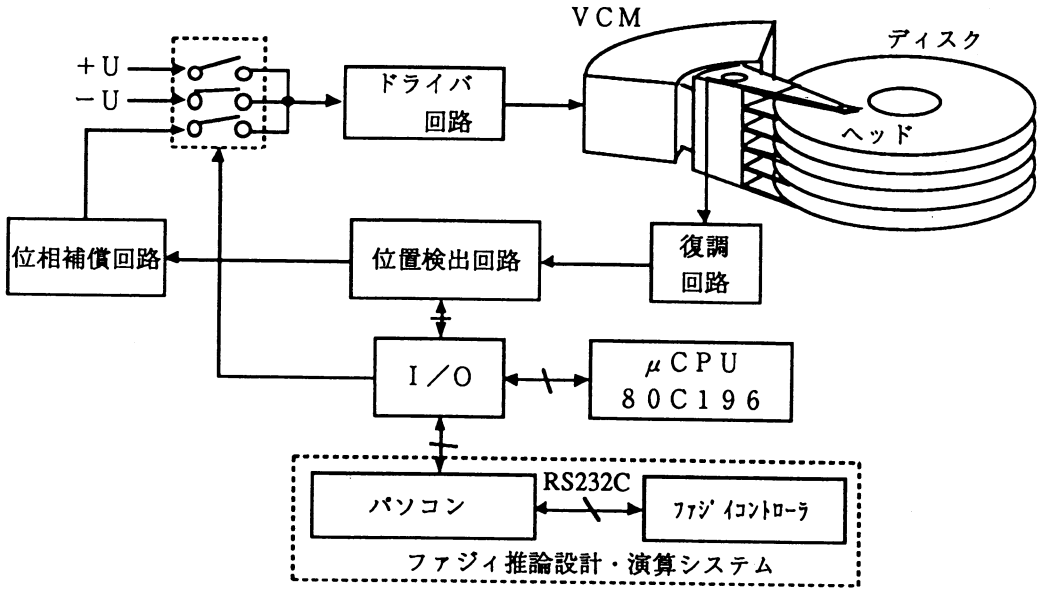


図５　実験システムのブロック図

適合したバンバン加速時間を求めるという方法である。

ファジィ推論のパラメータとしては、ある加速時間Ｔでアクセスした時の目標移動距離Ｘｒと距離偏差δＸを入力ファジィ変数とし、加速時間の補正量δＴを出力ファジィ変数とする。試行アクセスを行ない、表１に示すルールおよび図３に示すメンバーシップ関数に基づいてファジィ推論を実行してδＴを演算し、再度加速時間Ｔ+δＴで試行アクセスする。この手順を繰り返して、目標移動距離Ｘｒに最も適合したバンバン加速時間Ｔａを求めるものである。

なお図３において、シリンダとはＨＤＤのディスク上に磁気的に記録される同心円状のトラックを意味する。ここでは、各シリンダ間の間隔は約１２．５μｍであり、ディスク１枚あたり約１５００のシリンダからなる。

３．２　ファジィ力むら補正方式

アクチュエータの回動角の両端付近の力むら（図２参照）は、個体差によってかなりばらつくことが予想される。また、ばらつきをある範囲内に抑えられたとしても、アクチュエータ可動部とディスクとの相対的な位置関係を厳密に管理しないと、力むらの平坦な部分とアクチュエータの可動範囲を一致させることは難しい。そこで力むらの範囲を試行アクセスの際に予め割り出しておいて、その範囲をバンバン加速領域が含む場合にバンバン加速時間を補正する。その際に、加速する領域が力むらの範囲を含む程度に応じてファジィ推論によって補正量を決定する。

ファジィ推論のパラメータとしては、アクセスのスタート位置Ｘｓ、加速時間Ｔａを入力ファジィ変数、加速時間の補正量δＴを出力ファジィ変数とする。表２に示すルールおよび図４に示すメンバーシップ関数に基づいてファジィ推論を実行してδＴを演算し、加速時間Ｔａに加算する。

４．実験結果

図５は、実験システムのブロック図である。全体のシーケンスのコントロールはマイコン８０Ｃ１９６が行ない、ファジィ推論ルールはパソコン上で設計・チューニングし、ファジィ・コントローラにデータをダウンロードして演算を実行する。

４．１　試行アクセス結果

図６は、ファジィ推論により目標移動距離Ｘｒと加速時間Ｔａとの関係を求めたものである。ルールおよびメンバーシップ関数は表１および図３に示したものを用いた。ルールのチューニングは、繰り返し推論ルーチンが目標移動距離に関係なく３～４回で収束するように試行錯誤的に行なった。

試行アクセスのルーチンは、製造工程の中に割り込むことになるので、所要時間が短いほど望ましい。今回開発したファジィ試行アクセス方式では、繰り返し推論ルーチンがアクセス距離に関係なく３～４回程度で収束する。また、求めるバンバン加速時間の組は、特定のスタート位置について、移動距離をパラメータとして、力む

らを含まない範囲に対して、アクセス方向あたり１組だけ用意すればよいので、全体の試行回数が膨大な数にならない。これは、メモリ容量の削減をも意味する。

４．２　力むら補正の結果

図７は、スタート位置Ｘｓと力むらに対するバンバン加速時間の補正量δＴとの関係を目標移動距離が全シリンダの１／６の場合と全シリンダの１／３の場合について示したものである。図中、実線は予め実験により求めた最適な加速時間の漸近線、プロットはファジィ推論による結果である。実験によって求めたものとファジィ推論による結果とはほぼ一致している。

なお、ルールおよびメンバーシップ関数は、表２および図４に示したものを用いた。また、ルールのチューニングは、力むらの形状を参照して、試行錯誤的に行なった。

図８は、アクセス移動距離と目標移動距離との偏差の頻度分布である。図中、（ａ）は力むらの補正前、（ｂ）は力むらの補正後を示し、全シリンダの１／２４、１／１２、１／６、１／４、１／３の各距離のアクセスをディスクの全体にわたって合計２００回行なった。－１０～－2シリンダに分布していた距離偏差がほとんどなくなって０シリンダ付近の分布が増えており、距離偏差のばらつきが大幅に改善されていることがわかる。

５．まとめ

ＨＤＤのバンバン駆動アクセス制御では、アクチュエータの駆動時の非線形性ならびに未知の動特性のために駆動指令の設定が容易でなかった。ファジィ推論を採用することによって、設計者の経験則に基づいた駆動指令の設定が可能となり、アクセスの高速化を達成した。

即ち、試行アクセスによるバンバン加速時間の推定とアクチュエータの位置による力むらの補正のそれぞれにファジィ推論を用いた。ファジィ試行アクセスでは、全体の試行回数を小さくすることができた。またファジィ力むら補正では、バンバンアクセスの位置偏差のばらつきを大幅に改善することができた。

参考文献

［1］吉田他：平均アクセス１０ｍｓのファジィＨＤＤシーク方式、信学技報、Ｖｏｌ．９０、Ｎｏ．８０、ＭＲ９０－１７、ｐｐ．１～８、１９９０

［2］ザデー：ファジィ理論の誕生とその発展、日本ファジィ学会誌、Ｖｏｌ．２、Ｎｏ．２、ｐｐ．１８２～１９５、Ｍａｙ、１９９０

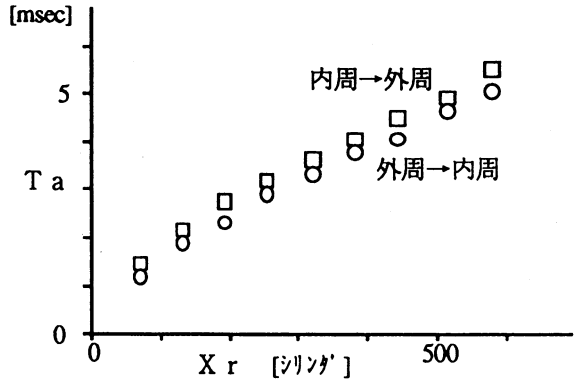


図６　ファジィ試行アクセスの結果

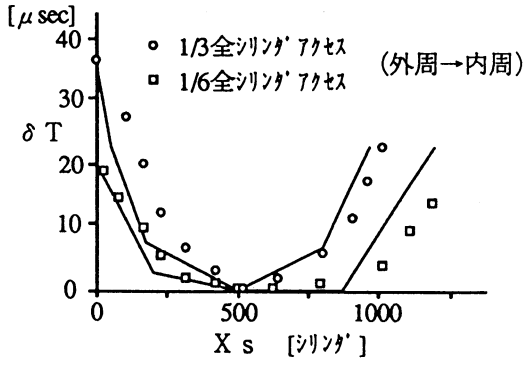


図７　ファジイ推論結果による力むら補正量

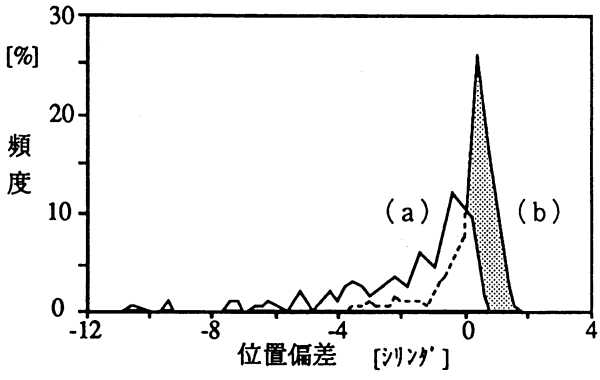


図８　アクセス距離偏差の分布

問い合わせ先：

〒５７１　大阪府門真市大字門真１００６

松下電器産業（株）

情報機器研究所　制御第１開発室

吉田　修一

ＴＥＬ　０６－９０８－１２９１　ＥＸＴ．３３５

ＦＡＸ　０６－９０８－３８０３

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SB2-1

最急降下法によるファジィ推論の自動チューニングと障害物回避への応用

A Self-Tuning Method of Fuzzy Reasoning by Method of Steepest Descent and its Application to Moving Obstacle Avoidance

野村博義、　林勲、　若見昇
Hiroyoshi NOMURA, Isao HAYASHI, Noboru WAKAMI

松下電器産業(株)　中央研究所
Central Research Laboratories,
Matsushita Electric Industrial Co.,Ltd.

ABSTRACT

In this paper, we propose a self-tuning method of fuzzy control rules. The consequent parts of the rules are represented by single-ton. The parameters of fuzzy rules are optimized by method of steepest descent. The parameters of both antecedent parts and consequent parts are tuned at the same time. We apply this method to the design of moving obstacle avoidance of a mobile robot and show the control results by computer simulation.

1. はじめに

最近、ファジィ推論の実用化が進んでいる[1]。ファジィ推論は専門家の持つ定性的な知識をIf…Then～形式の推論ルールとして表現することができる。しかし、専門家の知識を獲得し、制御対象を目標の仕様どうりに動作させるには、推論ルールやメンバーシップ関数のチューニングが必要である。

市橋らは、簡略化したファジィ推論において、推論ルールの後件部を最急降下法を用いてチューニングする手法を提案している[2]。この手法では、前件部はチューニングの対象になっていない。

本論文では、市橋らが提案した手法を拡張し、推論ルールの前件部と後件部の両方を同時にチューニングする手法を提案する。本手法では、簡略化したファジィ推論の前件部のメンバーシップ関数を3角形型とし、形状を決定するパラメータとして中心値と幅を選ぶ。これらのパラメータと後件部の実数値を専門家から得られる入出力データから、最急降下法を用いて自動的にチューニングする。

まず、この手法のアルゴリズムを定式化し、アルゴリズムが収束することを示す。次に、提案した手法の有効性を確認するため、数値例と移動ロボットの障害物回避問題に本手法を適用する。数値例では、本手法のチューニングの高速性を示し、障害物回避問題では生成した推論ルールの汎化能力の高さを示す。

本手法は、専門家から得られる入出力データから自動的に最適な推論ルールを抽出する自動チューニング手法である。

2. 簡略化したファジィ推論

市橋らの簡略化したファジィ推論[3]（以下、簡略化ファジィ推論と略す）を説明する。簡略化ファジィ推論は推論ルールの後件部を実数値で表現する。

入力を$x_1,\ldots,x_m$とし、出力をyとすると、簡略化ファジィ推論の推論ルールは(1)式で表わされる。

Rule i:
If x_1 is A_{i1} and...and x_m is A_{im}
　　Then y is w_i
　　(i=1,...,n)　　(1)

iはルール番号、$A_{i1},\ldots,A_{im}$はメンバーシップ関数、w_iは後件部の実数値である。

前件部のメンバーシップ関数A_{ij}を図1のような2等辺3角形とし、形状を決定するパラメータを中心値a_{ij}と幅b_{ij}とする。

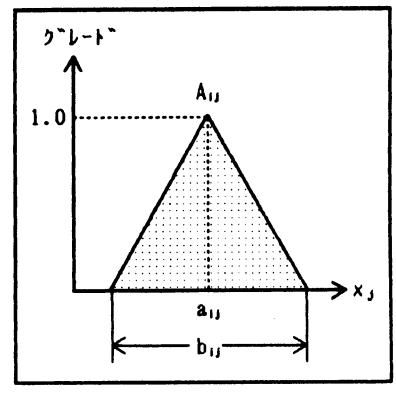


図1.　前件部のメンバーシップ関数

簡略化ファジィ推論の推論結果yは次式で計算する。

$$A_{ij}(x_j) = 1 - \frac{2\cdot|x_j - a_{ij}|}{b_{ij}} \quad ,(j=1,\ldots,m) \qquad (2)$$

$$\mu_i = A_{i1}(x_1)\cdot A_{i2}(x_2)\cdot\ldots\cdot A_{im}(x_m) \qquad (3)$$

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

ただし、μ_iは前件部の適合度を示す。

簡略化ファジィ推論は通常のファジィ推論と比較して良好な制御結果が得られるといわれている[4]。

3. 自動チューニングアルゴリズム

簡略化ファジィ推論の前件部のメンバーシップ関数A_{ij}の中心値a_{ij}、幅b_{ij}と後件部の実数値w_iを専門家から得られる入出力データから自動的にチューニングする。

今、専門家から得られる入出力データを$(x_1^r, \ldots, x_m^r, y^r)$とし、学習則を次のように設定する。

$$w_i(t+1) = w_i(t) + K_w \cdot \mu_i \cdot (y - y^r) \tag{5}$$

$$a_{ij}(t+1) = a_{ij}(t) - K_a \cdot \mu_i \cdot \mathrm{sgn}(x_j^r - a_{ij}(t)) \cdot (y - y^r) \cdot (y - w_i(t)) / b_{ij}(t) \tag{6}$$

$$b_{ij}(t+1) = b_{ij}(t) + K_b \cdot \mu_i \cdot (y - y^r) \cdot (y - w_i(t)) \cdot |x_j^r - a_{ij}(t)| / b_{ij}^2(t) \tag{7}$$

(5)～(7)式はt+1回目のチューニングパラメータの値を示し、sgn(z)は、zに対する正負の符号を示す。また、K_w, K_a, K_bは学習係数であり、任意に設定する。

具体的な学習手順を以下に示す。

[Step 1]
推論ルールの初期設定を行う。前件部のメンバーシップ関数A_{ij}の中心値a_{ij}の初期値は、入力変数の全体集合を等分割するように設定する。幅b_{ij}は、各メンバーシップ関数の中心値の間隔よりも大きくし、メンバーシップ関数が重なり合うように設定する。

[Step 2]
入出力データ$(x_{1d}^r, \ldots, x_{md}^r, y_d^r)$を読み込む。ただし、dはデータ番号を示す。

[Step 3]
(2)～(4)式を用いて、入力データに対してファジィ推論を行い、各推論ルールの適合度μ_{id}と推論結果y_dを求める。

[Step 4]
推論結果y_d、適合度μ_{id}、出力データy_d^rから(5)式を用いて後件部の実数値w_iを更新する。

[Step 5]
[Step 3]と同様に、再度ファジィ推論を行う。

[Step 6]
推論結果y_d、適合度μ_{id}、出力データy_d^r、および[Step 4]で更新した後件部の実数値w_iから、(6),(7)式を用いて前件部のメンバーシップ関数の中心値a_{ij}、幅b_{ij}を更新する。

[Step 7]
(8)式により推論誤差D(t+1)を計算し、その変化$\varepsilon = D(t+1) - D(t)$が微小量になるまで[Step 2]～[Step 6]を繰り返す。

$$D(t+1) = \frac{1}{d} \sum_{k=1}^{d} \frac{|y_k - y_k^r|}{y_k} \tag{8}$$

4. アルゴリズムの収束性

後件部実数値w_iの学習則(5)式は市橋らによって提案された手法[2]と同じであり、その収束性はすでに証明されている。

以下、前件部の学習則(6),(7)式について、その収束性を示す。

簡略化ファジィ推論をネットワーク構造で図示すると図2のように表される。

図2では、○は演算ユニットを、□は結合係数を表している。出力層の演算ユニットは(4)式の重心演算に対応しており、中間層の演算ユニットは(3)式の適合度演算に対応している。また、出力層の結合係数は後件部の実数値w_iを示し、中間層の結合係数は前件部のメンバーシップ関数A_{ij}を示す。

図2の構成と同様なファジィニューロンの構成が山川らによって議論されている[5]。

□で表した後件部の実数値と前件部のメンバーシップ関数を、ニューラルネットの学習則であるデルタルール[6]と同様に最急降下法を用いてチューニングする。

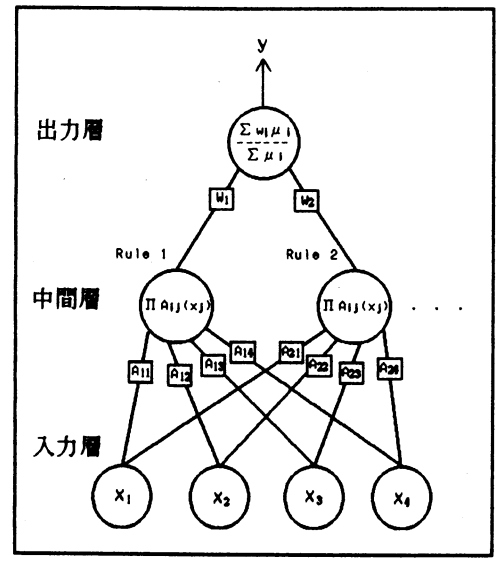


図2. 簡略化ファジィ推論の構成図

今、チューニングを1件の入出力データが与えられるごとに行う逐次型の学習であるとする。逐次型の学習は(9)式の評価関数Eの最小化問題として定式化できることが知られている[2)7)]。

$$E = \frac{1}{2} (y^r - y)^2 \tag{9}$$

このとき、評価関数Eの最も減少する方向である最急降下方向は$(-\partial E/\partial a_{ij}, -\partial E/\partial b_{ij})$となる。このベクトルを構成する$\partial E/\partial a_{ij}$, $\partial E/\partial b_{ij}$を(2)～(4),(9)式からそれぞれ計算する。

$$\frac{\partial E}{\partial a_{ij}} = \mathrm{sgn}(x_j^r - a_{ij}) \cdot (y - y^r) \cdot (y - w_i) \cdot \left(\frac{1}{\sum_{p=1}^{n} \mu_p}\right) \cdot \frac{2}{b_{ij}} \cdot \left(\prod_{\substack{q=1 \\ q \neq i}}^{m} A_{iq}(x_q^r)\right) \tag{10}$$

$$\frac{\partial E}{\partial b_{ij}} = -(y - y^r) \cdot (y - w_i) \cdot \left(\frac{2}{\sum_{p=1}^{n} \mu_p}\right) \cdot \left(\prod_{\substack{q=1 \\ q \neq i}}^{m} A_{iq}(x_q^r)\right) \cdot \left(\frac{|x_j^r - a_{ij}|}{b_{ij}^2}\right) \tag{11}$$

となる。
(10),(11)式を簡略化して、

$$\frac{\partial E}{\partial a_{ij}} \fallingdotseq K_a' \cdot \mu_i \cdot \mathrm{sgn}(x_j^r - a_{ij}) \cdot (y - y^r) \cdot (y - w_i) / b_{ij} \tag{12}$$

$$\frac{\partial E}{\partial b_{ij}} \fallingdotseq -K_b' \cdot \mu_i \cdot (y - y^r) \cdot (y - w_i) \cdot |x_j^r - a_{ij}| / b_{ij}^2 \tag{13}$$

とする。ただし、K_a', K_b'は定数である。

(12),(13)式より(6),(7)式の学習則が得られる。これらのことより、(5),(6)式の学習則は評価関数Eが最も小さくなる方向を探索しながらチューニングパラメータを変化させることを意味する。したがって、学習係数K_a, K_b, K_wを適当に定めることにより評価関数Eは極小化される。

5. 数値例

本手法の有効性を示すために、簡単な例題として、次のような3入力1出力のシステムを考える[8]。

$$y = (1 + x_1^{0.5} + x_2^{-1} + x_3^{-1.5})^2 \qquad (14)$$

(14)式の入力変数(x_1, x_2, x_3, x_4)を変化させて、入出力データを作成し、本手法により同定を行った。

表1に入出力データとチューニング後の推論ルールによる推論結果を示す。

表1 推論結果

同定用データ				評価用データ			
	入出力データ		推論結果		入出力データ		推論結果
No	x_1 x_2 x_3 x_4	y'	y	No	x_1 x_2 x_3 x_4	y'	y
1	1 3 1 1	11.110	11.094	21	1 1 5 1	9.545	9.615
2	1 5 2 1	6.521	6.533	22	1 3 4 1	6.043	6.191
3	1 1 3 5	10.190	10.196	23	1 5 3 5	5.724	5.802
4	1 3 4 5	6.043	6.163	24	1 1 2 5	11.250	10.843
5	1 5 5 1	5.242	5.288	25	1 3 1 1	11.110	11.090
6	5 1 4 1	19.020	18.988	26	5 5 2 1	14.360	14.371
7	5 3 3 5	14.150	14.152	27	5 1 3 5	19.610	19.256
8	5 5 2 5	14.360	14.371	28	5 3 4 5	13.650	13.641
9	5 1 1 1	27.420	27.378	29	5 5 5 1	12.430	12.610
10	5 3 2 1	15.390	15.381	30	5 1 4 1	19.020	18.979
11	1 5 3 5	5.724	5.740	31	1 3 3 5	6.380	7.848
12	1 1 4 5	9.766	9.745	32	1 5 2 5	6.521	6.527
13	1 3 5 1	5.870	5.775	33	1 1 1 1	16.000	11.475
14	1 5 4 1	5.406	5.339	34	1 3 2 1	7.219	9.788
15	1 1 3 5	10.190	10.201	35	1 5 3 5	5.724	5.802
16	5 3 2 5	15.390	15.383	36	5 1 4 5	19.020	18.979
17	5 5 1 1	19.680	19.685	37	5 3 5 1	13.390	13.409
18	5 1 2 1	21.060	21.130	38	5 5 4 1	12.680	12.670
19	5 3 3 5	14.150	14.152	39	5 1 3 5	19.610	19.256
20	5 5 4 5	12.680	12.670	40	5 3 2 5	15.390	15.383

データ番号1-20はチューニングに用いた同定用データであり、データ番号21-40はチューニングに用いない評価用データである。

次に、本手法と他手法との比較を行う。他手法として、GMDH、林らの提案したニューラルネット駆動型ファジィ推論[9]を選ぶ。評価指標は、推論誤差D、学習回数、学習時間とする。表2に結果を示す。

表2 他手法との比較

	推論誤差		学習回数	学習時間
	同定用データ	評価用データ		
GMDH	0.047	0.057	−	−
ニューラルネット駆動型ファジィ推論	0.0047	0.036	前 5000 後20000	142分
本手法	0.0038	0.051	25	7分

同定用データに対する本手法の推論誤差は、GMDH、ニューラルネット駆動型ファジィ推論と比較して小さい。本手法を用いて生成された推論ルールが入出力データの関係をよく表しているのがわかる。

一方、評価データに関する推論誤差は、GMDHを用いた手法よりは値が小さくなっているが、ニューラルネット駆動型ファジィ推論より値が大きい。これは、推論ルールが学習データの局所的な特徴までもよく表現し過ぎており、評価データを十分に表現できないためと考える。

学習回数、学習時間は共に、ニューラルネット駆動型ファジィ推論より、小さくなっている。学習時間では20倍程度の差がみられ、短時間での学習が可能である。なお、計算に使用したコンピュータはPanacom M700 (80286 10MHz)、使用言語はC言語である。

6. 移動ロボットの障害物回避問題への応用

本手法を動的障害物の回避問題へ応用する。

目的は、移動ロボットに人間のような柔軟な状況判断能力をもたせ、動的障害物を回避し目標点に到達する制御を行なわせることである。この問題により、本手法の汎化能力を確認する。

図3は、この障害物回避問題の入力変数を図示したものである。

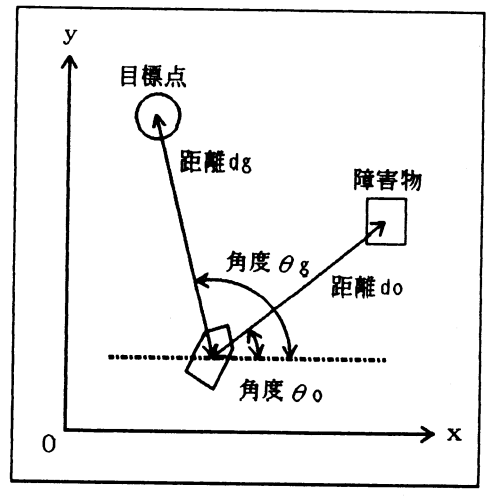


図3. 移動ロボットの障害物回避モデル

この制御問題の入力と出力を以下に示す。

入力: 移動ロボットと障害物の相対距離d_o[m]
　　移動ロボットと障害物の相対角度θ_o[deg]
　　移動ロボットと目標点の相対距離d_g[m]
　　移動ロボットと目標点の相対角度θ_g[deg]
出力: 移動ロボットのハンドル角θ_s[deg]

障害物回避問題の前提条件として、以下の条件を仮定する。

1)移動ロボットは障害物までの相対距離d_oと相対角度θ_oを検知する。
2)移動ロボットは1度に複数個の障害物に遭遇しない。
3)移動ロボットのハンドル角のみを制御し、駆動速度は制御しない。
4)移動ロボットのダイナミックスは考慮しない。
5)障害物は移動するが、目標点は固定とする。

次の、手順に従いシミュレーション実験を行った。

1) 実験者は、手動コントローラを用いて移動ロボットのハンドル角を制御し、障害物を回避させる。この時、入力値(d_g、θ_g、d_o、θ_o)と実験者が入力したハンドル角θ_sを一定の時間間隔で取り込み入出力データとする。

2) 障害物の2つの動作パターンに対して、回避動作を手動コントローラで教示し、66個のデータを得た。

図3に教示した移動ロボットの軌跡を示す。図中の○は移動ロボットを、□は障害物を示す。

3) 1つの入力変数に対して、5つのメンバーシップ関

数を設定した。入力変数は4個であり、全体で推論ルールは625個とした。
4) (5)～(7)式を用いてファジィ推論ルールのチューニングを行う。ただし、学習回数は１０回とした。
5) チューニングされた推論ルールを用いて自動的に障害物回避を行わせる。いくつかの障害物の移動パターンに対する移動ロボットの走行パターンを図4に示す。

図4の(a')(b')は、教示したときと同じ移動パターンで障害物を移動させた時の結果である。教示した移動パターン(a)(b)より、なめらかな軌道で移動ロボットが動いていることがわかる。図の(c')(d')(e')は、教示した移動パターンとは異なった移動パターンで障害物を動かした場合の結果である。(c')は、教示したパターンよりも急な角度で障害物を移動ロボットに近づけた場合、(d')は逆になだらかな角度で近づけた場合、(e')は逆方向から急な角度で近づけた場合である。これらの場合にも移動ロボットは障害物に衝突することなく回避動作ができることがわかる。これらの結果から、本手法は高い汎化能力を持つといえる。

6. おわりに

本論文では、ファジィ推論の新しい自動チューニング手法を提案した。本手法は、簡略化ファジィ推論の前件部および後件部を同時にチューニングできる。本手法の有効性を確かめるために、数値例と障害物回避問題に適用した。その結果、本手法は非線形な対象に対してもチューニングが短時間で可能であること、および高い汎化能力を持つことが明らかになった。

参考文献

1) 山崎、菅野 : ファジィ制御, システムと制御, vol.28, No.7, 442/446, 1984
2) 市橋: システム制御情報チュートリアル講座'89 制御工学へのガイドライン －最新の理論のプロフィルと適用の実際－, pp.151-178, (1989)
3) 市橋、田中 : PIDとFuzzyのハイブリッド型コントローラー, 第4回ファジィシステムシンポシウム講演論文集, pp.97-102, (1988)
4) 水本 : ファジィ推論に対する改善法 (II) ,第4回ファジィシステムシンポシウム講演論文集, pp.91-96, (1988)
5) T.Yamakawa: A membership function circuit and its applications to a singleton-consequent fuzzy logic controller and a fuzzy neuron, 第5回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.13-18, (1989)
6) Rumelhurt,D.E., Hinton,G.E., Willoams,R.J. : Learning internal representations by error propagation, Parallel distributed processing, pp.318-362, (1986)
7) S.Amari: A theory of adaptive pattern classifiers, IEEE Trans.EC-16, pp.279-307, (1967)
8) 菅野 : システムのファジィモデリング,システムと制御チュートリアル講座'87 制御工学へのガイドライン, pp.79-98, (1987)
9) 林、高木 : 神経回路モデルによるファジィ推論の定式化, 第4回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.55-60, (1988)
10) 前田、竹垣 : ファジィ制御による移動ロボットの障害物回避, 計測自動制御学会関西支部 シンポジウム あいまい情報処理と知的システム制御講演論文集, pp.51-56, (1988)

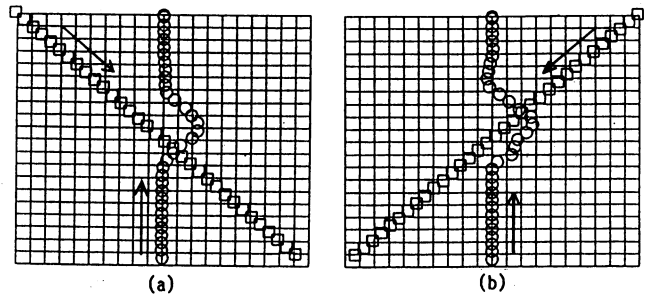


図3. 教示した移動ロボットの軌跡

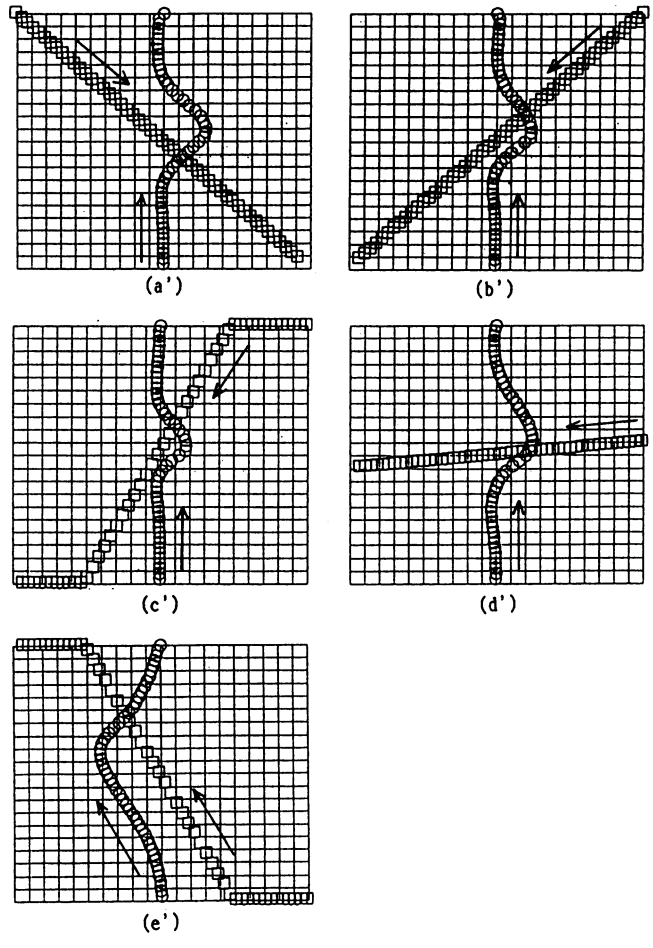


図4. チューニング後の推論ルールによる制御結果

[問い合わせ先]
〒５７０ 大阪府 守口市 八雲中町 3－15
松下電器産業(株) 中央研究所
知能科学第6研究室
野村 博義
TEL (06)906-4849
FAX (06)906-0177

SB2-2

ファジイISMにおける推移的結合の考察

Study of Transitive Coupling in Fuzzy ISM

若林　高明　　大内　東
Takaaki WAKABAYASHI　Azuma OHUCHI
北海道大学工学部
Faculty of Engineering, HOKKAIDO University

Abstruct:Transitive Coupling in fuzzy ISM is a procedure of interconnecting two multilevel fuzzy subsystems defined by fuzzy matrices A and B and a common, transitive, fuzzy relation to form a fuzzy system model by matrix M.

In this paper, we study the implication structures for the unknown interconnection matrices X and Y.

1．はじめに

ファジイＩＳＭにおける推移的結合とは「共通な推移的ファジイ二項関係を有する二つの多階層ファジイサブシステムを一つのシステムに結合する手続き」である．この問題は二つのサブファジイシステムを推移的ファジイ行列AとBで表わし，結合したファジイシステムをMで表わすと，ファジイ可到達行列（正方，反射的かつ推移的ファジイ行列）

$$M=\begin{bmatrix} A & X \\ Y & B \end{bmatrix} \qquad (1)$$

を求める問題となる．ここで，AとBは既知のファジイ可到達行列であり，次数をそれぞれｓともとする．XとYは未知のファジイ行列であり，相互連関行列という．XとYをMがファジイ可到達行列となるように区間［0，1］内の値で埋めることがファジイＩＳＭにおける推移的結合の目的である．推移的結合は元来，システム構造化技法のＩＳＭにおける具象化過程の第二フェーズの一般化であるが，以下の様な状況に相当し，複雑なシステムの構造化を行なう場合において重要である．　構造化の対象となるシステムの構成要素が多く一度に全要素を対象として構造化を行うのが困難，或いは幾つかの専門の異なるグループがそれぞれ自分の関係する要素集合について構造化を行う，等の理由でシステム構成要素を部分集合に分割して部分構造化を行い，結果をまとめる場合である．通常の（二値行列を用いた）ＩＳＭにおける推移的結合の理論は，Warfield[1]，大内ら[2]によって提案されているが，本稿ではファジイＩＳＭにおける推移的結合の理論について考察する．

2．諸定義・定理

本論文で使用する諸定義・諸定理について述べる．
（詳細は文献3)を参照）

・$S=\{s_1, s_2, \cdots, s_n\}$ ：システム要素集合．
・N：システム要素集合Sに対応する添字集合．
・ファジイ行列M：関係Rの強さの度合を表わす数値を要素とする行列．すべてのi, jに対し，$0 \leq m_{ij} \leq 1$
・ファジイ行列Mに対して反射性，推移性を次のように定義する．

反射性：$m_{ii}=1$，for all i.

推移性：$m_{ij}=\max_k [\min (m_{ik}, m_{kj})]$
for all i, j, k

・ファジイ行列A，Bに対して次の演算を定義する．

$$(A+B)_{ij}=\max (a_{ij}, b_{ij}) \qquad (2)$$

$$(AB)_{ij}=\max_k [\min (a_{ik}, b_{kj})] \qquad (3)$$

$$(A \textcircled{@} B)_{ij}=\min_k (a_{ik} \alpha b_{kj}) \qquad (4)$$

但し　$a \alpha b = \begin{cases} 1 : a \leq b \\ b : a > b \end{cases}$

$$\overline{A}_{ij}=1-a_{ij} \qquad (5)$$

［定理］ファジイ行列Mが（ファジイ）可到達行列であるための必要十分条件は

$$M=M+I \qquad (6a)$$

$$M^2=M \qquad (6b)$$

3．推論構造の考察

（１）式において，行列Mは可到達行列でなければならないから，部分行列A，B，X，Yは以下の条件を満たさなければならない．

$$A^2+XY=A \qquad (7a)$$

$$AX+XB=X \qquad (7b)$$

$$YA+BY=Y \qquad (7c)$$

$$YX+B^2=B \qquad (7d)$$

A，Bが可到達であることより（７）は

$$XY \leq A \qquad (8a)$$

$$AX=X \qquad (8b)$$

$$XB=X \qquad (8c)$$

$$YA=Y \qquad (8d)$$

$$BY=Y \qquad (8e)$$
$$YX\leq B \qquad (8f)$$

となる．

・Self implication

(8b), (8c)両式より

$$AXB=X \qquad (9a)$$

(8d), (8e)両式より

$$BYA=Y \qquad (9b)$$

行列の列展開，行展開，クロネッカー積⊗を用いると(9)式はそれぞれ

$$c(X)=(B^T\otimes A)\,c(X) \qquad (10a)$$
$$r^T(Y)=(B\otimes A^T)\,r^T(Y) \qquad (10b)$$

とかける[4]。但し，$c(X)$，$r(Y)$はそれぞれ，Xの列を縦に，Yの行を横に並べたものである．即ち，Xの第i列をc_iとかくと，

$$c(X)=(c_1^T,\ c_2^T,\ \cdots,\ c_t^T)^T,$$

Yの第i行をr_iとかけば，

$$r(Y)=(r_1,\ r_2,\ \cdots,\ r_t)$$

である．(10a)，(10b)をそれぞれ

$$\mathbf{x}=P\mathbf{x} \qquad (11a)$$
$$\mathbf{y}=Q\mathbf{y} \qquad (11b)$$

とかく．ここで，Xの自己含意行列Pの添字$(c_i,\ c_j)^T$の部分ブロック$P^{i,j}$は，A，Bが反射的行列であることから以下の様になる．

$$P^{i,j}=\delta(i,j)A+\bar{\delta}(i,j)\,b_{ji}A \qquad (12)$$

また，$Q=P^T$である。なお，既知の行列A，Bから自己含意行列P，Qを効率的に生成できるアルゴリズムが提案されている[5]．Pの生成アルゴリズムを以下に示す．

（1） 行列Bの転置行列B^Tを求める．
（2） B^Tの対角要素にAを代入する．
（3） B^Tの非対角要素には，その要素とAとの積を代入する．

・Cross implication

(8a), (8f)を行展開，列展開，演算子ⓠを用いてまとめると次のいずれかの形となる[6]．

$$\mathbf{y}^T\leq\mathbf{x}^T\textcircled{q}F \qquad (13a)$$
$$\mathbf{x}^T\leq\mathbf{y}^T\textcircled{q}F^T \qquad (13b)$$

但しFは添字$(c_i,\ r_j)$の部分ブロック$F^{i,j}$が以下で表わされるｓｔ次の正方行列である．

$$F^{i,j}=\delta(i,j)A+\bar{\delta}(i,j)\,(b_{ji}I+\bar{I}) \qquad (14)$$

(14)式の導出は多少複雑であるが，これにより行列Fの効率的生成アルゴリズムを提案することができる．

・Fの生成アルゴリズム

（1） 行列Bの転置行列B^Tを求める．
（2） B^Tの対角要素にAを代入する．
（3） B^Tの非対角要素には，その要素を対角成分とし，非対角成分が1の行列（その要素をIに乗じたものと$\bar{I}$との和）を代入する．

・未知要素の値の決定

(11)式に加えて，(13a), (13b)式のうちいずれか一方を用いてXとYの要素の値を決定する．以下の二通りの決定方法が考えられる．

（Ⅰ）X優先の決定法
①(11a)式のPにおいて最も非零要素の多い行に対応する$\mathbf{x}$の要素の値を決める．
②(11a)式を用いて他の$\mathbf{x}$の要素の値を決める．
③(13a)式を用いて$\mathbf{y}$の各要素の取り得る値の範囲を決める．
④(11b)式を満たすように$\mathbf{y}$の各要素の値を決める．

（Ⅱ）Y優先の決定法
①(11b)式のQにおいて，最も非零要素の多い行に対応する$\mathbf{y}$の要素の値を決める．
②(11b)式を用いて他の$\mathbf{y}$の要素の値を決める．
③(13b)式を用いて$\mathbf{x}$の各要素の取り得る値の範囲を決める．
④(11a)式を満たすように$\mathbf{x}$の各要素の値を決める．

手続き①，②において決定した$\mathbf{x}$（$\mathbf{y}$）に対して手続き③では$\mathbf{y}$（$\mathbf{x}$）の値の範囲がy_i（x_i）$\in[0,\ \beta]$（$0\leq\beta\leq1$）のように決定するので，この範囲内で④により$\mathbf{y}$（$\mathbf{x}$）の各要素を決定する．$\mathbf{x}=0$または$\mathbf{y}=0$は(11)(13)を満たすので，$\mathbf{x}$，$\mathbf{y}$の組は，必ず解を持つ．

以上の決定法においては，X，Yのうち一方の要素の値をすべて決定してから他方の要素の値を決定するので，場合によっては，X，Yいずれかの各要素の取り得る値の範囲に偏りを生じてしまう．そこで，（Ⅰ）と（Ⅱ）の中庸を行く方法を考える．

（Ⅲ）①(11a)式のP（(11b)式のQ）においてもっとも非零要素の多い行に対応するx_i（y_i）の要素の値を決める．
②(11)(13)式を用い，x_i（y_i）から他の要素を含意する．
③②において，いくつかの要素が既知となったら，P（Q）において対応する行の非零要素の数の多いものから順に②と同様にして，更に他の要素を含意する．(11)(13)式を用いて新たに含意できなくなった場合は，残りの要素のうち，(11a)式のP（(11b)式のQ）において，もっとも非零要素の多い行に対応するx_j（y_j）の値を与え，他の要素を含意する．
④すべての$\mathbf{x}$，$\mathbf{y}$の要素が既知となった時点で手続きを終了する．

以上の手続きにおいては，必ずしも各要素の値が一意に決まるわけではない．各要素はその取り得る値の範囲のうち任意の値をとることができるので，仮にある値を代入することにより，決定の効率化を図ることができる．

他に，決定に当たって留意すべきことは，P，Qにおいて非零要素の多い行に対応する要素にはなるべく大き

い値を与え，非零要素の多い列に対応する要素にはなるべく小さい値を与えるということである．さもなければ，それらの要素が他の要素に及ぼす制約が大きくなってしまうからである．

4．特殊な場合

(1)式で$B=1$の場合を推移的拡大(Transitive bordering)という．これは，構造化の過程を要素が一つの場合から始めて，一つずつ要素を付加する場合や，構造化が終了した後に更に一つの要素を付加する必要が生じた場合に相当する．

この場合X，Yはそれぞれs次の列ベクトル，行ベクトルとなるので，これらを$\mathbf{x}$，$\mathbf{y}^T$とかく．

(8)式はそれぞれ

$$\mathbf{x}\mathbf{y}^T \leqq A \qquad (15a)$$

$$A\mathbf{x} = \mathbf{x} \qquad (15b)$$

$$\mathbf{y}^T A = \mathbf{y}^T \qquad (15c)$$

となる．（$B=1$であるから(8c)(8e)(8f)は恒等的に成立する）(15a)式を演算$\textcircled{@}$を用いて書き換えると

$$\mathbf{y}^T \leqq \mathbf{x}^T \textcircled{@} A \qquad (16a)$$

$$\mathbf{x}^T \leqq \mathbf{y}^T \textcircled{@} A^T \qquad (16b)$$

また，(15c)式の転置をとれば，

$$A\mathbf{y} = \mathbf{y} \qquad (17)$$

よって，一般の場合の(11)(13)式において，$P=A$，$Q=A^T$，$F=A$とおいて$\mathbf{x}$，$\mathbf{y}$を決定することができる．

5．構造の曖昧さ

一般に(1)式を満たすX，Yは無数にあるので，どういう基準で最適なX，Yを決定するかが問題となる．

そこで，ファジイ行列で表わされたシステムの構造の曖昧さの尺度としてファジイエントロピーを定義する[7]．

システム要素集合$S=\{s_1, s_2, \cdots, s_n\}$で添字づけられたファジイ行列$M$で表わされるシステムに対し，そのファジイエントロピーとして

$$d(M)=\frac{1}{n^2}\sum_{i\in N}\sum_{j\in N} S(m_{ij}) \qquad (18)$$

なる量を定義する．

ここで

$$S(x)=-x\log_2 x-(1-x)\log_2(1-x)$$

（シャノン関数）である．

$d(M)$はシステムMの構造の曖昧さの尺度となる．

なぜなら，

［1］$d(M)=0$（曖昧さがない）となるのは，すべてのm_{ij}に対し，$m_{ij}=0$または1の場合に限る．

［2］$d(M)$が最大値（この場合は1）をとるのは，すべてのm_{ij}に対し，$m_{ij}=0.5$の場合に限る．

［3］システムM*がシステムMに対し，

$m^*_{ij}\geqq m_{ij}\cdots m_{ij}\geqq 0.5$の場合

$m^*_{ij}\leqq m_{ij}\cdots m_{ij}\leqq 0.5$の場合

を満たすならば

$$d(M)\geqq d(M^*)$$

という条件を満たすからである．

(18)式と同様にして(1)式を満たすX，Yに対し，

$$d(X)=\frac{1}{s\ t}\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t} S(x_{ij})$$

$$d(Y)=\frac{1}{s\ t}\sum_{i=1}^{t}\sum_{j=1}^{s} S(y_{ij})$$

というエントロピーが定義される．

相互連関行列X，Yを決定する際，エントロピーが小さくなるように，即ち，システムの構造の曖昧さの度合を低くすることは，決定の一つの指針となろう．

6．例題

Mが以下のように与えられているとする．

$$M=\begin{bmatrix} 1 & 0.4 & 0.8 & x_1 & x_4 & x_7 \\ 0 & 1 & 0.2 & x_2 & x_5 & x_8 \\ 0 & 0 & 1 & x_3 & x_6 & x_9 \\ y_1 & y_2 & y_3 & 1 & 0.3 & 0.7 \\ y_4 & y_5 & y_6 & 0 & 1 & 0.5 \\ y_7 & y_8 & y_9 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

このとき，3章に示したアルゴリズムによりP，Fを生成すると

$$P=\begin{bmatrix} 1 & 0.4 & 0.8 & & & & & & \\ 0 & 1 & 0.2 & & \phi & & & \phi & \\ 0 & 0 & 1 & & & & & & \\ 0.3 & 0.3 & 0.3 & 1 & 0.4 & 0.8 & & & \\ 0 & 0.3 & 0.2 & 0 & 1 & 0.2 & & \phi & \\ 0 & 0 & 0.3 & 0 & 0 & 1 & & & \\ 0.7 & 0.4 & 0.7 & 0.5 & 0.4 & 0.5 & 1 & 0.4 & 0.8 \\ 0 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0.5 & 0.2 & 0 & 1 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$F=\begin{bmatrix} 1 & 0.4 & 0.8 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0.2 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0.3 & 1 & 1 & 1 & 0.4 & 0.8 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0.3 & 1 & 0 & 1 & 0.2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0.3 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0.7 & 1 & 1 & 0.5 & 1 & 1 & 1 & 0.4 & 0.8 \\ 1 & 0.7 & 1 & 1 & 0.5 & 1 & 0 & 1 & 0.2 \\ 1 & 1 & 0.7 & 1 & 1 & 0.5 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

但し，上式中のϕは零行列を表わす．

これらの転置をとると，それぞれQ，F^Tが得られる．

(11)(13)式を用いて，未知要素の値を決定する．

以下では

①与えられた範囲の中で最大の値をとる．

②一つの要素について二つの値が含意された場合は
エントロピーが小さくなるように値を決める．

という方針に基づいて決定を行なう．

（ステップ１）P，Qにおいて最も非零要素の多い行に対応する要素はそれぞれx_7，y_3であるが，$x_7=0.6$が与えられたとする．(11a)式より$x_1 \leqq x_7$，$x_3 \leqq x_7$，$x_9 \leqq x_7$が含意される．一方，(13a)式からは$y_4 \leqq 0.5$，$y_8 \leqq 0.4$が含意される．簡単の為，Pにおいて最も非零要素の多い列に対応するx_3については$x_3=0$とし，$x_1=x_9=0.6$，$y_4=0.5$，$y_8=0.4$を代入しておく．

（ステップ２）これらのうちP，Qの対応する行において最も非零要素の多いものはx_1とx_9であるが，indexの若い順に含意することとし，$x_1=0.6$と(13a)式から$y_2 \leqq 0.4$，$y_4=0$が新たに含意される．$y_4=0$は前の$y_4=0.5$と矛盾するが，Yのエントロピーの小さくなる$y_4=0$を採用する．$y_2=0.4$とする．

$x_9=0.6$からは，(13a)式より$y_6 \leqq 0.5$，$y_7=y_8=0$が新たに含意される．$y_6=0.5$とする．$y_8=0$は，前の$y_8=0.4$と矛盾するが，Yのエントロピーが小さくなるように$y_8=0$とする．

一般に，値が０の要素から(13)式を用いて他の要素を含意することはできない．$y_2=0.4$からは，(13b)を用いて$x_5 \leqq 0.3$が新たに含意される．$x_5=0.3$とする．$y_6=0.5$からは，$y_3 \leqq 0.5$，$x_5 \leqq 0.2$が含意できる．$y_7=0$，$y_8=0$から新たに含意できる要素はない．$y_3=0.5$とすれば，$y_1 \leqq 0.5$，$y_9 \leqq 0.5$が新たにに含意できる．$y_1=y_9=0.5$としておく．Xのエントロピーが小さくなるように$x_5=0.2$とすると，$x_2 \leqq 0.2$が新たに含意できる．$y_1=0.5$からは，$x_2=0$が含意できる．

$y_9=0.5$からは，$x_6=0$，$x_8 \leqq 0.2$が含意できる．$x_8=0.2$とする．以上で既知となった要素から他に含意できる要素はない．

（ステップ３）残るx_4，y_5のうち，P，Qにおいて対応する行の非零要素数が多いのは．x_4であるから，簡単の為，他の要素に影響を与えない範囲でXのエントロピーが最小となるようにx_4に0.3を与える．

（ステップ４）y_5には，エントロピー最小かつ最大の値である１を与える．他の要素に及ぼす影響はない．

以上で決定の手続きが終了する．

この例題における未知要素の決定の様子は表１のようになる．

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9
1	1	1	1	1	1	0.6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.6	1	0	1	1	1	0.6	1	0.6	1	1	1	0.5	1	1	1	0.4	1
									1	0.4	1	0	1	0.5	0	0	1
0.6	1	0	1	0.3	1	0.6	1	0.6	1	0.4	0.5	0	1	0.5	0	0	1
0.6	1	0	1	0.2	1	0.6	1	0.6	0.5	0.4	0.5	0	1	0.5	0	0	0.5
0.6	0	0	1	0.2	0	0.6	0.2	0.6	0.5	0.4	0.5	0	1	0.5	0	0	0.5
0.6	0	0	0.3	0.2	0	0.6	0.2	0.6	0.5	0.4	0.5	0	1	0.5	0	0	0.5

表１．未知要素の値が決定する様子

また，このときのステップ１，２における推論構造を木を用いて表わすと図１のようになる．図中の枠で囲まれている要素は，エントロピーが小さくなるように値を決定した要素を示す．

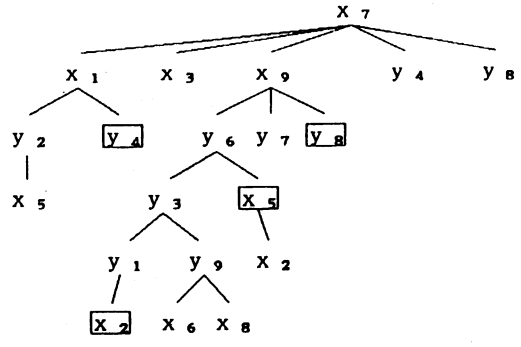


図１．ステップ１，２における推論構造

以上の様に未知要素の値を決定したMが可到達であることは，容易に確かめられる．

7．おわりに

ファジイＩＳＭにおける推移的結合の方法を提案し，この過程における相互連関行列の推論構造について考察した．この中で，ファジイシステムの構造の曖昧さの尺度となるファジイエントロピーを定義し，未知要素の決定における一つの指針を与えた．

[文 献]

1)J.N.Warfield : “Implication Structures for System Interconnection Matrices”, *ibid.* SMC-6, pp18-24 (1976)

2)大内，他：「ＩＳＭの推移的結合における完全推論行列の考察」電学論Ｃ，104,5,pp123-130(昭59)

3)寺野，他：ファジイシステム入門（昭62）オーム社

4)児玉・須田：システム制御のためのマトリクス理論（昭53）計測自動制御学会

5)大内・加地：「ファジイＩＳＭの具象化フェーズにおける相互連関行列の効率的生成アルゴリズム」電学論Ｃ，109,10,pp747-752(平成1)

6)E.Sanchez : “Resolution of Composite Fuzzy Relation Equations”, Information and Control 30, pp38-48(1976)

7)水本：ファジイ理論とその応用（昭63）サイエンス社

問い合わせ先：〒060 札幌市北区北13条西8丁目
北海道大学工学部情報工学科
若林 高明
Tel:(011)716-2111 ex:6498
Fax:(011)757-3524

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SB2-3

逐次型ファジィ後向き推論への区間値ファジィの導入

INTRODUCTION OF INTERVAL VALUED FUZZY INTO SEQUENTIAL FUZZY BACKWARD REASONING

野本弘平†，　大橋由昌†，　広瀬保嘉††，　古川裕之††
Kohei NOMOTO, Yoshimasa OHASHI, Yasuyoshi HIROSE, Hiroyuki FURUKAWA

† 三菱電機㈱電子システム研究所　Electro-optics & Microwave Systems Lab. Mitsubishi Electric Corp.
†† 三菱電機㈱鎌倉製作所　Kamakura Works, Mitsubishi Electric Corp.

Abstract　This paper introduces interval valued fuzzy into the sequential fuzzy backward reasoning which is applied to target recognition system. The interval valued fuzzy overcomes sensitivity of the reasoning algorithm and the intervals of the membership values represent lack of the information. In an application to the target recognition, the possibility of cach target converges gradually as the information is obtained.

1．はじめに

昨年の本シンポジウムにおいて、目標認識にファジィ後向き推論を応用する方法を提案し、その運用上のリアルタイム処理を可能にするために逐次型アルゴリズムを示した[1]。目標認識とは、レーダなどのセンサにより未知の目標を観測し、それにより得られる特徴量（レーダ断面積、飛行速度等）から、その目標の種類（旅客機かヘリコプタか等）を判定することであり、ここでは予め用意した目標候補についてそれぞれの可能性を0から1までの数値として得ることを目的としている。一方ファジィ後向き推論とは、現象の因果関係をファジィ逆問題に帰着させることによりその原因を求める推論であり[2][3][4]、目標認識では目標の種類を原因、特徴量を結果と見なすことによりこの推論を適用している。ただし、従来のファジィ後向き推論はバッチ処理型であったので、リアルタイムで目標の可能性を計算する目標認識システムでは、そのままでは適用できなかった。そこで、各特徴量が評価される度にその特徴量のみによる推論値を求め、その推論値により前回の総合推論値を更新する逐次処理型のアルゴリズムを考案した。このことにより、ランダムな順番で特徴量が入力されても、各目標の可能性に対して常にその時点で最良の推論結果が得られることになる[1][5][6]。

ファジィ後向き推論では、特徴量の評価値や因果関係を普通のファジィ量で与えても、その推論値は一般に普通のファジィ量とはならず、メンバーシップ値が区間値を取る区間値ファジィ量[7][8]となる。特に、逐次型ファジィ後向き推論においては、この区間値ファジィ量である総合推論値は毎回更新されるので、その収束性の議論が問題となる。また、ファジィ後向き推論はわずかな観測誤差やパラメータの設定誤差により、真の解を見失いやすいという数値的不安定性の問題がある。この解決のために、特徴量や因果関係をタイプⅡ型ファジィ量で与えるという提案があるが[2]、実際にはタイプⅡ型ファジィ量による設計は複雑であるので、ここではその代わりに区間値ファジィ量で特徴量や因果関係を与えることを考える。

本報告では、上記数値的不安定性の対処のために、特徴量の評価値と因果関係を区間値ファジィ量で与える逐次型ファジィ後向き推論アルゴリズムを提案する。さらに、上記収束性の議論のために、推論値の持つ無知の度合いを示す指標と、ある目標が特定される度合いを示す指標を定義し、逐次型推論アルゴリズムが進行する課程を検討する。

2．区間値ファジィとその効用

区間値ファジィ量xは、メンバーシップ値が区間値を持つ。その上下限値をそれぞれx^U、x^Lとし、次のように書くことにする。

$$x = [x^L \sim x^U] \qquad (1)$$

この区間値の幅は、無知の度合いを表しており、ベイグネス値[7]と呼ばれる。これをx^Vと書くことにする。

$$x^V = x^U - x^L \qquad (2)$$

ベイグネス値が、最小値0を取るときその区間値フ

ァジィ量は普通のファジィ量となり、また、最大値1を取るときには、完全未知集合[8]と呼ばれる。完全未知集合をϕで表し、すべての要素がϕである行ベクトルを$\boldsymbol{\psi}$とかくことにする。

$$\phi = [\ 0.0 \sim 1.0\ ] \tag{3}$$

$$\boldsymbol{\psi} = [\phi \quad \phi \quad \cdots \quad \phi] \tag{4}$$

ここで、メンバーシップ値上での区間値の和集合$\cup$と積集合$\cap$を定義する。

$$[x^L \sim x^U] \cup [y^L \sim y^U] = [x^L \wedge y^L \sim x^U \vee y^U] \tag{5}$$

$$[x^L \sim x^U] \cap [y^L \sim y^U] = \begin{cases} [x^L \vee y^L \sim x^U \wedge y^U] & x^L \vee y^L \leqq x^U \wedge y^U \text{ のとき} \\ \phi & x^L \vee y^L > x^U \wedge y^U \text{ のとき} \end{cases} \tag{6}$$

ここでϕは空集合を表す。ベイグネス値は一般に、$\cup$により増加し、$\cap$により減少する。

ファジィ後向き推論では、結果の評価や因果関係の設定が普通のファジィ量であっても、原因の推論値は一般に区間値ファジィ量として得られる。これに対しここでは、その評価や設定も区間値ファジィ量で行い、逐次型ファジィ後向き推論全体に、区間値ファジィを導入する。その理由は、次の2つの効用が期待されるからである。

第1は、ファジィ後向き推論自体に関するものであり、数値誤差に対して安定な推論を実現するための効用である。ファジィ後向き推論は、結果から原因を知るための有力な方法であるが、現実の運用においては数値誤差に弱く、しばしば真の解を見失うという問題がある。これは、各結果を同時に引き起こす原因を求めるためにメンバーシップ値上の積集合を取る段階で、わずかな誤差によりメンバーシップ値の重なりがなくなり空集合を導いてしまうことがあるからである。区間値ファジィを導入すれば、予めその数値誤差に相当する分だけの幅をメンバーシップ値に持たせておくことにより、この問題を解決することが可能となる。

第2は、逐次型アルゴリズムに関するもので、推論値の収束を議論するための効用である。初め何の情報も得られていない段階では、推論値は完全未知であり、その後、次々に結果に関する情報が入力されるにしたがって推論値は次第に特定の値に絞り込まれていく。区間値ファジィを導入すれば、そのベイグネス値が短調減少していくことによって、逐次アルゴリズムの収束を定量的に議論することが可能となる。

3．逐次型ファジィ後向き推論による目標認識

目標の候補をm個設定し、それぞれの目標らしさをa_iで表す。

$$\mathbf{a} = [a_1 \quad a_2 \quad \cdots \quad a_m] \tag{7}$$

目標の特徴量として、スピードや電波反射面積などが観測できるが、これらに対して例えば「スピードが速い」というようなn個のファジィ命題を設定しておく。実際の目標から得られた特徴量が、どれ程これらの命題を満たすかを、区間幅を持つメンバーシップ関数で評価し、区間値ファジィ量b_jで表す。

$$\mathbf{b} = [a_1 \quad b_2 \quad \cdots \quad b_n] \tag{8}$$

各目標を原因、特徴量の各命題を結果と見なし、i番目の目標候補からj番目の命題への因果関係を区間値ファジィ量r_{ij}で表す。r_{ij}を第ij要素とするファジィ関係行列Rにより、この因果関係をファジィ関係方程式により表す。

$$\mathbf{a} \bigcirc \mathbf{R} = \mathbf{b} \tag{9}$$

ここで○はmax-min合成を意味し、max演算とmin演算をそれぞれ$\vee$、$\wedge$と書けば、要素毎には次式のようになる。

$$b_j = \bigvee_{i=1}^{m} (a_i \wedge r_{ij}) \tag{10}$$

ファジィ関係方程式(9)において、ファジィ命題の成立度bは観測された特徴量からメンバーシップ関数により計算することができ、因果関係Rは予め調べて設定することができるので、これを解くことにより各目標らしさaを実際の目標の可能性として求めることができる。

区間値ファジィ量によるファジィ後向き推論に、ε合成と$\tilde{\varepsilon}$合成[2]を用いる。

$$[a \sim b]\ \varepsilon\ [c \sim d] = \begin{cases} [c \sim d] & a > d \text{ のとき} \\ [c \sim 1] & [a \sim c] \cap [c \sim d] \neq \phi \text{ のとき} \\ \phi & b < c \text{ のとき} \end{cases} \tag{11}$$

$$[a\sim b]\ \tilde{\varepsilon}\ [c\sim d] = \begin{cases}[0\sim d] & a>d\text{のとき}\\ [0\sim 1] & a\geqq d\text{のとき}\end{cases} \quad (12)$$

逐次型ファジィ後向き推論[1][5][6]によって、aについて求められた第k回目のイテレーションの解を$\hat{a}(k)^p$とする。ただしp＝1, 2, ・・・, $p^*(k)$は解の多義性を示す。

$$\hat{a}(k)^p = [\hat{a}_1(k)^p \quad \hat{a}_2(k)^p \quad \cdots \quad \hat{a}_m(k)^p] \quad (13)$$

さらに、この多義性をまとめた合成推論値$\bar{a}(k)$を定義する。

$$\bar{a}_i(k) = \bigcup_{p=1}^{p^*(k)} \hat{a}_i(k)^p \quad (14)$$

$$\bar{a}(k) = [\bar{a}_1(k) \quad \bar{a}_2(k) \quad \cdots \quad \bar{a}_m(k)] \quad (15)$$

区間値ファジィ量による逐次型ファジィ後向き推論のアルゴリズムを図1に示す。

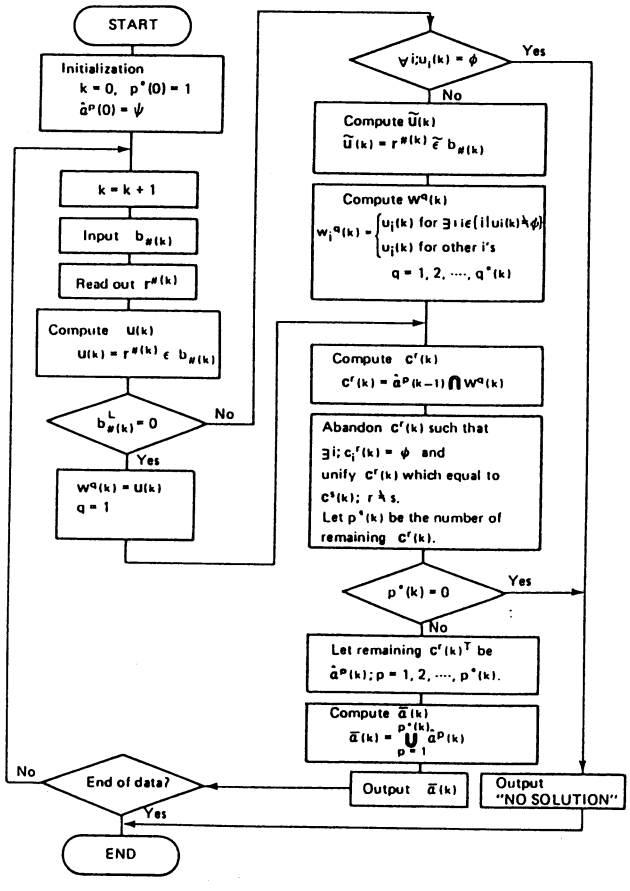


図1　逐次型ファジィ後向き推論のアルゴリズム

4．数値例

区間値を用いた逐次型ファジィ後向き推論により、航空機の自動認識を行う。次のm＝3個の目標候補と、n＝5個のファジィ命題を設定する。

a 1 ；ジェット旅客機
a 2 ；プロペラ輸送機
a 3 ；高速小型ジェット機
b 1 ；電波反射断面積が小さい
b 2 ；電波反射断面積が大きい
b 3 ；スピードが遅い
b 4 ；スピードが速い
b 5 ；定期旅客航空路からの逸脱が小さい

上記のファジィ命題の評価は、区間値ファジィ量を与える幅を持ったメンバーシップ関数で行う。その例を図2に示す。また、ファジィ関係行列を次のように、区間値ファジィ量で設定する。

$$R = \begin{bmatrix} 0.0 & [0.6\sim 1.0] & 0.0 & [0.75\sim 0.9] & 1.0 \\ 0.0 & [0.7\sim 1.0] & 1.0 & 0.0 & [0.0\sim 1.0] \\ 1.0 & 0.0 & 0.0 & [0.88\sim 1.0] & [0.0\sim 1.0] \end{bmatrix}$$

さて、次の順で3つの特徴量が観測されたものとする。

1 ；　定期旅客航空路からの逸脱＝　1.02 [km]
2 ；　スピード　　＝　0.72 [Mach]
3 ；　電波反射断面積　　＝40.　[m²]

上記の特徴量入力に伴い、ファジィ評価が、b_5, b_3, b_4, b_1, b_2の順に行われる。このb_jが得られる度に、逐次型ファジィ後向き推論のイテレーションkが一つ進み、合成推論値$\bar{a}(k)$が更新される。この合成推論値の各要素$\bar{a}_i(k)$；i=1, 2, 3は、それぞれジェット旅客機、プロペラ輸送機、および高速小型ジェット機の可能性を意味する。

各イテレーションにおける合成推論値の変化を図3に示す。図から明らかなように、初めは完全未知集合であった各合成推論値は、新たな情報を得る度に区間値幅を縮め、最終的には、ジェット旅客機の可能性が高いこと、またプロペラ輸送機や高速小型ジェット機の可能性はわずかであることが認識されている。

合成推論値の収束を定量的に評価するために、次の指標ＩＯＩ(index of ignorance)を定義し、その指標の変化を図4に示す。

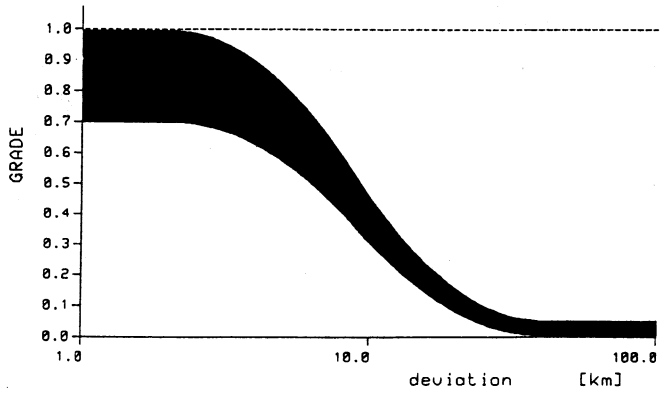


図2　ファジィ命題b_5；「定期旅客航空路からの逸脱が小さい」のメンバーシップ関数

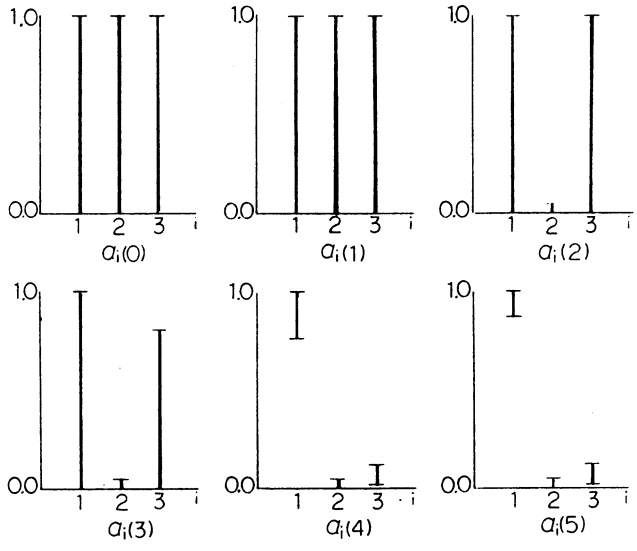


図3　各イテレーションの合成推論値

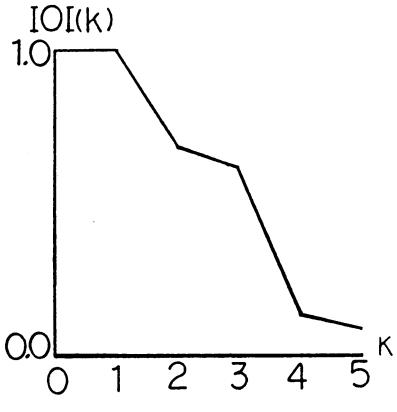


図4　無知の度合を示す指標ＩＯＩ(k)

$$IOI(k) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \bar{a}^{v}{}_{i}(k) \qquad (16)$$

指標ＩＯＩ(k)はそのイテレーションにおける推論全体の無知の度合いを示し、0から1までの値を取る。図から、ＩＯＩ(k)はイテレーションの度に減少していることが分る。このことは、情報を集めつつ推論を進めることで、無知の度合いが減っていき、推論値が真値に収束することを意味する。実際、ＩＯＩ(k)は非増加関数となっており、逐次型ファジィ後向き推論の合成推論値は、「解なし」にならない限り、収束する。

5．おわりに

逐次型ファジィ後向き推論に区間値ファジィ量を導入した。このことにより、数値誤差に対して安定な推論が可能となり、逐次推論に関する収束性を定量的に評価することができた。

参考文献

(1) 野本、桐本、大橋、広瀬、古川；逐次型ファジィ後向き推論による目標類別、第5回ファジィシステムシンポジウム、481/486 (1989)

(2) 塚本、田代；Fuzzy 逆問題の解法、計測自動制御学会論文集、15巻、1号、21/25 (1979)

(3) C.P.Pappis and M.Sugeno; Fuzzy Relational Equations and the Inverse Problem, Fuzzy Sets and Systems, Vol.15, 79/90 (1985)

(4) Y.Tsukamoto and T.Terano; Failure Diagnosis by Using Fuzzy Logic, IEEE Conference on Decision and Control, 1390/1395 (New Orleans, 1977)

(5) K.Nomoto, Y.Hirose, T.Kirimoto, Y.Ohashi, and H.Furukawa; Target Classification by Sequential Fuzzy Backward Reasoning, ISMM International Conference 240/243 (New Orleans, 1990)

(6) 野本、桐本、大橋、広瀬、古川；逐次型ファジィ後向き推論を用いた自動類別法、1990年電子情報通信学会全国大会、2-147 (1990)

(7) 廣田、渡辺；区間値ファジィ集合の自動車速度制御シミュレーションへの適用、第9回知識工学シンポジウム、13/18 (1989)

(8) 中村；不可知性を考慮した近似推論法について、第5回ファジィシステムシンポジウム、361/366 (1989)

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SB3-1

多重ファジィ推論と多段ファジィ推論

MULTI-FOLD FUZZY REASONING AND MULTI-STAGE FUZZY REASONING

水本雅晴
Masaharu MIZUMOTO

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

This paper investigates the properties of multi-fold fuzzy reasoning and multi-stage fuzzy reasoning. At first, inference results for multi-fold fuzzy reasoning are obtained by using several implication rules and show that methods Rs and Rg, which are based on the implication rules of standard sequence and Godelian sequence, respectively, can get good inference results, but Mamdani's method does not get so good results. Finally, the formulations of n-stage syllogism and multi-fold multi-stage fuzzy reasoning are executed under Mamdani's method.

1. はじめに

ファジィ推論はファジィ制御、故障診断、エキスパートシステムなどの分野で重要な役割を果たしている。ここではファジィ推論の内、多重ファジィ推論および多段ファジィ推論のいくつかの性質を述べることにする。まず、多重ファジィ推論に対しては種々の含意規則を適用した場合の推論結果を調べ、方法 Rs とRg が良好な推論結果を得ることを示した。しかし、ファジィ制御で有効な道具となっている Mamdani の推論法は内挿推論としては余りいい方法ではないことがわかった。さらに、max-限界積合成が従来の max-min 合成を使った場合よりも良好な推論結果を導くことが示された。最後に、多段ファジィ推論の内、ファジィｎ段論法や多重多段ファジィ推論の定式化を行い、一致度行列を用いることにより推論結果が統一的に得られることを示した。

2. ファジィ推論

ファジィ推論（別名：近似的推論）はいくつかのファジィ命題からある一つのファジィ命題を導出する推論法であり、人間が行なっている推論はこの種の推論であることから大いに関心がもたれている。また、プラント制御、列車制御、洗濯機を始めとするファジィ制御、ファジィエキスパートシステム、システム解析、意志決定など多くの分野にファジィ推論は重要な役割を果たしている。

まず、最も簡単なファジィ推論の例として次の形式のファジィ推論を取り上げよう。

規則：	A => B	
事実：	A'	
結論：	B'	(1)

ここで、A, A', B, B' はそれぞれ全体集合 U, U, V, V におけるファジィ集合である。

式(1)のファジィ規則 A => B は A と B との間の何らかの関係をあらわしていることから、Zadeh はこの規則 A => B をファジィ関係に変換する方法を与えた[1]。一例として

$$\mu_{A=>B}(u,v) = (1-\mu_A(u)+\mu_B(v)) \wedge 1 \quad (2)$$

のようなファジィ関係に変換する方法 Ra ("算術規則") がある。この方法は Lukasiewicz の含意規則 $a \rightarrow b = (1 - a + b) \wedge 1$、$a,b \in [0,1]$、に基づいていることがわかる。

式(1)のファジィ推論形式において、事実のファジィ集合 A' と規則のファジィ関係 A => B との max-min 合成 "o" を行なうことによって結論 B' が得られるとしたのが「推論の合成規則」であり、次のように与えられる。

$$B' = A' \circ (A => B)$$
$$\mu_{B'}(v) = V_u \{\mu_{A'}(u) \wedge \mu_{A=>B}(u,v)\} \quad (3)$$

但し、V = max、$\wedge$ = min である。

たとえば、ファジィ制御でよく使用されている Mamdani の方法 Rc [2] では A => B として $a \rightarrow b = a \wedge b$ に基づいた直積 A x B を採用している。

$$\mu_{Rc}(u,v) = \mu_{AxB}(u,v) = \mu_A(u) \wedge \mu_B(v) \quad (4)$$

結論 B' = A' o Rc は

$$\mu_{B'}(v) = V_u\{\mu_{A'}(u) \wedge \mu_A(u) \wedge \mu_B(v)\}$$
$$= a \wedge \mu_B(v) \quad (5)$$

のように与えられる。ここで、a は

$$a = V_u\{\mu_{A'}(u) \wedge \mu_A(u)\} \quad (6)$$

表1　A', A => B からの推論結果 B'

合成 / A' / a→b	max-min 合成 "∘"				max-⊙ 合成 "□"			
	A	very A	rather A	not A	A	very A	rather A	not A
Ra: $1\wedge(1-a+b)$	$\frac{1+\mu_B}{2}$	(∗1)	(∗3)	1	μ_B	μ_B	(∗5)	1
Rm: $(a\wedge b)\vee(1-a)$	$0.5\vee\mu_B$	(∗2)	(∗4)	1	μ_B	μ_B	$\frac{1}{4}\vee\mu_B$	1
Rc: $a\wedge b$	μ_B	μ_B	μ_B	$0.5\wedge\mu_B$	μ_B	μ_B	μ_B	0
Rs: $\begin{cases}1\ldots a\leq b\\0\ldots a>b\end{cases}$	μ_B	$\mu_B{}^2$	$\sqrt{\mu_B}$	1	μ_B	$\mu_B{}^2$	$\sqrt{\mu_B}$	1
Rg: $\begin{cases}1\ldots a\leq b\\b\ldots a>b\end{cases}$	μ_B	μ_B	$\sqrt{\mu_B}$	1	μ_B	μ_B	$\sqrt{\mu_B}$	1
Rb: $(1-a)\vee b$	$0.5\vee\mu_B$	(∗2)	(∗4)	1	μ_B	μ_B	$\frac{1}{4}\vee\mu_B$	1
Rd: $\begin{cases}1\ldots a\leq b\\\frac{b}{a}\ldots a>b\end{cases}$	$\sqrt{\mu_B}$	$\mu_B{}^{2/3}$	$\mu_B{}^{1/3}$	1	μ_B	μ_B	$\sqrt{\mu_B}$	1

(注) (∗1) $\frac{3+2\mu_B-\sqrt{5+4\mu_B}}{2}$　(∗2) $\frac{3-\sqrt{5}}{2}\vee\mu_B$　(∗3) $\frac{\sqrt{5+4\mu_B}-1}{2}$　(∗4) $\frac{\sqrt{5}-1}{2}\vee\mu_B$

(∗5) $\begin{cases}\mu_B+\frac{1}{4}\ldots\mu_B\leq\frac{1}{4}\\\sqrt{\mu_B}\ldots\ldots\mu_B\geq\frac{1}{4}\end{cases}$

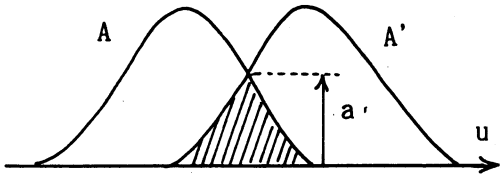


図1　ファジィ集合 A と A' の一致度 a

であり、ファジィ集合 A と A' の "一致度" を表している（図1参照）。

たとえば、A' = A のとき、a = 1 となることより、結論 B' は B' = B となり、次の modus ponens

$$\frac{\begin{array}{l}A \Rightarrow B\\ A\end{array}}{B} \quad \text{(modus ponens)} \qquad (7)$$

を満たしていることが分かる。

式(3)の推論の合成規則 B' = A' ∘ (A => B) においては max-min 合成 "∘" を用いているが、min の代わりに積演算(t-norms)、たとえば、限界積⊙を採用した max-⊙合成 "□" を使用することも可能である[4]。

$$B' = A' \,\square\, (A \Rightarrow B)$$
$$\mu_{B'}(v) = V_u\{\mu_{A'}(u)\odot\mu_{A\Rightarrow B}(u,v)\} \qquad (8)$$

ここで、限界積 $x\odot y = (x+y-1)\vee 1$ である。

この max-⊙合成 "□" を Zadeh の算術規則 Ra（式(2)）に適用してみると、A'= A のとき、結論は B' = B、すなわち B' = A □ Ra = B となり（表1参照）、modus ponens を満たしていることが分かる[3,4]。このように新しい合成法 "□"を使用すると、max-min 合成 "∘" の下では modus ponens を満たさなかった方法 Ra（表1参照）が直観に合う推論結果を得ることが分かる。このことは表1からもわかるように他の含意規則 a→b に基づいた方法に対してもいえる。また、本表では A' = A の場合の他に

$$\mu_{\text{very A}}(u) = \mu_A(u)^2$$
$$\mu_{\text{rather A}}(u) = \mu_A(u)^{0.5}$$
$$\mu_{\text{not A}}(u) = 1 - \mu_A(u)$$

の場合の推論結果も掲げている。この場合も新しい合成法 "□" の下では直観に合った推論結果を得ていることがうなずけるであろう。

3. 多重ファジィ推論

式(1)の簡単なファジィ推論形式を一般化した次のような多重ファジィ推論形式を取り上げてみよう。

規則 1:	A1 => B1	also
規則 2:	A2 => B2	also
	.....	
規則 n:	An => Bn	
事実:	A'	
結論:	B'	

(9)

ここで、Ai, A'⊆U; Bi, B'⊆V である。

この多重ファジィ推論形式はファジィ制御やファジィ・エキスパート・システムで用いられているものであり、"内挿推論" [5]でもある。

結論 B' を求めるに際して、含意規則 a→b のタイプにより "also" の解釈が異なってくることに注意しなければならない。

すなわち、a→b = a ^ b のように積演算を採用した Mamdani の方法 Rc (式(4))の場合には、"also" は "or" と解釈される。これより、"or" として結び(U)を採用すると、結論 B' は、max-min 合成 "∘" を使うことにより

$$
\begin{aligned}
B' &= A' \circ [(A1 \Rightarrow B1)\ OR \cdots OR\ (An \Rightarrow Bn)] \\
&= A' \circ [(A1 \times B1) \cup \cdots \cup (An \times Bn)] \\
&= [A' \circ (A1 \times B1)] \cup \cdots \cup [A' \circ (An \times Bn)] \\
&= B1' \cup B2' \cup \cdots \cup Bn' \qquad (10)
\end{aligned}
$$

と与えられ、個々の推論結果 $Bi' = A' \circ (Ai \times Bi)$ の結び U として与えられることがわかる。

一方、Zadeh の方法 Ra を始め、表1の Rc 以外の方法（多値論理の含意規則に対応）の場合には、"also" を "and" と解釈しなければならない。すなわち、"and" を交わり∩と解釈すると、結論 B' は

$$
\begin{aligned}
B' &= A' \circ [(A1 \Rightarrow B1)\ AND \cdots AND\ (An \Rightarrow Bn)] \\
&= A' \circ [(A1 \Rightarrow B1) \cap \cdots \cap (An \Rightarrow Bn)] \qquad (11) \\
&\subseteq [A' \circ (A1 \Rightarrow B1)] \cap \cdots \cap [A' \circ (An \Rightarrow Bn)]
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&\mu_{B'}(v) \qquad (12) \\
&= \bigvee_u \{\mu_{A'}(u) \wedge \mu_{A1 \Rightarrow B1}(u, v) \wedge \cdots \wedge \mu_{An \Rightarrow Bn}(u, v)\}
\end{aligned}
$$

と与えられる。この場合、一般的に、結論 B' は個々の推論結果 $Bi' = A' \circ (Ai \Rightarrow Bi)$ の交わり（∩）とは等しくならないことに注意されたい[6]。

【例】次のような多重ファジィ推論を考えてみよう。

$$
\begin{array}{ll}
\text{規則1:} & \underset{\sim}{3} \Rightarrow \underset{\sim}{3} \\
\text{規則2:} & \underset{\sim}{5} \Rightarrow \underset{\sim}{5} \\
\text{規則3:} & \underset{\sim}{7} \Rightarrow \underset{\sim}{7} \\
\text{事 実:} & \underset{\sim}{A'} \\
\hline
\text{結 論:} & B'
\end{array} \qquad (13)
$$

ここで、$\underset{\sim}{3}$ は「3 ぐらい」を表すファジィ数であり、図2のようであるとする。

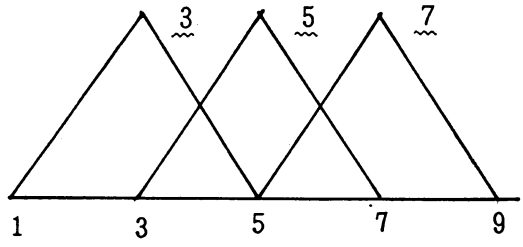


図2　ファジィ集合 $\underset{\sim}{3}$、$\underset{\sim}{5}$、$\underset{\sim}{7}$

まず、式(13)において

$$A' = \underset{\sim}{5}$$

であった場合の結論 B' を求めてみよう。

Mamdani の方法 Rc（式(4)）の場合は、式(10)からもわかるように推論結果は分配的であることから、図3のように簡単に求められる。

次に、Zadeh の方法 Ra（式(2)）を考えてみよう。式(11)からわかるように、結論 B' は分配的でないことから、Mamdani の方法のように図的に簡単に求めることができない。方法 Ra の場合、式(12)は次のように書き直される。

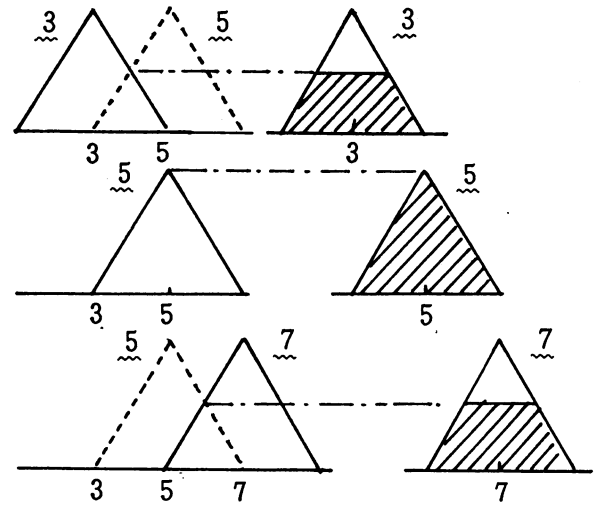
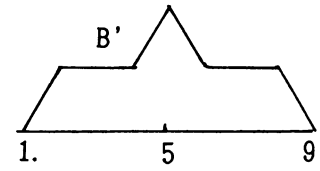


図3　方法 Rc による結論 B' の求め方



$$
\begin{aligned}
&\mu_{B'}(v) = \bigvee_u \{\mu_{A'}(u) \qquad (14) \\
&\wedge (1-\mu_{A1}(u)+\mu_{B1}(v)) \wedge \cdots \wedge (1-\mu_{An}(u)+\mu_{Bn}(v))\}
\end{aligned}
$$

すると式(13)の多重ファジィ推論で、$A' = \underset{\sim}{5}$ の場合、結論 B' は

$$
\begin{aligned}
\mu_{B'}(v) &= \bigvee_u \{\mu_{\underset{\sim}{5}}(u) \wedge (1-\mu_{\underset{\sim}{3}}(u)+\mu_{\underset{\sim}{3}}(v)) \\
&\quad \wedge (1-\mu_{\underset{\sim}{5}}(u)+\mu_{\underset{\sim}{5}}(v)) \wedge (1-\mu_{\underset{\sim}{7}}(u)+\mu_{\underset{\sim}{7}}(v))\}
\end{aligned}
$$

のように与えられる。これを解析的に求めると

$$
\mu_{B'}(v) = \begin{cases} 0.5 & \cdots\ v \leq 3 \\ 1-(5-v)/4 & \cdots\ 3 \leq v \leq 5 \\ 1-(v-5)/4 & \cdots\ 5 \leq v \leq 7 \\ 0.5 & \cdots\ 7 \leq v \end{cases}
$$

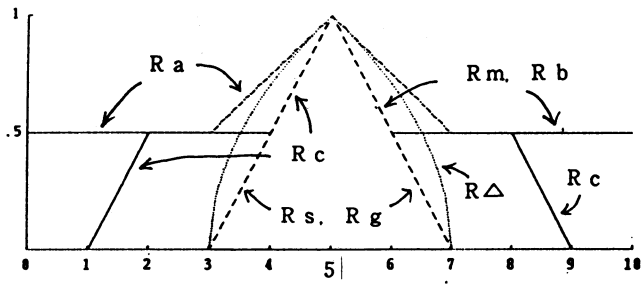
となる。

図4(a)は、表1の種々の含意規則 a→b を用いた場合の推論結果 B' を図示したものである。式(13)の多重ファジィ推論において、$A' = \underset{\sim}{5}$ の場合にどの様な結論 B' が得られれば妥当であるかは速断できないが、$\underset{\sim}{5} \Rightarrow \underset{\sim}{5}$ という規則があるから、結論は $B' = \underset{\sim}{5}$ であろうとの立場に立てば、方法

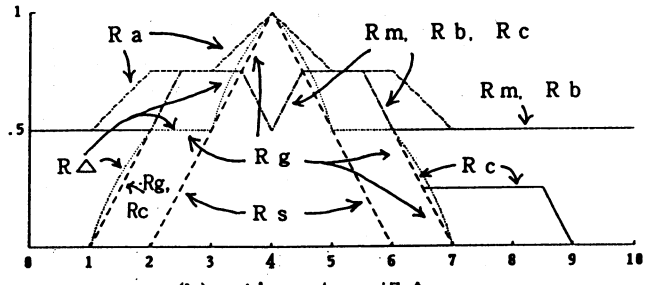
$$
\text{Rs:}\quad a \to b = \begin{cases} 1 & \cdots\ a \leq b \\ 0 & \cdots\ a > b \end{cases} \qquad (15)
$$

$$
\text{Rg:}\quad a \to b = \begin{cases} 1 & \cdots\ a \leq b \\ b & \cdots\ a > b \end{cases} \qquad (16)
$$

が $B' = \underset{\sim}{5}$ という結論を得ていることが分かる。方法 Rc や Ra などは5を中心とした山形をしているが、裾野がかなり広がっていることがわかる。

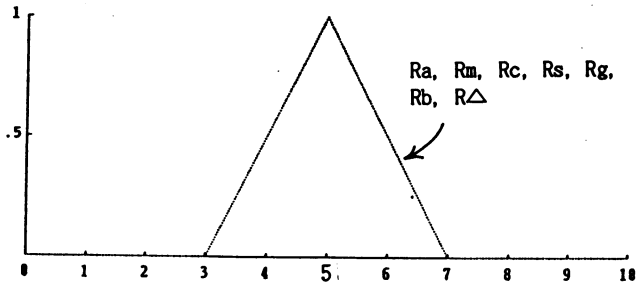


(a) A' = 5 の場合

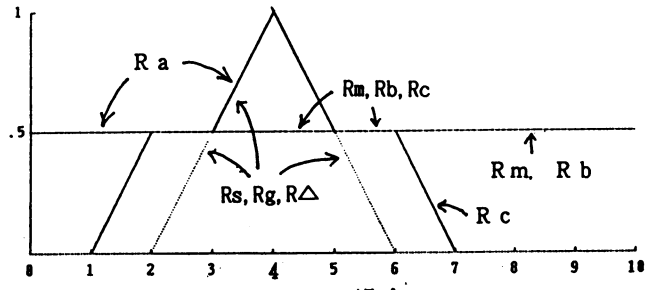


(b) A' = 4 の場合

図4 式(13)の推論結果 B' (max-min 合成の場合)



(a) A' = 5 の場合



(b) A' = 4 の場合

図5 式(13)の推論結果 B' (max-⊙ 合成の場合)

図4(b)は、条件部のファジィ集合3、5、7とは一致しない

$$A' = 4$$

である場合の推論結果を表している。この場合の推論結果の評価はさらに困難なものとなるが、4は3と5の中間にあるから結論 B'も規則の形から3と5の中間にあるだろうとすれば、方法 Rs のみが B' = 4という結論を得ていることがわかる。方法 Rc、Rm、Rb は点 4 の所で凹んでいることがわかる。

以上は、max-min 合成の下での推論結果を示したものであるが、max-⊙合成を用いるとさらに良い推論結果が得られることを以下で示そう。

図5は、式(13)の多重ファジィ推論において、max-⊙合成 "□" を使用した場合の推論結果である。同図(a) は A' = 5 の推論結果を表しているが、すべての方法が B' = 5 という結論を得ていることが分かる。同図(b) は A'= 4 の場合の結論を表しているが、方法 Rs, Rg, RΔ が B'= 4 という結論を得ている。

以上の例題からわかることは、合成規則では max-⊙合成の方が従来から使われている max-min 合成の場合よりも直感的に妥当な結論を得る場合が多く、また、方法としては Rs、 Rg が良い推論結果を得ていることがわかる。しかしながら、ファジィ制御で有効な結果を得ている Mamdani の方法 Rc は少なくともこの例でもわかるように満足いく推論結果を得ていない。

4. 多段ファジィ推論

本節では、三段論法の拡張としての「ファジィ三段論法」および「ファジィn段論法」の定式化を試みる。また、多重ファジィ推論と多段ファジィ推論を組み合わせた一種の並列ファジィ推論である「多重多段ファジィ推論法」の定式化を Mamdani の推論法に限定して議論していこう。

まず、簡単のため、次のような三段論法を考えてみよう。

$$\begin{array}{ll} \text{規則 1}: & A \Rightarrow B \\ \underline{\text{規則 2}:} & \underline{B \Rightarrow C} \\ \text{規則 3}: & A \Rightarrow C \end{array} \qquad (17)$$

ここで、A, B, C は 全体集合 U, V, W におけるファジィ集合である。

もし規則1と規則2の合成結果が規則3に等しければ、すなわち次式が成立すれば、三段論法が成立するといえる。

$$(A \Rightarrow B) \circ (B \Rightarrow C) = (A \Rightarrow C) \qquad (18)$$

ここで、左辺は max-min 合成 "o" を使って

$$\mu_{(A\Rightarrow B)\circ(B\Rightarrow C)}(u,w) = \bigvee_v \{\mu_{A\Rightarrow B}(u,v) \wedge \mu_{B\Rightarrow C}(v,w)\} \qquad (19)$$

と与えられる。

たとえば、Mamdani の方法 Rc (4) を使うと、式(18)の左辺は、式(19)から

左辺 $= V_v \{[\mu_A(u) \hat{} \mu_B(v)] \hat{} [\mu_B(v) \hat{} \mu_C(w)]\}$

$= \mu_A(u) \hat{} \mu_C(w) \hat{} V_v\{\mu_B(v)\}$

$= \mu_A(u) \hat{} \mu_C(w) = \mu_{A=>C}(u,w)$

となり、三段論法が成立することがわかる。

表2は各種の含意規則（表1参照）に対して三段論法が成立するか否かをまとめたものである[3,4]。この場合、max-min 合成 "o" の代わりに max-⊙合成 "□" を使用した場合の三段論法の成立結果も掲げている。この場合も max-⊙合成 "□" の場合の方が良好な結果を得ているが、方法 Rc では反対の結果を得ている。

次に、三段論法の条件部を一般化した A => B, B' => C、すなわち

$$(A => B) \circ (B' => C) \qquad (20)$$

を考えてみよう。ここで、B と B' は必ずしも一致してなくてもよいものとする。方法 Rc を使うと、式(20)は

$$\mu_{(A=>B)\circ(B'=>C)}(u,w)$$

$$= V_v \{[\mu_A(u) \hat{} \mu_B(v)] \hat{} [\mu_{B'}(v) \hat{} \mu_C(w)]\}$$

$$= V_v \{\mu_B(v) \hat{} \mu_{B'}(v)\} \hat{} \mu_A(u) \hat{} \mu_C(w)$$

$$= b \hat{} \mu_A(u) \hat{} \mu_C(w)$$

$$= b \hat{} \mu_{A=>C}(u,w) \qquad (21)$$

となる。ここで、b はファジィ集合 B と B' の一致度を表している（図1参照）。

この B と B' の一致度 b を用いると、

$$(A => B) \circ (B' => C) = b \hat{} (A => C) \qquad (22)$$

のように表される。この関係を「ファジィ三段論法」と呼ぶことにしよう。明らかに、B = B' の場合は b = 1 となることより、式(18)がなりたち、三段論法が成立することになる。また、B と B' が重なっていない場合、b = 0 となることより三段論法は成立しないことになる。また、b = 0.5 の場合は、三段論法が 0.5 の度合で成立することになる。このことから、一致度 b は三段論法の成立度合を表す指標となっている。

同様な方法により、

$$A1 => A2,\ A2' => A3,\ \cdots,\ An-1' => An \qquad (23)$$

のような「ファジィn段論法」は

$$(A1=>A2)\circ(A2'=>A3)\circ \cdots \circ(An-1'=>An)$$

$$= a2 \hat{} a3 \hat{} \cdots \hat{} an-1 \hat{} (A1=>An) \qquad (24)$$

のように表される。ここで、ai (i=2,…,n-1) はファジィ集合 Ai と Ai' の一致度である。

表2　三段論法の成立 [3,4]

方　法	Ra	Rm	Rc	Rs	Rg	Rb	R△
max-min合成	×	×	○	○	○	×	×
max-⊙合成	○	×	×	○	○	○	○

次に、多重ファジィ推論と多段ファジィ推論を組み合わせた「多重多段ファジィ推論」を考えてみよう。これは一種の "並列ファジィ推論" になっている。

今、多重ファジィ推論の規則が次のように2グループあったとしよう。

<ｸﾞﾙｰﾌﾟ1>	<ｸﾞﾙｰﾌﾟ2>
A1 => B1	B1' => C1
A2 => B2	B2' => C2
…	…
Am => Bm	Bn' => Cn

(25)

この場合、推論規則 Ai => Bi, Bj' => Cj からは式(22)のように

$$(Ai=>Bi)\circ(Bj'=>Cj) = bij \hat{} (Ai=>Cj) \qquad (26)$$

と表される。bij は Bi と Bj' の一致度である。

すると、式(25)のような多重二段ファジィ推論から、次のような Bi と Bj' の一致度 bij からなる m x n ファジィ行列

$$\begin{bmatrix} b11 & b12 & \cdots & b1n \\ b21 & b22 & \cdots & b2n \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ bm1 & bm2 & \cdots & bmn \end{bmatrix} \qquad (27)$$

を作ることができる。このファジィ行列を「一致度行列」と名付けることにしよう。

この一致度行列を用いて、式(25)のような多重二段ファジィ推論の推論結果の求め方を考えてみよう。

今、事実として A' が式(25)の<ｸﾞﾙｰﾌﾟ1>のファジィ規則群に加えられたとする。A' と Ai の一致度を ai とすると、結論 B' は

$$\mu_{B'}(v) = [a1\ a2\ \cdots\ am] \circ \begin{bmatrix} \mu_{B'1}(v) \\ \mu_{B'2}(v) \\ \cdots \\ \mu_{B'm}(v) \end{bmatrix} \qquad (28)$$

と与えられる（式(5),(10)参照）。ここで、"o" は max-min 合成である。

さらに、得られた結論 B' が式(25)の<ｸﾞﾙｰﾌﾟ2>に加えられたとすると、結論 C' は

$$\mu_{C'}(w) = [b1\ b2\ \cdots\ bn] \circ \begin{bmatrix} \mu_{C'1}(w) \\ \mu_{C'2}(w) \\ \cdots \\ \mu_{C'n}(w) \end{bmatrix} \qquad (29)$$

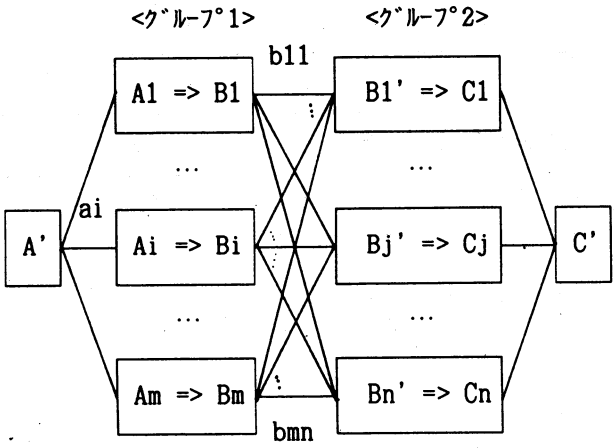


図6　式(25)の多重多段ファジィ推論

と与えられる。ここで、bj は B' と Bj の一致度であるが、これは式(27)の一致度行列を用いて

$$[b1\ b2\ \cdots\ bn] \qquad (30)$$

$$= [a1\ a2\ \cdots\ am] \circ \begin{bmatrix} b11 & b12 & \cdots & b1n \\ b21 & b22 & \cdots & b2n \\ & \cdots\cdots\cdots & & \\ bm1 & bm2 & \cdots & bmn \end{bmatrix}$$

のように表すことができる。よって、結論 C' は

$$\mu_{C'}(w) \qquad (31)$$

$$= [a1\ a2\ \cdots\ am] \circ \begin{bmatrix} b11\ b12\ \cdots\ b1n \\ b21\ b22\ \cdots\ b2n \\ \cdots\cdots\cdots \\ bm1\ bm2\ \cdots\ bmn \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} \mu_{C1}(w) \\ \mu_{C2}(w) \\ \cdots \\ \mu_{Cn}(w) \end{bmatrix}$$

のようにベクトルと行列の max-min 合成 "o" を用いて統一的に求めることができる（図6参照）。

さらに、式(25)のファジィ推論規則のグループに第3のグループが加わったとき、すなわち

<ｸﾞﾙｰﾌﾟ1>	<ｸﾞﾙｰﾌﾟ2>	<ｸﾞﾙｰﾌﾟ3>
A1 => B1	B1' => C1	C1' => D1
A2 => B2	B2' => C2	C2' => D2
...	...	...
Am => Bm	Bn' => Cn	Cp' => Dp

(32)

のときの推論結果 D' は

$$\mu_{D'}(x) = [a1\ a2\ \cdots\ am] \qquad (33)$$

$$\circ \begin{bmatrix} b11\ b12\ \cdots\ b1n \\ b21\ b22\ \cdots\ b2n \\ \cdots\cdots\cdots \\ bm1\ bm2\ \cdots\ bmn \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} c11\ c12\ \cdots\ c1p \\ c21\ c22\ \cdots\ c2p \\ \cdots\cdots\cdots \\ cn1\ cn2\ \cdots\ cnp \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} \mu_{D1}(x) \\ \mu_{D2}(x) \\ \cdots \\ \mu_{Dp}(x) \end{bmatrix}$$

のように求められる。ここで、行列 [cij] の cij はファジィ集合 Ci と Cj' の一致度を表す。

以上のように、式(32)のような多重多段ファジィ推論（一種の「並列ファジィ推論」と考えられる）は一致度行列を使用することにより統一的に取り扱うことができる。

以上は、Mamdani の方法 Rc を使った場合の定式化であったが、他の含意規則を用いた Ra や Rs といった方法では分配性が成立しないことから上記のような多重多段ファジィ推論の定式化は極めて困難なものとなる。

5. むすび

多重ファジィ推論や多重多段ファジィ推論は複数個のファジィ推論規則が互いに影響しあっており、その結果として結論が得られるものと考えられる。したがって、通常のプロダクションルールにおけるようなパターンマッチングするか否かのような単純な考え方では、この種のファジィ推論形式は議論できないであろう。人間はこの種の推論を巧妙に行っているものと思えるので、今後、より複雑な形をしたファジィ推論に対する研究が推進されるべきと思われる。これにより、真の "専門家システム" が現実のものとなるであろうことが期待される。

参考文献

1. Zadeh, L.A., Fuzzy logic and approximate reasoning, Synthese, 30, 407-428, 1975.
2. Mamdani, E.H., Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant, Proc. of IEEE, 121, 1585-1588, 1974.
3. Mizumoto, M. & Zimmermann, H.J., Comparison of fuzzy reasoning methods, Fuzzy Sets and Systems, 8, 253-284, 1982.
4. Mizumoto, M., Fuzzy conditional inference under max-⊙ composition, Inform. Sciences, 27, 183-209, 1982.
5. ザデー, L.A., ファジィ理論の誕生とその発展 ー日本への期待ー、日本ファジィ学会誌、Vol. 2, No.2, 182-195, 1990.
6. 水本、ファジィ集合とファジィ推論、第3回「ファジィシステムシンポジウム」講演論文集、37-48, 1987.

問い合わせ先：〒572 寝屋川市初町18-8
大阪電気通信大学 経営工学科
水 本 雅 晴
TEL 0720-24-1131 ext 2361
FAX 0720-24-0014

SB3-2

多段型ファジィ推論シェルの構築

－ 多段推論機能と評価値最良探索機能 －

Multi-Step Fuzzy Reasoning Shell

－ Multi-Step Reasoning and Optimum Search Using Checking Knowledge －

林 勲＊ 内藤 榮一＊ 野村 博義＊ 若見 昇＊ 馬野 元秀＊＊
Isao Hayashi Eiichi Naito Hiroyoshi Nomura Noboru Wakami Motohide Umano

＊ 松下電器産業(株) 中央研究所
Central Research Laboratories
Matsushita Electric Industrial Co. LTD

＊＊ 大阪大学 大型計算機センター
Computation Center
Osaka University

ABSTRACT : Conventional fuzzy reasoning shells can not support Boolean logic rules (non-fuzzy inference rules) and multi-step fuzzy reasoning. In this paper, we develop a fuzzy reasoning shell which provides a multi-step reasoning and optimum search using checking knowledge. We can write fuzzy reasoning rules and Boolean logic rules in knowledge base, which are devided into more than one knowledge block, and the shell supports a backtrack mechanism to search the optimum solution.

1. はじめに

最近，専門家の主観を扱えるファジィ推論システムの開発が行われている[1][2]．しかし，従来のファジィ推論システムの推論は制御型で，しかも一段のみの推論であるため，推論が多段となる意思決定支援や診断等には利用することができなかった．また，従来の二値論理型（確定値型）ルールとの併用もできなかった．

本論文では，多段ファジィ推論を実現するファジィ推論シェルを提案する[3]．本シェルでは，推論ルールの知識を目的別に分割して，複数の知識源を形成する．各知識源では，ファジィ推論の多段化を実現する．また，推論の結果を評価して，目的とする最適な推論過程を導出するバックトラック機能をもつ．バックトラック先を決定する探索法として，推論結果の評価値を用いる評価値最良探索法を提案する．ここでは，多段型ファジィ推論のアルゴリズム，および評価値最良探索の機能を説明し，簡単な渋滞回避の例題を用いて，その有用性を議論する．

2. システムの概要

本推論シェルは以下の特徴をもつ．

1）知識を多数の知識源(knowledge block: KB)として持つ．

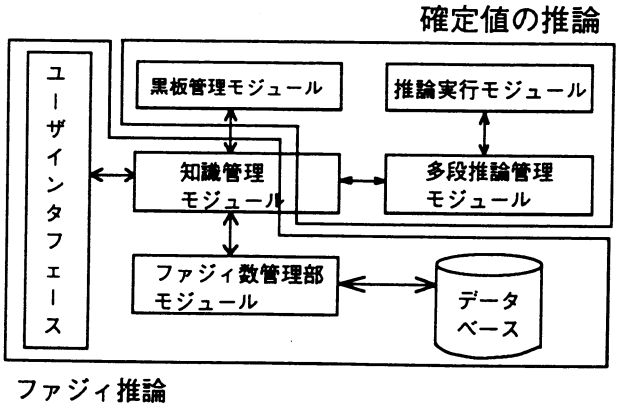


図1 多段型ファジィ推論シェルの基本構成

2）知識表現はプロダクションルールを用い，ファジィ推論ルールと確定値推論ルールとを1つの KB に書くことができる．

3）多段推論はファジィ推論と確定値推論とをサポートし，複数の KB にわたる多段推論を可能とする．推論結果は黒板(Blackboard:BB)に書き込む．

4）ファジィ推論の前件部の適合度によるバックトラック機能を有し，評価用知識 CKB (checking knowledge-block: CKB)により，推論を停止させることができる．

5）ユーザインターフェイスはオーバラップ方式のウィンドウシステム上に構築され，ルール作成・編集，メンバシップ関数の生成・編集，ファジィ推論結果の履歴の表示，および結果のルックアップテーブルへの変換等を行う機能を持つ．

6）ルールは C 言語に変換し，実行する．

基本構成を図1に示す．システムは，ファジィ推論部と確定値推論部から構成されている．各 KB ではファジィ推論ルールと確定値推論ルールとを書くことができるので，知識管理モジュールはファジィ推論部と確定値推論部との両構成部に共有する形態で存在する．知識管理モジュールでの推論結果は，黒板管理モジュールの BB に書き込まれる．BB は表形式の複数個のノードを持つ．各ノードにはファジィ推論，および確定値推論の結果の属性(attribute)と値(value)を格納する．ノードで使用可能な型は実数型，文字列型，ファジィ数型の3種類である．全体はC言語で記述され，Solbourne ワークステーション，Sun ワークステーションで稼動している．

3. 多段推論機能

本推論シェルでは，ファジィ推論の多段推論が可能である．

各 KB は，ファジィ推論を起動するための fuzzy_rule 部と確定値の推論を起動するための action_rule 部，およびデフォルトの動作を記述する default 部からなる．

fuzzy_rule には次のようなプロダクションルールを書くことができる．

$$R_1: \text{IF } x_1 \text{ is } T_{11} \text{ and } \cdots \text{ and } x_n \text{ is } T_{1n} \text{ THEN } y \text{ is } F_1$$
$$R_2: \text{IF } x_1 \text{ is } T_{21} \text{ and } \cdots \text{ and } x_n \text{ is } T_{2n} \text{ THEN } y \text{ is } F_2 \quad (1)$$

R_r;IF x_1 is T_{r1} and … and x_n is T_{rn}
THEN y is F_r

ただし，R_s，(s=1,2,…,r) は第 s 番目の推論ルール，x_j (j=1,2,…,n) は第 j 番目の入力変数，T_{sj} はファジィ数，文字列，および実数や区間を表す．また，y は出力変数を表し，F_s は出力変数 y のファジィ数を示す．

一方，action_rule とは次のようなプロダクションルールをいう．

R_1;IF x_1 is T_{11} and … and x_n is T_{1n}
THEN $C_{11}(a_{11})$, …, $C_{1w}(a_{1w})$
R_2;IF x_1 is T_{21} and … and x_n is T_{2n}
THEN $C_{21}(a_{21})$, …, $C_{2w}(a_{2w})$ (2)

R_m;IF x_1 is T_{m1} and … and x_n is T_{mn}
THEN $C_{m1}(a_{m1})$, …, $C_{mw}(a_{mw})$

ただし，C_{sk}，(s=1,2,…,m, k=1,2,…,w) は引き数 a_{sk} を持つ C 言語のシステム関数，またはユーザが作成するユーザ定義関数を意味する．

ファジィ推論の多段推論は KB での推論結果を BB に書き込み，次の KB に，その結果を受け渡すことによって実行される．図2に多段推論の推論過程を示し，以下に動作手順を示す．

1）初期 KB を起動する．

2）KB の fuzzy_rule 部では全ルールを用いてファジィ推論を行う．BB の初期ノードのデータ $(bx_1, bx_2, \cdots, bx_n)$ が，文字列，実数，および区間の場合のメンバシップ関数 $\mu_{bx1}(x_1)$，$\mu_{bx2}(x_2)$，…，$\mu_{bxn}(x_n)$ を次のように表す．

［文字列，実数の場合］

$$\mu_{bxj}(x_j) = \begin{cases} 1 & ; x_j = bx_j \\ 0 & ; x_j \neq bx_j \end{cases} \quad (3)$$

［文字列，実数の場合］

$$\mu_{bxj}(x_j) = \begin{cases} 1 & ; x_j \in bx_j \\ 0 & ; x_j \notin bx_j \end{cases} \quad (4)$$

ただし，x_j は各次元の入力変数を表す．

また，前件部の T_{sj} が，文字列，実数，および区間の場合のメンバシップ関数 $\mu_{Tsj}(x_{ij})$ を次のように定義する．

［文字列，実数の場合］

$$\mu_{Tsj}(x_j) = \begin{cases} 1 & ; x_j = T_{sj} \\ 0 & ; x_j \neq T_{sj} \end{cases} \quad (5)$$

［文字列，実数の場合］

$$\mu_{Tsj}(x_j) = \begin{cases} 1 & ; x_j \in T_{sj} \\ 0 & ; x_j \notin T_{sj} \end{cases} \quad (6)$$

BB の初期ノードのデータ bx_j を KB に適用して，ファジィ推論の結果 Y^* を次のように得る．

$$\mu_s = \mu_{Ts1}(x_1) \wedge \mu_{Ts2}(x_2) \wedge \cdots \wedge \mu_{Tsn}(x_n)$$
$$\mu_x = \mu_{bx1}(x_1) \wedge \mu_{bx2}(x_2) \wedge \cdots \wedge \mu_{bxn}(x_n)$$
$$Y^* = \max_s \max_{x_1,\cdots,x_n} (\mu_x \top (\mu_s \rightarrow \mu_{Fs}(y))) \quad (7)$$

ただし，$\top$ は min，限界積等の5種類の T-ノルム，→は Mamdani，Godel 等の6種類の含意演算を表す．

式 (7) は含意演算 → が式 (7) の T-ノルムと一致する場合には，次のようになる．

$$\mu_s' = \mu_{Ts1}(bx_1) \top \mu_{Ts2}(bx_2) \top \cdots \top \mu_{Tsn}(bx_n)$$
$$Y^* = \max_s (\mu_{Fs}(y) \top \mu_s') \quad (8)$$

ここで，bx_j は BB の初期ノードのデータである．bx_j が文字列，および実数の場合には，メンバシップ関数 $\mu_{Tsj}(x_{ij})$ は式 (5)，および式(6) を用いる．また，初期ノードのデータが区間の場合には次のように定義する．

$$\mu_{Tsj}(bx_j) = \begin{cases} 1 & ; bx_j \subseteq T_{sj} \\ 0 & ; bx_j \not\subseteq T_{sj} \end{cases} \quad (9)$$

ただし，T_{sj} が文字列，実数値の場合で，bx_j が区間の場合は，メンバシップ関数 $\mu_{Tsj}(x_{ij})$ は unknown として，$\mu_{Tsj}(bx_j)=0$ を与える．

3）KB の action_rule 部では一つの推論ルールのみを実行する．実行するルール s^* は推論を継続するためのしきい値を θ_{it} とすると式 (8) を用いて，$\mu_s' \geq \theta_{it}$ を満足する推論ルールの中で，最もルール番号の小さい推論ルールとする．

4）多段推論の終了の判定を行う．推論終了は次の3通りである．

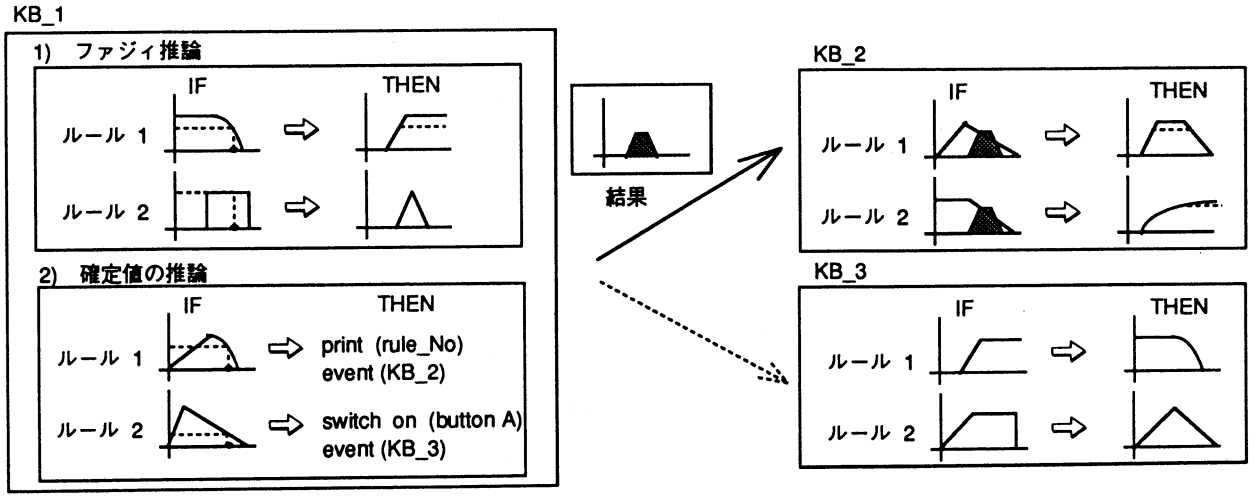


図2　多段推論過程の概念図

i) 解あり終了：CKB での適合度が θ_{rt} 以上となった場合．ただし，θ_{rt} は推論を終了するためのしきい値である．

ii) 解なし終了：すべての KB の推論を実行しても θ_{rt} 以上を満足する推論結果が得られなかった場合．

iii)強制終了： action_rule 部の後件部の停止命令(stop)が実行された場合．

5) 選択された推論ルール s' の後件部の action 命令を実行する．action 命令により，BB のノードの新規作成(create_node)，ノード追加(add_node)，およびカレントノードのコピーの追加(addcopy_node)等ができる．これらの action 命令により，推論結果をカレントノードに書き込み，カレントノードを変更する．推論結果を関数 defuzzification により求めた重心計算後の確定値とし，ノードに書き込むこともできる．また，イベント発生命令(event)により次の KB を指定する．

6) イベントが発生されない場合は default 部の event 命令により次の KB を指定する．

7) イベント発生に従い，次の KB へ行く．次の KB では，4) で書き込んだノードの内容を参照して，推論を継続する．

以下，2)～7) を繰り返して，多段推論を実行する．

なお，ファジィ推論の合成演算(composition)，含意演算(implication)，推論継続しきい値 θ_{it} (implication_threshold)，推論停止しきい値 θ_{rt} (finish_threshold)等はメタ知識用の KB で設定できる．また，fuzzy_rule，action_rule の記述順序は任意であり，この前後にユーザが作成した C 言語の文を挿入できる．

図2では，KB_1 でのファジィ推論が実行され，ファジィ数の推論結果が得られる．そして，KB_1 の確定値推論が実行され，$\mu_{rule1} \geq \mu_{rule2}$ からルール1が選択され，ルール1の後件部の event(KB_2) が実行され，次の KB として，KB_2 が選択されている．

4．探索機能

従来の確定値の推論シェルでは最適な推論過程を得るために，各種の探索手法を備えている．探索手法には横型探索法や縦型探索法以外に，評価関数を用いて推論のやり直しを行う最適解探索や最良優先探索などがある．本論文では横型探索法以外に，CKB を用いて評価値が良くなる方向に推論をやり直す機能（バックトラッキング機能）を持つ評価値最良探索法を提案する．

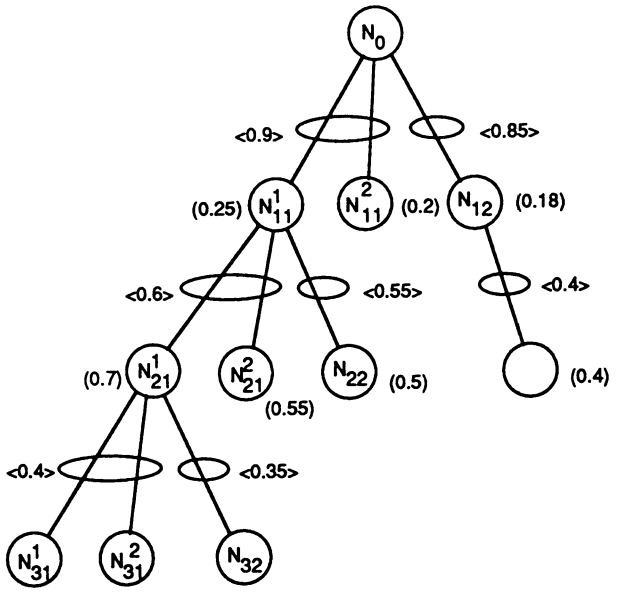


図3　バックトラック機能

図3に推論におけるノード発生の探索木を示す．確定値の推論により発生するノードを記号○で囲み，ノード N_{ps}^q (p=1,2,…,k，s=1,2,…,m，q=1,2,…,t) は第 p 段目の KB における第 s 番目に発火する確定値推論ルールの第 q 個目の action 命令により形成されたノードを示す．また，図中のノードとノードとを結ぶリンクは推論ルールを表現し，リンク上につけられた記号○は一つの推論ルールを表現している．

図3を用いて横型探索法と評価値最良探索法を説明する．

横型探索法とは探索木の浅い箇所から，同レベルの深さの状態を優先的に探索する方法である．図3の例では，

$$N_0 \rightarrow N_{11}^1 \rightarrow N_{11}^2 \rightarrow N_{12} \rightarrow N_{21}^1 \rightarrow N_{21}^2 \rightarrow N_{22} \rightarrow \cdots \qquad (10)$$

の順序に探索する．

横型探索法は探索木の上から順に探索する全探索の手法であるので，最適解を求めることができる．しかし，横型探索法は探索した各状態で，次にどのような操作が可能かを記憶しておく必要があり，記憶容量を多く使用するので，複雑な問題には適していない．

一方，評価値最良探索法は CKB を用いて推論結果を評価しながら，バックトラックを繰り返し，多段推論の最適解を発見する探索法である．

いま，第 p 段目の KB における第 s 番目に発火する確定値推論ルールの第 q 個目の action 命令により，ノード N_{ps}^q が形成された場合を考える．評価値最良探索法により，最適な推論過程を求める手順は次のようになる．

1) すべての ノード N_{ps}^q，q=1,2,…,t に対して，CKB を適用して推論結果の評価を行い，その推論結果の評価値 $C(N_{ps}^q)$ が大きい順に t 個の action 命令を並べ換える．この並び換えた t 個の action 命令に改めて {1,2,…,q,…,t} の順序をつける．

$$C(N_{ps}^1) \geq C(N_{ps}^2) \geq \cdots \geq C(N_{ps}^t) \qquad (11)$$

$C(N_{ps}^1)$ が $C(N_{ps}^1) \geq \theta_{rt}$ を満足する場合は，満足する解が得られたとして，第 p 段目で探索を終了する．満足しない場合は，次のステップに進み推論を継続する．

2) ノード N_{ps}^1 の結果を第 p+1 段目の KB に入力する．第 p+1 段目の KB の $\mu_s' \geq \theta_{rt}$ を満足する推論ルール中の最も番号の小さい第 s' 番目の確定値推論ルールが発火し，後件部の action 命令が実行される．action 命令がノードへの書き込み命令の場合には，新しいノード $N_{p+1s'}^{q'}$ が形成される．このとき，次の条件を満足する場合は，多段推論の推論過程が正しいとしてバックトラックせずに 1) に戻り，そのまま推論を継続する．

$$\mu_{p+1s^*} \geq \theta_{it} \qquad (12)$$

ただし，μ_{p+1s^*} は第 p+1 段目の KB の第 s' 番目の確定値推論ルールの前件部の適合度である．

一方，式 (12) を満足しない場合は，バックトラックを行い推論をやり直す．バックトラック先として，第 p 段目の KB における第 s 番目に発火する確定値推論ルールの中で，$C(N_{ps}^2)$ の評価を持つ action 命令を選択する．

3) ステップ 1) と 2) とを繰り返す．

図3を用いて評価値最良探索による推論過程の探索を示す．ただし，< > の数値は μ_{ps} を示し，( ) の数値は $C(N_{ps}^q)$ を示す．また，θ_{it}=0.5，θ_{rt}=0.8 としている．まず，

$$N_0 \rightarrow N_{11}^1 \rightarrow N_{21}^1 \rightarrow N_{31}^1 \qquad (13)$$

の順序に従って推論を実行する．しかし，$N_{21}^1 \rightarrow N_{31}^1$ を実行する確定値推論ルールは式 (12) を満足しないので，バックトラックが実行され，$N_{11}^1 \rightarrow N_{21}^2$ を実行する．結局，推論過程は

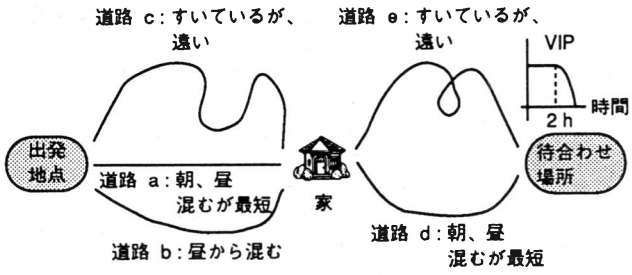


図4　渋滞回避問題の道路ルート

$$N_0 \rightarrow N_{1\,t}{}^{1} \rightarrow N_{2\,t}{}^{1} \qquad (14)$$

となる.

5. 例題

多段型ファジィ推論シェルの推論機能，および評価値最良探索機能の有用性を示すために，簡単な渋滞回避問題の例題を取り上げる.

図4に渋滞回避問題の一例を示す．車を運転するドライバーが家を経由して，待ち合わせ場所で待つ VIP に会いに行く．ただし，出発地点から家までは3通りの道路があり，家から待ち合わせ場所までは2通りの道路がある．出発地点から家まで，および家から待ち合わせ場所までの各道路では多段型ファジィ推論により渋滞時間が決定される．多段推論の入出力変数を次のようにする.

第1段目のファジィ推論	
入力変数	出力変数
時間 降水確率	渋滞度合
第2段目のファジィ推論	
入力変数	出力変数
渋滞度合 運転技術	渋滞時間

例えば，国道 a では，第1段目のファジィ推論ルールとして，「IF 時間が 朝で，かつ降水確率が大きい THEN 道路 a は非常に混む」等の推論ルールが設定されている.

ここでは，次の2条件を満足する最適な道路を選択する問題を解く.

1）なるべく渋滞を避ける．すなわち，渋滞時間が最短な道路を選択する.

2）2時間後の待ち合わせに，できるだけ間に合うように行く.

上記の2条件を CKB に記述する．ただし，CKB では，1）の条件を評価関数を用いて評価し，2）の条件は VIP の待ち状態を表すメンバシップ関数の度合に基づいて評価する.

例題を解くための諸条件を次に示す.

1）推論ルール全体として，10個の KB（1個の CKB を含む），50個の fuzzy_rule，および17個の action_rule を設定する.

2）推論継続基準値 θ_{it}=0.01，推論停止基準値 θ_{rt}=0.8 とする.

多段型ファジィ推論の機能により，各道路の渋滞度合，および渋滞時間を推論し，評価値最良探索機能により，渋滞時間の最短な最適道路を選択して，VIP に会える度合を評価する.

道路 a，b，c の渋滞時間の結果を図5に示す．第1段目のファジィ推論を実行し，時間と降水確率から渋滞度合を推論する．渋滞度合の値が最も小さい道路 c が CKB の評価関数を用いて

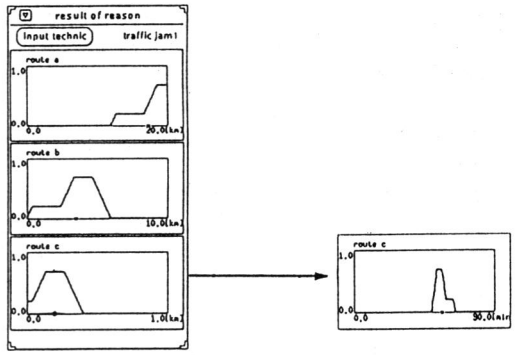


図5　多段型ファジィ推論の結果

選択される．CKB での評価関数は結果のファジィ数の重心値を計算して，その値が最小値となる道路を選択する．道路 c での渋滞度合が最も小さいので，道路 c に関して渋滞度合と運転技術の入力値から第2段目のファジィ推論を実行し，渋滞時間 56 分を推論する．同様にして，道路 d，e に関して多段型ファジィ推論を実行する．結果として，

道路 c → 家 → 道路 e　　(15)

を選択し，全体の所要時間 133.7 分を得る．CKB での評価関数（メンバシップ関数）を用いて VIP に会える度合を計算し，0.05 を得る．CKB での評価値は，

$$\theta_{rt}=0.8 > 0.05 \qquad (16)$$

となるので，多段推論は終了せず推論を継続する.

しかし，ここでの例題は2種類の道路を選択する問題であり，道路 e の選択後の推論ルールは存在しない．推論を継続できないので，次の推論ルールの前件部の適合度を μ=0 としている．したがって，

$$\mu=0.0 < \theta_{it}=0.01 \qquad (17)$$

から，バックトラックが発生して，道路 e を選択する代わりに，

道路 c → 家 → 道路 d　　(18)

とする．全体の所要時間 129.1 分を得る．同様な操作を繰り返し，次の最終的な推論結果を得る.

［選択する道路］
　道路 c → 家 → 道路 d
［所要時間・VIPに会う度合］
　所要時間 = 119.8 分,　　VIPに会う度合 = 0.99

5. おわりに

多段型ファジィ推論シェルの多段推論のアルゴリズム，および評価値最良探索による推論機能について述べた．本論文で述べた機能以外に，多段型ファジィ推論シェルは推論結果の表示やルックアップテーブルを作成する機能等を備えている．今後，実証システムに適用し，その有用性を確認していきたい.

6. 参考文献

[1] 遠藤，石井：ファジィエキスパートシステム構築シェル，情報処理，Vol.30，No.8，pp.948-956（1989）

[2] 山崎：ファジィ制御用汎用システムの動向，計測と制御，Vol.28，No.11，pp.964-969（1989）

[3] 林，野村，内藤，若見，馬野：黒板モデルによる多段推論を実現したファジィ推論シェル，情報処理学会第40回全国大会予稿集，pp.43-44（1990）

SB3-3

多段型ファジィ推論シェルの構築

－ ウィンドウシステムを用いたユーザインターフェース －

Multi-Step Fuzzy Reasoning Shell
- Visual User-interface through Window System -

山崎 久代 Hisayo YAMASAKI, 野村 博義 Hiroyoshi NOMURA, 貞平 匡史 Masafumi SADAHIRA, 林 勲 Isao HAYASHI, 若見 昇 Noboru WAKAMI

松下電器産業（株） 中央研究所
Central Research Laboratories, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

We propose multi-step fuzzy reasoning shell that can do multi-step fuzzy reasoning. In this paper, visual user-interface through window system in multi-step fuzzy reasoning shell is introduced. This visual user-interface includes membership function editing block, rule editing block, graph displaying block, look up table creating block. User can determine membership functions and interence rules using visual user-interface.

1. はじめに

専門家の持つ知識をIF～THEN…形式のファジィ推論ルールに記述して、ファジィ推論を実現するファジィ推論シェルの開発が行われている[1][2]。これらのファジィ推論シェルは、メンバーシップ関数やルールを容易に作成でき、推論結果の表示やメンバーシップ関数等のエディティング機能もすぐれている。また、推論ルールに動作としてのLispの関数を自由に記述できるシステムがある[3]。我々はすでに黒板モデルを用いて、ファジィ推論の多段化を可能にする多段型のファジィ推論シェルを提案した[4]。

本論文では、多段型ファジィ推論シェルのユーザインターフェースを提案する。提案するユーザインターフェースは、メンバーシップ関数編集部、ルール編集部、グラフ表示部、ルックアップテーブル作成部からなり、これらの各モジュールはウィンドウシステムを用いている。ウィンドウシステムを用いたユーザインターフェースにより、メンバーシップ関数や推論ルールの作成が容易にできる。メンバーシップ関数は、マウスによる作成及びパラメータによる作成が可能である。また、ルールの記述・編集は複数個の知識群に分類して行う。推論結果はグラフとして表示され、多段推論の入力と出力との関係をルックアップテーブルとして作成することもできる。本論文では、多段型ファジィ推論シェルのユーザインターフェースについて、機能と使用方法を中心に説明する。

2. 実行方式

図1に、多段型ファジィ推論シェルの実行形式のファイルを生成する過程を示す。ユーザは、推論ルールを多段型ファジィ推論シェル独自の記述言語で記述する。推論ルールには、ユーザの作成したC言語プログラムも記述できる。記述した推論ルールは、トランスレータにより、C言語のプログラムに自動変換され、コンパイル後、システム本体とリンクされる。したがって、自動的に実行形式のファイルが生成されるので、ユーザは専門的なプログラミングに関する知識がなくてもファジィ推論ルールを作成できる。

開発したファジィ推論シェルは、Solbourne ワークステーション、Sun ワークステーション上で稼動し、ウィンドウシステムとしてX Windowを用いる。

3. ユーザインターフェース

多段型ファジィ推論シェルは、メンバーシップ関数の編集、ルールの編集、グラフの表示、ルックアップテーブルの作成を行う4つのウィンドウを持つ。図2に各ウィンドウを表示するファジィ推論シェルの初期メニューウィンドウを示す。ここでは、4つのウィンドウの機能と使用方法を説明する。

3.1 メンバーシップ関数編集ウィンドウ

メンバーシップ関数編集ウィンドウは、キーボードからの入力だけでなくマウスによる簡単な操作により、メンバーシップ関数の作成・編集が可能である。図3にメンバーシップ関数作成ウィンドウを示す。

図3のメンバーシップ関数は、ファジィ命題"error = NS"のNSを表している。メンバーシップ関数の変数"error"は、初期メニューウィンドウから発生する"select variable" ウィンドウのファジィ変数の一覧表から選択する。また、ファジィラベル"NS"は、"select variable" ウィンドウから発生する"select label"ウィンドウによって指定で

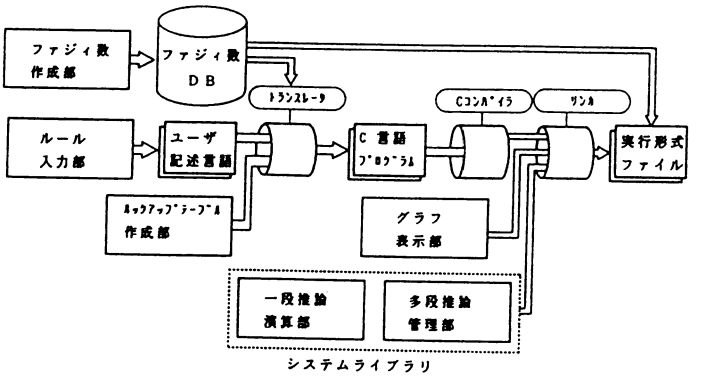


図1 実行形式ファイルの生成過程

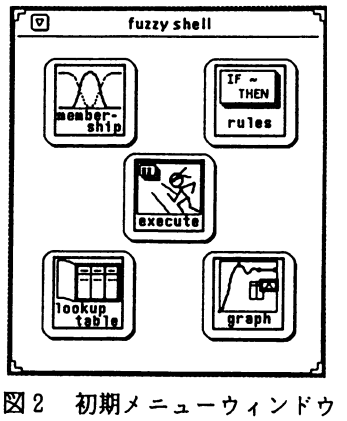


図2 初期メニューウィンドウ

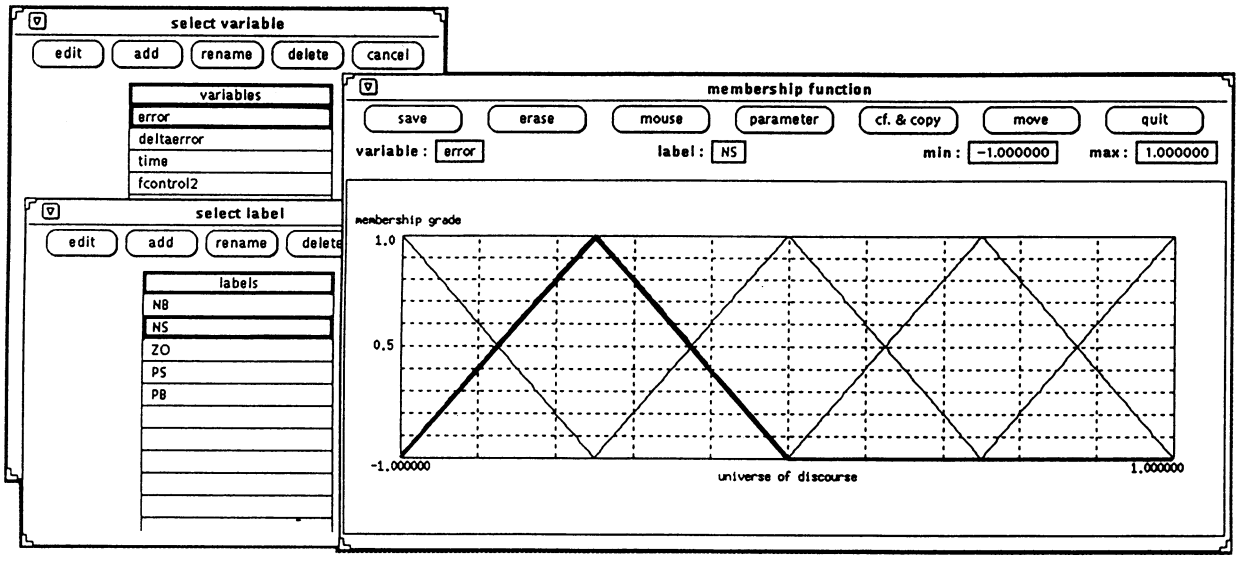


図3　メンバーシップ関数編集ウィンドウ

きる。ただし、ウィンドウの指定、ファジィ変数名及びファジィラベルの選択は、マウスを用いたクリック選択や[edit]コマンドのクリック実行により、実行される。以下、本論文ではコマンドボタンを[ ]で表す。

"membership function" ウィンドウは、作成・修正中のメンバーシップ関数を太い実線で描写する。同じファジィ変数であるが他のファジィラベルは細線で示される。図3では、ファジィ変数"error"のファジィラベルNB, ZO, PS, PBの4種類のメンバーシップ関数が示されている。

"membership function"ウィンドウの上部にある[save][erase]等の7つのコマンド実行ボタンについて、その機能を以下に述べる。

・[save]
　実線のメンバーシップ関数をウィンドウ上部にある変数名ラベルとしてファジィ数データベースファイルに格納する。

・[erase]
　実線のメンバーシップ関数を消去する。

・[mouse]
　メンバーシップ関数をマウスを用いて作成する。マウスを用いて画面上の数カ所をクリックすることにより、その各点を直線で結合してメンバーシップ関数を作成する。図4に"error = NS"のメンバーシップ関数を修正した例を示す。

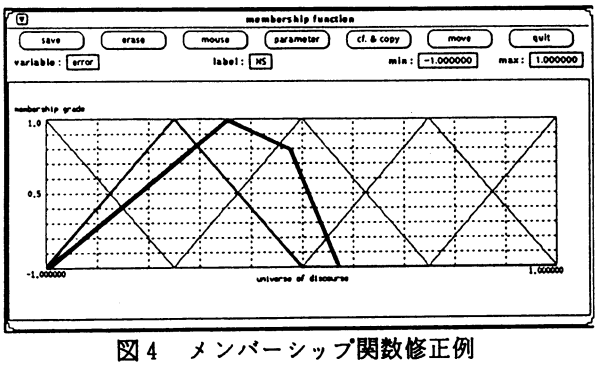


図4　メンバーシップ関数修正例

・[parameter]
　マウスを用いてメンバーシップ関数を作成するのではなく、メンバーシップ関数を座標の設定、もしくはLR型ファジィ数のパラメータ設定により作成する。三角型、π型、z型、s型、台形型、シングルトンのメンバーシップ関数をサポートする。シングルトンはメンバーシップ値が1を達成する横軸の座標値を設定する。台形型のメンバーシップ関数は、頂点の4座標を入力する。また、三角型、π型、z型、s型は関数の一部としてLR型ファジィ数を用いる。LRファジィ数は、DuboisとPrade[5]によって提案され、次の3条件を満足する関数L(R)から構成される。

$$(\ i)\quad L(x) = L(-x) \qquad (1)$$

$$(ii)\quad L(0) = 1 \qquad (2)$$

(iii)　L(x)は、$X \geqq 0$ で単調減少　(3)

ここでは、LR型ファジィ数として、

$$L(x) = \max(\ 0,\ 1-|x|^{p}) \qquad (4)$$

を用いる。例えばp=1 とすると三角型が構成できる。

・[cf.&copy]
　同じファジィ変数の他のファジィラベルのメンバーシップ関数の参照を行う。また、参照したメンバーシップ関数を編集中のファジィ変数のファジィラベルとして複写できる。

・[move]
　既にファイルに格納されているメンバーシップ関数の形状を左右の任意の位置に移動する。移動距離を設定し、左右のどちらに移動するか指定する。例えば図4の太線のメンバーシップ関数を[move]により0.5 だけ右に移動すると、ファジィラベルZOのメンバーシップ関数とかさなる。

・[quit]
　メンバーシップ関数の編集を終了する。

3.2　ルール編集ウィンドウ

ルール編集ウィンドウはユーザが推論ルールを作成するために用いるブラウザである。多段型ファジィ推論シェルは、推論ルールを複数個の知識群に分割して推論を実行する。

多段型ファジィ推論は、一般のファジィ推論の結果を黒板と呼ばれる一時記憶メモリに格納し、その黒板の内容を次の知識群のファジィ推論ルールに入力して、多段推論を実行する。次の知識源の指定は確定値の推論ルールによって行う。ここで、知識群を知識源(KB)と呼ぶ。ルール編集ウィンドウは各知識源ごとに発生する。図5に"fuzzy_control" という知識源を示す。この知識源は初期メニューウィンドウの"rules" をマウスによりクリック選択し、その結果発生する"select edit part" ウィンドウの[knowledge block][fuzzy_control] を[edit]することによって作成

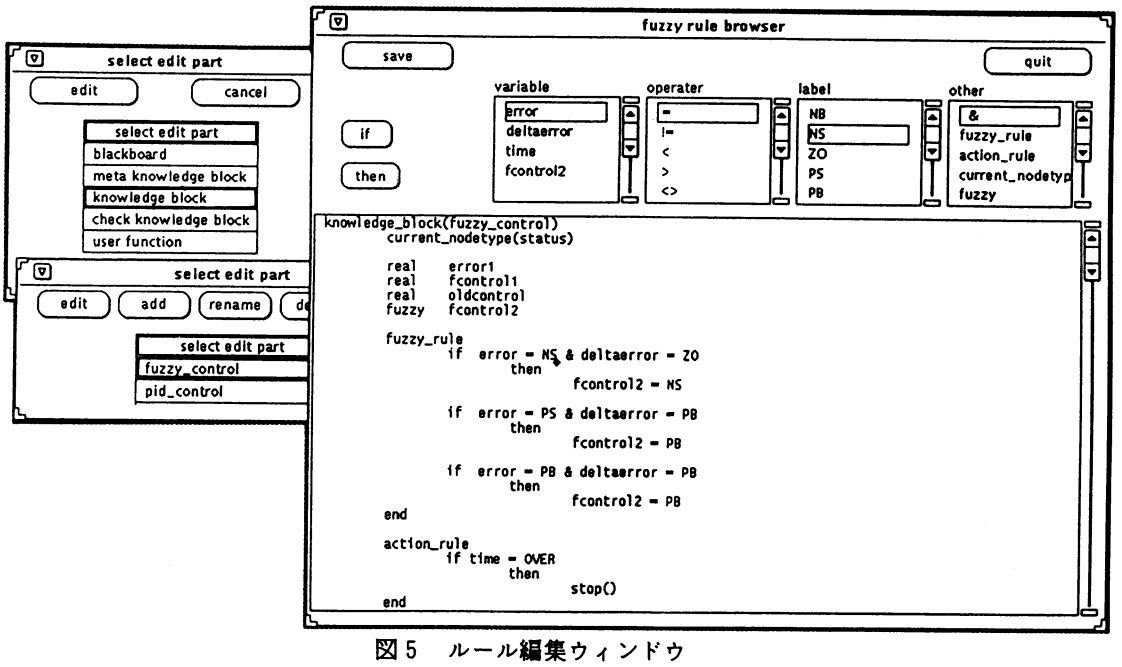


図5　ルール編集ウィンドウ

される。

図5の"fuzzy rule browser"では、知識源の名前（knowledge_block(fuzzy_control)）、黒板の名前（current_nodetype(status)）、及び使用する変数の型定義を宣言した後に、ファジィ推論ルールと確定値の推論ルールを記述する。ファジィ推論ルールは、次の形式で記述する。

```
fuzzy_rule
      if   ·····················
           then                          (5)
             ·····
end
```

また、確定値の推論ルールは、

```
action_rule
      if   ·····················
           then                          (6)
             ·····
end
```

の形式で記述する。例えば図5のファジィ推論ルールの第1番目のルールは、「制御偏差が負で小、制御偏差の1階差分が零ならば、操作量を負で小にせよ」を表す。

"fuzzy rule browser"ウィンドウの上部には、ルールをファイルに格納するためのコマンドとして[save]を、またルール編集ウィンドウを消去するためのコマンドとして[quit]を配置する。

ユーザは"fuzzy rule browser"ウィンドウの上部の推論ルール作成用のコマンドボタンをクリックすることにより、推論ルールを選択して、作成することができる。コマンドボタンの機能を説明する。

1)if
　推論ルールを作成する場合の前件部の選択ボタンである。

2)then
　推論ルールを作成する場合の後件部の選択ボタンである。

3)variable
　推論ルールの作成時に用いる前件部、及び後件部のメンバーシップ関数の変数を表示する。図4では、error,deltaerror,time,fcontrol2 が表示され、error を選択している。

4)operater
　前件部、及び後件部で作成する命題"x * y" の変数x とy との関係* を作成するコマンドボタンである。例えば、x としてerror、yとしてPB、関係* として"=" を選択すると、"error = PB"のファジィ命題が作成できる。

5)label
　推論ルールの作成時に、前件部、及び後件部のファジィラベルを選択・作成するために用いる。図4では、ファジィ変数error のファジィラベルNB,NS,ZO,PS,PB が表示されている。

6)other
　ファジィ推論ルール、及び確定値の推論ルールを作成するために用いる指定言語を選択・作成するためのコマンドボタンである。例えば、ファジィ推論ルールの開始行を指定するfuzzy_rule等を登録している。

次に、1)～6)の各種のコマンドボタンを用いて、図5のファジィ推論ルールの第1番目の推論ルールを作成する例を示す。

手順1）[if]をクリック選択し、ファジィ推論ルールの前件部を指定する。
手順2）variableから"error" を、operaterから"=" を、label から"NS"をクリック選択する。また、other から"&" をクリック選択する。
手順3）variableから"deltaerror"を、operaterから"=" を、label から"ZO"をクリック選択する。
手順4）[then]をクリック選択し、ファジィ推論ルールの後件部を指定する。
手順5）variableから"fcontrol2"を、operaterから"=" を、label から"NS"をクリック選択する。

3.3　グラフ表示ウィンドウ

グラフ表示ウィンドウは、黒板の推論の途中結果を表示する。グラフ表示ウィンドウは、推論の結果を表示するウィンドウであるので、推論ルールの内容により、その表示形態が異なる。ここでは、PID 制御とファジィ制御を用いた1次遅れ系の制御用グラフ表示ウィンドウを例にして説明する。

時刻0.0 で目標値0.0 から1.0 に変更した場合のステップ応答に対して、25個のファジィ制御ルールによる推論結果と、PID 制御の結果を図6に示す。図6では、X 軸として時間、またY 軸は出力結果を示し、実線がPID 制御の結果、破線がファジィ推論の結果を示す。グラフ上にプロットされた●印は各サンプル時間での出力値を示す。

制御用グラフ表示ウィンドウでは、●印をマウスを用い

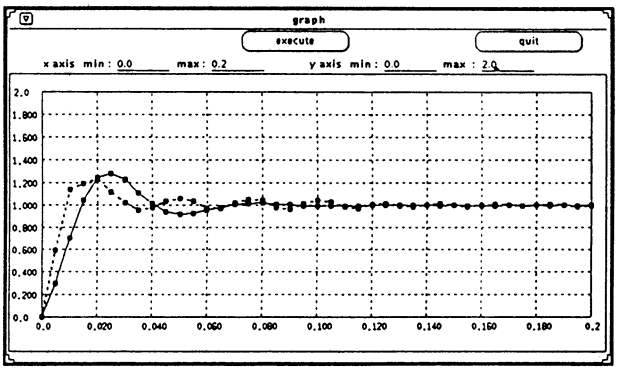


図6　グラフ表示ウィンドウ

てクリック選択すると、図7の"node"ウィンドウが開く。"node"ウィンドウでは、●印のサンプル時間でのファジィ推論の結果が表示される。ファジィ推論の結果は、黒板の形式を用いて表示され、図7では、timeが0.001 の時、speedは0.709923 であり、control は0.862934となっている。また、変数がファジィ型である場合は、ファジィ型であることを示す[fuzzy] のコマンドボタンをクリックすることにより、結果のメンバーシップ関数が表示される。図7では、fcontrolの結果のメンバーシップ関数を示している。

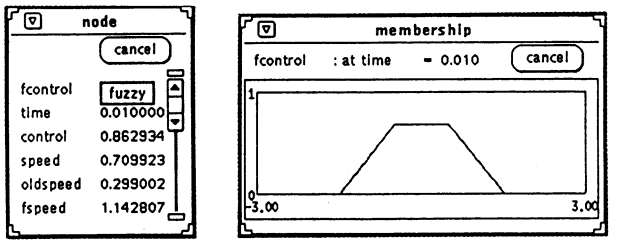


図7　ファジィ推論の結果の表示

グラフ表示ウィンドウを用いて、ファジィ推論の結果を参照しながら、ファジィ推論ルールやメンバーシップ関数を微調整することができる。例えば、ユーザがファジィ制御の応答の立ち上がりを「より速く」制御したいとする。この場合、図7のファジィ推論の結果のメンバーシップ関数を参照することにより、このメンバーシップ関数の中心値を右に移動して、台集合を小さくすれば、操作量がより大きくなることがわかる。したがって、図7の推論結果のメンバーシップ関数を導出する推論ルールの前件部、及び後件部のファジィ変数、ファジィラベル等をメンバーシップ関数表示ウィンドウを用いて微調整すれば結果が改善できる。

3．4　ルックアップテーブル作成ウィンドウ

ルックアップテーブル作成ウィンドウは推論ルールの入力データと、多段型ファジィ推論の出力との対応表であるルックアップテーブルを作成する。ルックアップテーブル中の入力値に対応する出力値を参照することにより、多段型推論の結果が得られるので、高速な多段型のファジィ推論が可能である。また、多段推論の過程を必要としないので、低メモリ化が実現でき、ルックアップテーブルの家電機器、AV機器等への民生用機器の搭載が可能となる。

ルックアップテーブルの作成方法を以下に説明する。ルックアップテーブル作成用ウィンドウを図8に示す。ウィンドウには、多段型ファジィ推論で用いた入出力変数が表示される。図8ではコマンドボタン[in]をクリックすることにより、eroor とdeltaerrorとを入力変数として、また、コマンドボタン[out] をクリックすることにより、control を出力変数として指定している。入力データを入力して、多段型ファジィ推論を実行する。入力データは、一定区間値を細分化して作成する。例えば、図8の入力変数errorは、-1.0から1.0 まで、step0.1 でデータを作成するので、入力データは、-1.0,-0.9,・・・・,0.9,1.0となる。

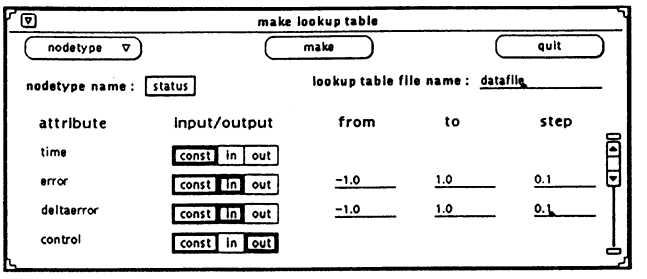


図8　ルックアップテーブル作成ウィンドウ

多段型ファジィ推論を実行して、ルックアップテーブルを作成する。作成したルックアップテーブルは、ファイルに格納する。図8では作成したルックアップテーブルをdatafileというファイルに格納している。表1にdatafileのルックアップテーブルを示す。

表1　ルックアップテーブル

入力		出力
error	deltaerror	control
-1.0	-1.0	1.28
-1.0	-0.9	1.25
-1.0	-0.8	1.08
・・・・・・	・・・・・・	・・・・
-0.9	-1.0	1.27
-0.9	-0.9	1.11
・・・・・・	・・・・・・	・・・・

4．おわりに

多段型ファジィ推論シェルのウィンドウシステムを用いたユーザインターフェースについて、その機能、有用性を述べた。多段型ファジィ推論シェルは、ファジィ推論ルールを容易に作成して、多段推論を実行するためのツールである。ツールとしてのシェルの有用性を決める一つの要因としてユーザインターフェース機能は重要であり、今後、このシェルを実用的なシステムの開発に適用して、その有用性を議論する必要がある。

5．参考文献

[1]寺野，浅居，菅野（共編）：応用ファジィシステム入門，オーム社，pp157-217(1989)
[2]遠藤,石井：ファジィエキスパートシステム構築シェル，情報処理Vol.30,No.8，pp948-956(1989)
[3]馬野：ファジィ・プロダクション・システムとその実現，計測自動制御学会 関西支部シンポジウム「あいまい情報処理と知的システム制御」,pp.75-80(1988)
[4]林，野村，他：黒板モデルによる多段推論を実現したファジィ推論シェル，情報処理学会第４０回全国大会講演論文集，pp.43-44(1990)
[5]Didier Dobois, Henri Prade: FUZZY SETS AND SYSTEMS, ACADEMIC PRESS, pp53-57(1980)

問い合わせ先：〒570　大阪府守口市八雲中町３－１５
松下電器産業（株）中央研究所
山崎　久代
TEL　06-906-4849
FAX　06-906-4594

SB4-1

ファジィ変数とファジィパラメータを含む多目的線形分数計画問題に対するパレート最適性

PARETO OPTIMALITY FOR MULTIOBJECTIVE LINEAR FRACTIONAL PROGRAMMING PROBLEMS WITH FUZZY DECISION VARIABLES AND FUZZY PARAMETERS

坂和正敏　広島大学工学部第２類計数管理工学講座
Masatoshi SAKAWA　Department of Industrial and Systems Engineering
Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 724 Japan
矢野　均　名古屋市立女子短期大学
Hitoshi YANO　Nagoya Municipal Women's College, Nagoya 464 Japan

In this paper, we consider multiobjective linear fractional programming problems involving both fuzzy parameters and fuzzy decision variables. Using the four indices for ranking two fuzzy numbers, four types of feasibility and Pareto optimality are defined and the relationships among them are examined. These concepts can be viewed as quite generalized versions of the well-known feasibility and Pareto optimality concepts, and the generalized fuzzy Pareto optimal solutions may be obtained on the basis of the simplex method of linear programming.

１．まえがき

ファジィパラメータを含む多目的線形および線形分数計画問題を取り扱うために、坂和・矢野[4,5,7]は、ファジィ数間の大小関係を定義するためにDuboisら[1,2]の導入した4種類の指標に基づいて、それぞれ、4種類のα実行可能性と4種類のγパレート最適性の概念を導入した。また、α実行可能性とγパレート最適性を同時に考慮した(α,γ)パレート最適解の概念を定義するとともに、(α,γ)パレート最適解の集合のうちで、最も楽観的あるいは最も悲観的に考えた場合の(α,γ)パレート最適解の集合は、それぞれ、線形計画法により求められることを示した。

一方、田中ら[8]は、問題に含まれるパラメータのあいまいさを反映して、どれぐらいあいまいな決定を行うことができるかを明らかにするため、決定変数がファジィ変数で表され、ファジィ変数にかかる係数は非ファジィな通常の数であるような線形制約条件のもとで、ファジィ変数のあいまいさを最大にするような問題を線形計画問題として定式化した。

このような状況のもとで、本論文では、特に、ファジィ変数とファジィパラメータを含む多目的線形分数計画問題に対して、Duboisら[1,2]の導入した4種類の指標を用いて、それぞれ、4種類のファジィα実行可能性とファジィγパレート最適性の概念を導入し、ファジィα実行可能性とファジィγパレート最適性を同時に考慮したファジィ(α,γ)パレート最適解の概念を定義する。定義したファジィ(α,γ)パレート最適解の集合の中で、最も楽観的あるいは最も悲観的に考えた場合のファジィ解集合は、通常の多目的線形分数計画問題のパレート最適解として求められる。

２．ファジィ変数とファジィパラメータを含む多目的線形分数計画問題

本論文では、決定変数がファジィ変数として表される、次のようなファジィパラメータを含む多目的線形分数計画問題について考察する。

$$\min \ (\tilde{P}_1(\tilde{x})/\tilde{Q}_1(\tilde{x}), \ldots, \tilde{P}_k(\tilde{x})/\tilde{Q}_k(\tilde{x}))$$
$$\text{subject to } \tilde{x} \in \tilde{X} \qquad (1)$$

$$= \{\tilde{x} \in F(R^n) \mid \tilde{a}_j \circledast \tilde{x} \leq \tilde{b}_j, j=1,\ldots,m\}$$

ただし、

$$\tilde{P}_i(\tilde{x}) = \tilde{c}_i \circledast x + \tilde{c}_{i,n+1}, \quad \tilde{Q}_i(\tilde{x}) = \tilde{d}_i \circledast x + \tilde{d}_{i,n+1} \qquad (2)$$

ここで、⊛はファジィ数間の積演算を、$F(R^n)$は台集合が非負であるファジィ数のn次元ベクトルの集合を、また、$\tilde{x}$, $\tilde{c}_i$, $\tilde{d}_i$, $\tilde{a}_j$は、それぞれファジィ数のn次元ベクトル

$$\tilde{x} = (\tilde{x}_1, \ldots, \tilde{x}_n)^T, \qquad (3)$$
$$\tilde{a}_j = (\tilde{a}_{j1}, \ldots, \tilde{a}_{jn}), \ j=1,\ldots,m \qquad (4)$$
$$\tilde{c}_i = (\tilde{c}_{i1}, \ldots, \tilde{c}_{in}), \ i=1,\ldots,k \qquad (5)$$
$$\tilde{d}_i = (\tilde{d}_{i1}, \ldots, \tilde{d}_{in}), \ i=1,\ldots,k \qquad (6)$$

で、$\tilde{x}_\ell$, $\tilde{c}_{i\ell}$, $\tilde{a}_{j\ell}$, $\tilde{b}_j$は、それぞれ、次のようなメンバシップ関数で定義されるL-Lファジィ数[1]であると仮定する。

$$\mu_{\tilde{x}_\ell}(x_\ell) = L(|x_\ell - x_\ell^m|/x_\ell^s) \qquad (7)$$
$$\mu_{\tilde{a}_{j\ell}}(a_{j\ell}) = L(|a_{j\ell} - a_{j\ell}^m|/a_{j\ell}^s) \qquad (8)$$
$$\mu_{\tilde{b}_j}(b_j) = L(|b_j - b_j^m|/b_j^s) \qquad (9)$$
$$\mu_{\tilde{c}_{i\ell}}(c_{i\ell}) = L(|c_{i\ell} - c_{i\ell}^m|/c_{i\ell}^s) \qquad (10)$$
$$\mu_{\tilde{d}_{i\ell}}(d_{i\ell}) = L(|d_{i\ell} - d_{i\ell}^m|/d_{i\ell}^s) \qquad (11)$$

ここで、x_ℓ^m, $a_{j\ell}^m$, b_j^m, $c_{i\ell}^m$, $d_{i\ell}^m$は各メンバシップ関数の平均値、x_ℓ^s, $a_{j\ell}^s$, b_j^s, $c_{i\ell}^s$, $d_{i\ell}^s$は左右の広がりのパラメータを表す。また、L(.)は型関数[1]で、以下の性質を満たすものと仮定する。

(a) L(x)は[0,p]で定義される連続かつ強意単調減少関数。ここで、pはある正数。
(b) L(0) = 1, L(p) = 0.

この時、ファジィ数$\tilde{x}_\ell$, $\ell=1,\ldots,n$の台集合が非負であることから、次の関係が成立している。

$$x_\ell^m - L^{-1}(0)\, x_\ell^s \geq 0, \quad \ell=1,\ldots,n \qquad (12)$$

さらに、本論文では、簡単のため、ファジィ目的関数の分母・分子の台集合も非負であると仮定する。即ち、

$$[\tilde{P}_i(\tilde{x})]_\alpha > 0, \ [\tilde{Q}_i(\tilde{x})]_\alpha > 0 \qquad (13)$$

ところで、Duboisら[1,2]は、可能性・必然性の概念に基づいて、２つのファジィ数 $\tilde{m}$, $\tilde{n}$ に対して、次の4種類の指標を導入した。

$$Pos(\tilde{m}\geqq\tilde{n}) = \sup\{\min(\mu_{\tilde{m}}(u), \mu_{\tilde{n}}(v)) \mid u\geqq v\} \quad (14)$$

$$Pos(\tilde{m}>\tilde{n}) = \sup_{u}\{\inf_{v}\{\min(\mu_{\tilde{m}}(u), 1-\mu_{\tilde{n}}(v)) \mid u\leqq v\}\} \quad (15)$$

$$Nes(\tilde{m}\geqq\tilde{n}) = \inf_{u}\{\sup_{v}\{\max(1-\mu_{\tilde{m}}(u), \mu_{\tilde{n}}(v)) \mid u\geqq v\}\} \quad (16)$$

$$Nes(\tilde{m}>\tilde{n}) = \inf\{\max(1-\mu_{\tilde{m}}(u), 1-\mu_{\tilde{n}}(v)) \mid u\leqq v\} \quad (17)$$

ここで、Pos, Nesは Possibility, Necessityの省略形で、$\mu_{\tilde{m}}(u)$, $\mu_{\tilde{n}}(v)$はファジィ数$\tilde{m}$と$\tilde{n}$のメンバシップ関数を表す。

次の定理は、各指標がしきい値α以上で満たされるための必要十分条件が、ファジィ数$\tilde{m}$と$\tilde{n}$のαレベル集合の端点の大小関係により表されることを示している。

【定理１】

(Ⅰ) $Pos(\tilde{m}\geqq\tilde{n})\geqq\alpha \leftrightarrow m_{\alpha}^{R}\geqq n_{\alpha}^{L}$ (18)

(Ⅱ) $Pos(\tilde{m}>\tilde{n})\geqq\alpha \leftrightarrow m_{\alpha}^{R}\geqq n_{1-\alpha}^{R}$ (19)

(Ⅲ) $Nes(\tilde{m}\geqq\tilde{n})\geqq\alpha \leftrightarrow m_{1-\alpha}^{L}\geqq n_{\alpha}^{L}$ (20)

(Ⅳ) $Nes(\tilde{m}>\tilde{n})\geqq\alpha \leftrightarrow m_{1-\alpha}^{L}\geqq n_{1-\alpha}^{R}$ (21)

ここで、m_{α}^{L}, m_{α}^{R}, n_{α}^{L}, n_{α}^{R} は、ファジィ数 $\tilde{m}$, $\tilde{n}$ のαレベル集合の左右の端点を表す。

以下では、ファジィ変数とファジィパラメータを含む多目的線形分数計画問題(1)に対して、4種類の指標(14)-(17)に基づく、それぞれ4種類のファジィα実行可能性とファジィケパレート最適性を定義する。

３．ファジィα実行可能性

ファジィ変数$\tilde{x}_{\ell}$, ℓ=1,...,nを決定変数とする、ファジィパラメータを含む線形制約集合

$$\tilde{X} = \{\tilde{x}\in F(R^{n}) \mid \tilde{a}_{j}\circledast\tilde{x}\leqq\tilde{b}_{j},\ j=1,\ldots,m\} \quad (22)$$

に対して、Duboisらにより導入された4種類の指標(14)-(17)に基づく実行可能性を定義する[6]。

一般に、ファジィ数間の、拡張原理[3]に基づく積の演算により生ずるファジィ数のメンバシップ関数を陽に求めることは困難であるが、そのαレベル集合は、条件(12)のもとで、次の定理に示されるように陽に求めることができる[3]。

【定理２】

$$(\tilde{a}_{j}\circledast\tilde{x})_{\alpha} = [\sum_{\ell=1}^{n}\tilde{a}_{j\ell}\circledast\tilde{x}_{\ell}]_{\alpha} = [Y_{j\alpha}^{L}, Y_{j\alpha}^{R}] \quad (23)$$

ただし、

$$Y_{j\alpha}^{L} = \sum_{\ell=1}^{n}\{\min\{(a_{j\ell}^{m}-L^{-1}(\alpha)a_{j\ell}^{s})(x_{\ell}^{m}-L^{-1}(\alpha)x_{\ell}^{s}), (a_{j\ell}^{m}-L^{-1}(\alpha)a_{j\ell}^{s})(x_{\ell}^{m}+L^{-1}(\alpha)x_{\ell}^{s})\}\} \quad (24)$$

$$Y_{j\alpha}^{R} = \sum_{\ell=1}^{n}\{\max\{(a_{j\ell}^{m}+L^{-1}(\alpha)a_{j\ell}^{s})(x_{\ell}^{m}+L^{-1}(\alpha)x_{\ell}^{s}), (a_{j\ell}^{m}+L^{-1}(\alpha)a_{j\ell}^{s})(x_{\ell}^{m}-L^{-1}(\alpha)x_{\ell}^{s})\}\} \quad (25)$$

定理１において、$Y_{j\alpha}^{L}$, $Y_{j\alpha}^{R}$ に min, max の演算が含まれるのは、ファジィパラメータ $\tilde{a}_{j\ell}$ のαレベル集合の符号が正の場合と負の場合によって状況が異なるからである。しかし、一般に、$\tilde{a}_{j\ell}$の台集合は同符号と考えるのが妥当であると思われるので、以下では、$\tilde{a}_{j\ell}$の台集合の左右の端点は同符号と仮定して、次のような添字集合を定義する。

$$L_{1}(j) = \{\ell\in N \mid a_{j\ell}^{m}-L^{-1}(0)a_{j\ell}^{s} > 0\} \quad (26)$$

$$L_{2}(j) = \{\ell\in N \mid a_{j\ell}^{m}+L^{-1}(0)a_{j\ell}^{s} < 0\} \quad (27)$$

ここで、N = {1, 2, ..., n}. この時、(24), (25)は、関係式(12)と、添字集合$L_{1}(j)$, $L_{2}(j)$を用いて、次のように表現できる。

$$Y_{j\alpha}^{L} = \sum_{\ell\in L_{1}(j)}(a_{j\ell}^{m}-L^{-1}(\alpha)a_{j\ell}^{s})(x_{\ell}^{m}-L^{-1}(\alpha)x_{\ell}^{s}) + \sum_{\ell\in L_{2}(j)}(a_{j\ell}^{m}-L^{-1}(\alpha)a_{j\ell}^{s})(x_{\ell}^{m}+L^{-1}(\alpha)x_{\ell}^{s}) \quad (28)$$

$$Y_{j\alpha}^{R} = \sum_{\ell\in L_{1}(j)}(a_{j\ell}^{m}+L^{-1}(\alpha)a_{j\ell}^{s})(x_{\ell}^{m}+L^{-1}(\alpha)x_{\ell}^{s}) + \sum_{\ell\in L_{2}(j)}(a_{j\ell}^{m}+L^{-1}(\alpha)a_{j\ell}^{s})(x_{\ell}^{m}-L^{-1}(\alpha)x_{\ell}^{s}) \quad (29)$$

この時、4種類の指標(14)-(17)の適合度αを、$0\leqq\alpha\leqq1$の範囲内で適当に設定すれば、ファジィ制約集合(22)に対する、適合度αに依存した4種類のファジィ実行可能集合を、それぞれ、次のように定義することができる。

【定義１】（ファジィα実行可能性）

(Ⅰ) ファジィ制約集合(22)に対して、

$$\tilde{x}\in\tilde{X}_{UWF}(\alpha) = \{\tilde{x}\in F(R^{n}) \mid Pos(\tilde{a}_{j}\circledast\tilde{x}\leqq\tilde{b}_{j})\geqq\alpha,\ j=1,\ldots,m\} \quad (30)$$

のとき、$\tilde{x}\in F(R^{n})$はファジィα-Very Weak Feasible(ファジィα-VWF)であるという。

(Ⅱ) ファジィ制約集合(225)に対して、

$$\tilde{x}\in\tilde{X}_{MWF}(\alpha) = \{\tilde{x}\in F(R^{n}) \mid Pos(\tilde{a}_{j}\circledast\tilde{x}<\tilde{b}_{j})\geqq\alpha,\ j=1,\ldots,m\} \quad (31)$$

のとき、$\tilde{x}\in F(R^{n})$ はファジィα-Medium Weak Feasible(ファジィα-MWF)であるという。

(Ⅲ) ファジィ制約集合(22)に対して、

$$\tilde{x}\in\tilde{X}_{MSF}(\alpha) = \{\tilde{x}\in F(R^{n}) \mid Nes(\tilde{a}_{j}\circledast\tilde{x}\leqq\tilde{b}_{j})\geqq\alpha,\ j=1,\ldots,m\} \quad (32)$$

のとき、$\tilde{x}\in F(R^{n})$ はファジィα-Medium Strong Feasible (ファジィα-MSF)であるという。

(Ⅳ) ファジィ制約集合(22)に対して、

$$\tilde{x}\in\tilde{X}_{USF}(\alpha) = \{\tilde{x}\in F(R^{n}) \mid Nes(\tilde{a}_{j}\circledast\tilde{x}<\tilde{b}_{j})\geqq\alpha,\ j=1,\ldots,m\} \quad (33)$$

のとき、$\tilde{x}\in F(R^{n})$ はファジィα-Very Strong Feasible(ファジィα-VSF)であるという。

αレベル集合の左右の端点$Y_{j\alpha}^{L}$, $Y_{j\alpha}^{R}$ を用いれば、指標(14)-(17)を用いて定義される4種類のファジィα実行可能集合は、ファジィ変数 $\tilde{x}_{\ell}$, ℓ=1,...,n,のメンバシップ関数を構成する平均値と広がりのパラメータ $(x_{\ell}^{m}, x_{\ell}^{s})$, ℓ=1,...,n を決定変数とする2n次元実数空間上の線形不等式の集合として、次のように表すことができる。

【定理３】

(Ⅰ) $\tilde{X}_{UWF}(\alpha)$ =

$\{(x^m, x^s) \in R^{2n} \mid Y_j^L\alpha \leqq b_j^R\alpha,\ j=1,\ldots,m,\ x^s \geqq 0\}$ (34)

(Ⅱ) $\tilde{X}_{MWF}(\alpha)$ =

$\{(x^m, x^s) \in R^{2n} \mid Y_{j(1-\alpha)}^R \leqq b_j^R\alpha,\ j=1,\ldots,m,\ x^s \geqq 0\}$ (35)

(Ⅲ) $\tilde{X}_{MSF}(\alpha)$ =

$\{(x^m, x^s) \in R^{2n} \mid Y_j^L\alpha \leqq b_{j(1-\alpha)}^L,\ j=1,\ldots,m,\ x^s \geqq 0\}$ (36)

(Ⅳ) $\tilde{X}_{USF}(\alpha)$ =

$\{(x^m, x^s) \in R^{2n} \mid Y_{j(1-\alpha)}^R \leqq b_{j(1-\alpha)}^L,\ j=1,\ldots,m,\ x^s \geqq 0\}$ (37)

ここで、$b_j^L\alpha$, $b_j^R\alpha$は、それぞれ、ファジィ数$\tilde{b}_j$のαレベル集合の左右の端点を表す。

4. ファジィγパレート最適性

ファジィ変数とファジィパラメータを含む多目的線形分数計画問題(1)に対するパレート最適性を定義する前に、ここでは、ファジィ変数の制約集合（等価的に、ファジィ変数のメンバシップ関数を構成する平均値と広がりのパラメータを決定変数とする2n次元実数空間上の集合）があらかじめ確定している場合に対する、目的関数のみにファジィパラメータが含まれる次のような多目的線形分数計画問題について考察する。

$$\min\ \left(\tilde{P}_1(\tilde{x})/\tilde{Q}_1(\tilde{x}),\ \ldots,\ \tilde{P}_k(\tilde{x})/\tilde{Q}_k(\tilde{x})\right) \quad (38)$$

subject to $\tilde{x} = (x^m, x^s) \in S \subset R^{2n}$

ここで、Sは、2n次元実数空間上の部分集合を表す。

問題(38)に対するパレート最適性は、4種類の指標(14)-(17)を用いれば、それぞれ、次のように定義することができる。

【定義２】（ファジィγパレート最適性）

(Ⅰ) 問題(38)に対して、

$$Pos[\tilde{P}_i(\tilde{x})/\tilde{Q}_i(\tilde{x}) \geqq \tilde{P}_i(\tilde{x}^*)/\tilde{Q}_i(\tilde{x}^*)] \leq \gamma, \quad (39)$$

i=1,...,k を満たす$\tilde{x} \in S$が存在しないとき、$\tilde{x}^* \in S$をファジィγ-Very Weak Pareto optimal（ファジィγ-VWP)であるという。

(Ⅱ) 問題(38)に対して、

$$Pos[\tilde{P}_i(\tilde{x})/\tilde{Q}_i(\tilde{x}) > \tilde{P}_i(\tilde{x}^*)/\tilde{Q}_i(\tilde{x}^*)] \leq \gamma, \quad (40)$$

i=1,...,k を満たす$\tilde{x} \in S$が存在しないとき、$\tilde{x}^* \in S$をファジィγ-Medium Weak Pareto optimal（ファジィγ-MWP)であるという。

(Ⅲ) 問題(38)に対して、

$$Nes[\tilde{P}_i(\tilde{x})/\tilde{Q}_i(\tilde{x}) \geqq \tilde{P}_i(\tilde{x}^*)/\tilde{Q}_i(\tilde{x}^*)] \leq \gamma, \quad (41)$$

i=1,...,k を満たす$\tilde{x} \in S$が存在しないとき、$\tilde{x}^* \in S$をファジィγ-Medium Strong Pareto optimal（ファジィγ-MSP)であるという。

(Ⅳ) 問題(38)に対して、

$$Nes[\tilde{P}_i(\tilde{x})/\tilde{Q}_i(\tilde{x}) > \tilde{P}_i(\tilde{x}^*)/\tilde{Q}_i(\tilde{x}^*)] \leq \gamma, \quad (42)$$

i=1,...,k を満たす$\tilde{x} \in S$が存在しないとき、$\tilde{x}^* \in S$をファジィγ-Very Strong Pareto optimal（ファジィγ-VSP)であるという。

一方、定理１と同様にして、ファジィ目的関数$\tilde{P}_i(\tilde{x})/\tilde{Q}_i(\tilde{x})$, $\tilde{P}_i(\tilde{x}^*)/\tilde{Q}_i(\tilde{x}^*)$のメンバシップ関数は陽に求めることはできないが、そのγレベル集合は次の定理に与えられる(3)。

【定理４】

$$[\tilde{P}_i(\tilde{x})/\tilde{Q}_i(\tilde{x})]_\gamma = [\ F_{i\gamma}^L,\ F_{i\gamma}^R\ ] \quad (43)$$

$$[\tilde{P}_i(\tilde{x}^*)/\tilde{Q}_i(\tilde{x}^*)]_\gamma = [\ G_{i\gamma}^L,\ G_{i\gamma}^R\ ] \quad (44)$$

とすると、

$$F_{i\gamma}^L = [\tilde{P}_i(\tilde{x})]_\gamma^L/[\tilde{Q}_i(\tilde{x})]_\gamma^R \quad (45)$$

$$F_{i\gamma}^R = [\tilde{P}_i(\tilde{x})]_\gamma^R/[\tilde{Q}_i(\tilde{x})]_\gamma^L \quad (46)$$

ただし、

$$[\tilde{P}_i(\tilde{x})]_\gamma^L =$$

$$\sum_{\ell=1}^{n}\{\min\{(c_{i\ell}^m - L^{-1}(\gamma)c_{i\ell}^s)(x_\ell^m - L^{-1}(\gamma)x_\ell^s),$$

$$(c_{i\ell}^m - L^{-1}(\gamma)c_{i\ell}^s)(x_\ell^m + L^{-1}(\gamma)x_\ell^s)\}\}$$

$$+\ (c_{i\ell}^m - L^{-1}(\gamma)c_{i\ell}^s) \quad (47)$$

$$[\tilde{P}_i(\tilde{x})]_\gamma^R =$$

$$\sum_{\ell=1}^{n}\{\max\{(c_{i\ell}^m + L^{-1}(\gamma)c_{i\ell}^s)(x_\ell^m + L^{-1}(\gamma)x_\ell^s),$$

$$(c_{i\ell}^m + L^{-1}(\gamma)c_{i\ell}^s)(x_\ell^m - L^{-1}(\gamma)x_\ell^s)\}\}$$

$$+\ (c_{i\ell}^m + L^{-1}(\gamma)c_{i\ell}^s) \quad (48)$$

$$[\tilde{Q}_i(\tilde{x})]_\gamma^L =$$

$$\sum_{\ell=1}^{n}\{\min\{(d_{i\ell}^m - L^{-1}(\gamma)d_{i\ell}^s)(x_\ell^m - L^{-1}(\gamma)x_\ell^s),$$

$$(d_{i\ell}^m - L^{-1}(\gamma)d_{i\ell}^s)(x_\ell^m + L^{-1}(\gamma)x_\ell^s)\}\}$$

$$+\ (d_{i\ell}^m - L^{-1}(\gamma)d_{i\ell}^s) \quad (49)$$

$$[\tilde{Q}_i(\tilde{x})]_\gamma^R =$$

$$\sum_{\ell=1}^{n}\{\max\{(d_{i\ell}^m + L^{-1}(\gamma)d_{i\ell}^s)(x_\ell^m + L^{-1}(\gamma)x_\ell^s),$$

$$(d_{i\ell}^m + L^{-1}(\gamma)d_{i\ell}^s)(x_\ell^m - L^{-1}(\gamma)x_\ell^s)\}\}$$

$$+\ (d_{i\ell}^m + L^{-1}(\gamma)d_{i\ell}^s) \quad (50)$$

$G_{i\gamma}^L$, $G_{i\gamma}^R$も、式(45), (46)の右辺のxをx^*に置き換えることにより全く同様に計算することができる。

定理４において、$F_{i\gamma}^L$, $F_{i\gamma}^R$, $G_{i\gamma}^L$, $G_{i\gamma}^R$に min, max の演算が含まれるのは、ファジィパラメータ$\tilde{c}_{i\ell}$, $\tilde{d}_{i\ell}$のγレベル集合の符号が正の場合と負の場合によって、状況が異なるからである。しかし、一般に、$\tilde{c}_{i\ell}$, $\tilde{d}_{i\ell}$の台集合は同符号と考えるのが自然であると思われるので、以下では、$\tilde{c}_{i\ell}$, $\tilde{d}_{i\ell}$の台集合の左右の端点は同符号と仮定して、次のような添字集合を定義する。

$$L_3(i) = \{\ell \in N \mid c_{i\ell}^m - L^{-1}(0)c_{i\ell}^s > 0\} \quad (51)$$

$$L_4(i) = \{\ell \in N \mid c_{i\ell}^m + L^{-1}(0)c_{i\ell}^s < 0\} \quad (52)$$

$$L_5(i) = \{\ell \in N \mid d_{i\ell}^m - L^{-1}(0)d_{i\ell}^s > 0\} \quad (53)$$

$$L_6(i) = \{\ell \in N \mid d_{i\ell}^m + L^{-1}(0)d_{i\ell}^s < 0\} \quad (54)$$

この時、(47)-(50)は、関係式(12)と、添字集合$L_3(i)$,....,$L_6(i)$を用いて、次のように表現できる。

$$[\tilde{P}_i(\tilde{x})]_\gamma^L =$$

$$\sum_{\ell \in L_3(i)}(c_{i\ell}^m - L^{-1}(\gamma)c_{i\ell}^s)(x_\ell^m - L^{-1}(\gamma)x_\ell^s)$$

$$+\ \sum_{\ell \in L_4(i)}(c_{i\ell}^m - L^{-1}(\gamma)c_{i\ell}^s)(x_\ell^m + L^{-1}(\gamma)x_\ell^s)$$

$$+\ (c_{i\ell}^m - L^{-1}(\gamma)c_{i\ell}^s) \quad (55)$$

$$[\tilde{P}_i(\tilde{x})]_\gamma^R =$$

$$\sum_{\ell \in L_3(i)}(c_{i\ell}^m + L^{-1}(\gamma)c_{i\ell}^s)(x_\ell^m + L^{-1}(\gamma)x_\ell^s)$$

$$+\sum_{\ell\in L_4(i)}(c_{i\ell}^{m}+L^{-1}(\gamma)c_{i\ell}^{s})(x_{\ell}^{m}-L^{-1}(\gamma)x_{\ell}^{s})$$

$$+\ (c_{i\ell}^{m}+L^{-1}(\gamma)c_{i\ell}^{s}) \qquad (56)$$

$$[\tilde{Q}_i(\tilde{x})]_{\gamma}^{L}=$$

$$\sum_{\ell\in L_5(i)}(d_{i\ell}^{m}-L^{-1}(\gamma)d_{i\ell}^{s})(x_{\ell}^{m}-L^{-1}(\gamma)x_{\ell}^{s})$$

$$+\sum_{\ell\in L_6(i)}(d_{i\ell}^{m}-L^{-1}(\gamma)d_{i\ell}^{s})(x_{\ell}^{m}+L^{-1}(\gamma)x_{\ell}^{s})$$

$$+\ (d_{i\ell}^{m}-L^{-1}(\gamma)d_{i\ell}^{s}) \qquad (57)$$

$$[\tilde{Q}_i(\tilde{x})]_{\gamma}^{R}=$$

$$\sum_{\ell\in L_5(i)}(d_{i\ell}^{m}+L^{-1}(\gamma)d_{i\ell}^{s})(x_{\ell}^{m}+L^{-1}(\gamma)x_{\ell}^{s})$$

$$+\sum_{\ell\in L_6(i)}(d_{i\ell}^{m}+L^{-1}(\gamma)d_{i\ell}^{s})(x_{\ell}^{m}-L^{-1}(\gamma)x_{\ell}^{s})$$

$$+\ (d_{i\ell}^{m}+L^{-1}(\gamma)d_{i\ell}^{s}) \qquad (58)$$

ファジィ目的関数のγレベル集合の左右の端点(55)-(58)を用いれば、問題(38)に対する4種類のファジィγパレート最適解の集合は、ファジィ変数 $\tilde{x}_\ell$, $\ell=1,\ldots,n$, のメンバシップ関数を構成する平均値と広がりのパラメータ$(x_\ell^m,\ x_\ell^s)$, $\ell=1,\ldots,n$ を決定変数とする、2n次元実数空間上の線形不等式を用いて、次のように表すことができる。

【定理５】

(Ⅰ) ファジィγ-VWP集合 $\tilde{X}_{UWP}(\gamma)=$

$\{(x^{m*},x^{s*})\in S \mid F_{i\gamma}^{R}\le G_{i\gamma}^{L},\ i=1,\ldots,k$
を満たす $(x^m,x^s)\in S$ が存在しない$\}$ (59)

(Ⅱ) ファジィγ-MWP集合 $\tilde{X}_{MWP}(\gamma)=$

$\{(x^{m*},x^{s*})\in S \mid F_{i\gamma}^{R}\le G_{i(1-\gamma)}^{R},\ i=1,\ldots,k$
を満たす $(x^m,x^s)\in S$ が存在しない$\}$ (60)

(Ⅲ) ファジィγ-MSP集合 $\tilde{X}_{MSP}(\gamma)=$

$\{(x^{m*},x^{s*})\in S \mid F_{i(1-\gamma)}^{L}\le G_{i\gamma}^{L},\ i=1,\ldots,k$
を満たす $(x^m,x^s)\in S$ が存在しない$\}$ (61)

(Ⅳ) ファジィγ-VSP集合 $\tilde{X}_{USP}(\gamma)=$

$\{(x^{m*},x^{s*})\in S \mid F_{i(1-\gamma)}^{L}\le G_{i(1-\gamma)}^{R},\ i=1,\ldots,k$を満たす $(x^m,x^s)\in S$ が存在しない$\}$ (62)

５．ファジィ（α，γ）—パレート最適解

ここでは、ファジィ変数とファジィパラメータを含む多目的線形分数計画問題(1)に対して、パレート最適性に対しては、ファジィγ-VWPを採用し、それに対応して実行可能性もファジィα-VWPを採用することにより、次のようなファジィ(α，γ)-VWPの概念を定義する。

【定義３】

ファジィ変数とファジィパラメータを含む多目的線形分数計画問題(1)に対する制約集合

$\tilde{X}_{UWF}(\alpha)=\{\tilde{x}\in F(R^n)\mid \mathrm{Pos}(\tilde{a}_j\circledast\tilde{x}\le\tilde{b}_j)\ge\alpha,\ j=1,\cdots,m\}$

上で

$\mathrm{Pos}[\tilde{P}_i(\tilde{x})/\tilde{Q}_i(\tilde{x})\ge\tilde{P}_i(\tilde{x}^*)/\tilde{Q}_i(\tilde{x}^*)]\le\gamma,\ i=1,\ldots,k$

を満たす$\tilde{x}\in\tilde{X}_{UWF}(\alpha)$が存在しない時、$\tilde{x}^*\in\tilde{X}_{UWF}(\alpha)$をファジィ(α，γ)-Very Weak Pareto optimal（ファジィ(α，γ)- VWP)であるという。

ここで、α、γは、ファジィ変数とファジィパラメータを含む多目的線形分数計画問題(1)に対して、意思決定者が主観的に設定する、実行可能性、パレート最適性の度合いと解釈できる。

$X_{UW}(\alpha,\gamma)$の中で最も楽観的に考えた場合のファジィ解集合あるいは最も悲観的に考えた場合のファジィ解集合は、ファジィ決定変数を構成する平均値と広がりのパラメータを決定変数とする通常の多目的線形分数計画問題のパレート最適解として求めることができるが、詳細は、紙面の都合上省略する。

文　献

(1) D. Dubois : "Linear Programming with Fuzzy Data", Analysis of Fuzzy Information, Volume 3, (Ed. by J. C. Bezdek) CRC Press, Florida, pp. 241-263 (1987).

(2) D. Dubois and H. Prade : "Ranking Fuzzy Numbers in the Setting of Possibility Theory", Information Science, 30, pp. 183-224 (1983).

(3) H. T. Nguyen : "A note on the extension principle for fuzzy sets", Journal of Mathematical Analysis and Applications **64**, pp. 369-380 (1978).

(4) 坂和、矢野：”ファジィパラメータを含む多目的線形計画問題に対する統一的アプローチ”、電子情報通信学会論文誌、J71-A, 8, pp. 1569-1575 (1988).

(5) 坂和、矢野：”ファジィパラメータを含む多目的線形計画問題に対する拡張パレート最適性の概念とその性質”、電子情報通信学会論文誌、J72-A 4, pp. 678-684 (1989).

(6) 坂和、矢野：”ファジィ変数とファジィパラメータを含む多目的線形計画問題に対する実行可能性とパレート最適性”、日本ファジィ学会誌、（掲載予定）

(7) 坂和、矢野、高橋：”ファジィパラメータを含む多目的線形分数計画問題に対するパレート最適性”、電子情報通信学会論文誌、J72-A, 6, pp. 931-937 (1989).

(8) 田中・浅居：”ファジィ関数による線形計画問題の定式化”、システムと制御、**25**, 6, pp. 351-357 (1981).

問い合わせ先：〒724 東広島市西条町大字下見
広島大学工学部第二類（電気系）
坂和正敏
TEL 0824-22-7111（内線3474）
FAX 0824-22-7195

SB4-2

ファジィ目標を考慮したファジィ係数を含む多目的非線形計画問題に対する新しい解の概念

New Solution Concepts for Multiobjective Nonlinear Programming Problems with Fuzzy Coefficients Incorporating Fuzzy Goals

坂和正敏　広島大学工学部第二類（電気系）
Masatoshi SAKAWA　Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 724 Japan
矢野　均　名古屋市立女子短期大学
Hitoshi YANO　Nagoya Municipal Women's College, Nagoya, 464 Japan

In this paper, we focus on multiobjective nonlinear programming problems with fuzzy parameters and introduce new solution concepts by assuming that the decision maker may have fuzzy goals for each of the objective functions with fuzzy parameters. In order to deal with multiobjective nonlinear programming problems with fuzzy parameters, two types of feasibility and two types of Pareto optimality are introduced by making use of several indices for ranking two fuzzy numbers proposed by Dubois and Prade. Then new solution concepts are defined by considering both two types of feasibility and Pareto optimality, and it is shown that any solution proposed here can be obtained on the basis of nonlinear programming for appropriate index levels.

1 まえがき

一般に、現実の意思決定状況を、多目的計画問題としてモデル化する際には、各目的関数の値に対するDMの満足度のあいまい性と、現実の意思決定状況を数式モデルとして定式化する立場にある専門家達の、モデル化の過程で、モデルに含まれる各々の係数に対する判断のあいまい性の、２つのあいまい性[5,6]を考慮する必要があるものと思われる。近年、坂和ら[9]は、Duboisら[3,4]が提案した可能性と必然性の概念に基づく、ファジィ数間の大小関係に関する指標を用いて、ファジィ係数を含む多目的非線形計画問題に対する実行可能性とパレート最適性の概念を導入し、通常のパレート最適解の自然な拡張として（α,γ）パレート最適解を定義し、（α,γ）パレート最適解の集合は非線形計画法により求められることを示した。

その後、坂和らは、ファジィ係数を含む多目的線形計画問題の各目的関数に対する、DMのファジィ目標とファジィ目的関数値と一致度をDMの各ファジィ線形目的関数に対する満足度と解釈することにより指標空間における I-パレート最適性の概念を導入し、さらにα実行可能性とI-パレート最適性を同時に考慮した２種類のI-α-パレート最適解の中から、DMの満足するI-α-パレート最適解を求めるための線形計画法に基づく対話型意思決定手法を提案した[10]。

本論文では、さらに、ファジィ係数を含む多目的非線形計画問題に対して、２種類のI-α-パレート最適解の概念を定義し、提案したパレート最適解の集合が非線形計画法[1,7]を用いて得られることを示す。

2 ファジィ目標とファジィ係数を含む多目的非線形計画問題

本論文では、次のようなファジィ係数を含む多目的非線形計画問題を考える。

$$\begin{aligned}&\text{optimize}\quad (f_1(x,\tilde{a}_1),\ldots,f_k(x,\tilde{a}_k))\\&\text{subject to}\\&x\in\tilde{X}=\{x\in R^n \mid g_j(x,\tilde{b}_j)\leqq 0,\ j=1,\ldots,m\}\end{aligned}\qquad(1)$$

ここで、$\tilde{a}_i$, $\tilde{b}_j$ は、それぞれ、次のようなファジィ数のベクトルで、$\tilde{a}_{iL}$, $\tilde{b}_{jL}$ は、それぞれ、有界で強凸なL-Rファジィ数[8]で、それらのメンバシップ関数は連続的微分可能と仮定する。

$$\tilde{a}_i=(\tilde{a}_{i1},\ldots,\tilde{a}_{ip_i}),\quad i=1,\ldots,k$$

$$\tilde{b}_j=(\tilde{a}_{j1},\ldots,\tilde{b}_{jq_j}),\quad j=1,\ldots,m$$

このようなファジィ係数を含む多目的非線形計画問題(1)に対して、L-Rファジィ数$\tilde{a}_{iL}$, $\tilde{b}_{jL}$ の平均値[8]を、それぞれ、$\bar{a}_{iL}$, $\bar{b}_{jL}$ で表せば、問題(1)に含まれる、L-Rファジィ数を平均値に置き換えた次の多目的非線形計画問題は、係数にあいまい性が含まれる問題(1)の中で、最も可能性の高い問題として解釈することができる。

$$\begin{aligned}&\text{optimize}\quad (f_1(x,\bar{a}_1),\ldots,f_k(x,\bar{a}_k))\\&\text{subject to}\\&x\in X=\{x\in R^n \mid g_j(x,\bar{b}_j)\leqq 0,\ j=1,\ldots,m\}\end{aligned}\qquad(2)$$

ここで、$\bar{a}_i$, $\bar{b}_j$ は、それぞれ、ファジィ数の平均値のベクトルを表す。

$$\bar{a}_i=(\bar{a}_{i1},\ldots,\bar{a}_{ip_i}),\quad i=1,\ldots,k$$

$$\bar{b}_j=(\bar{a}_{j1},\ldots,\bar{b}_{jq_j}),\quad j=1,\ldots,m$$

本論文では、多目的非線形計画問題(2)に対して、DMは、「i 番目の目的関数をだいたい～以下にしたい」というファジィ目標（fuzzy min)、「i 番目の目的関数をだいたい～以上にしたい」というファジィ目標(fuzzy max)、あるいは、「i 番目の目的関数をだいたい～位にしたい」というファジィ目標（fuzzy equal）を持つものと仮定する。この時、多目的非線形計画問題（2）は、次のようなファジィ多目的非線形計画問題に置き換えられる。

$$\begin{aligned}&\text{fuzzy min}\quad f_i(x,\bar{a}_i)\qquad i\in I_1\\&\text{fuzzy max}\quad f_i(x,\bar{a}_i)\qquad i\in I_2\\&\text{fuzzy equal}\quad f_i(x,\bar{a}_i)\qquad i\in I_3\\&\text{subject to}\\&x\in X=\{x\in R^n \mid g_j(x,\bar{b}_j)\leqq 0,\ j=1,\ldots,m\}\end{aligned}\qquad(3)$$

ここで DM は、問題 (3) の各目的関数に対して、次のような L-R ファジィ数で表されるファジィ目標を持つものと仮定する。ただし、簡単のため、

$f_i = f_i(x, \tilde{a}_i)$ と表現している。

（Ⅰ）fuzzy min を持つ場合： $i \in I_1$

$$\mu_{\tilde{G}_i}(f_i)=\begin{cases} 0 & , f_i^{0R} \leqq f_i \\ R\left(\dfrac{f_i^{1R}-f_i}{f_i^{0R}-f_i^{1R}}\right) & , f_i^{0R} > f_i > f_i^{1R} \\ 1 & , f_i^{1R} \geqq f_i \end{cases} \quad (4)$$

（Ⅱ）fuzzy max を持つ場合： $i \in I_2$

$$\mu_{\tilde{G}_i}(f_i)=\begin{cases} 0 & , f_i^{0L} \geqq f_i \\ L\left(\dfrac{f_i^{1L}-f_i}{f_i^{0L}-f_i^{1L}}\right) & , f_i^{0L} < f_i < f_i^{1L} \\ 1 & , f_i^{1L} \leqq f_i \end{cases} \quad (5)$$

（Ⅲ）fuzzy equal を持つ場合： $i \in I_3$

$$\mu_{\tilde{G}_i}(f_i)=\begin{cases} 0 & , f_i^{0R} \leqq f_i \\ R\left(\dfrac{f_i^{1R}-f_i}{f_i^{0R}-f_i^{1R}}\right) & , f_i^{0R} > f_i > f_i^{1R} \\ 1 & , f_i^{1R} \geqq f_i \geqq f_i^{1L} \\ L\left(\dfrac{f_i^{1L}-f_i}{f_i^{0L}-f_i^{1L}}\right) & , f_i^{0L} < f_i < f_i^{1L} \\ 0 & , f_i^{0L} \geqq f_i \end{cases} \quad (6)$$

ここで、$L(\cdot)$, $R(\cdot)$ はそれぞれL-Rファジィ数の左右のメンバシップ関数を表す型関数で、条件

(1) $L(x)=L(-x)$, (2) $L(0)=1$, $L(p)=0$

(3) $L(x)$ は $(0,p)$ で強意単調減少かつ連続的微分可能

(4) $[p,\infty)$で、$L(x)=0$.

を満たす。$R(\cdot)$ も全く同様に定義されている。

また、f_i^{0L}, f_i^{0R} は、それぞれ DM が目的関数 f_i に対して受け入れることのできない最小値および最大値を示し、f_i^{1L}, f_i^{1R} は、それぞれ目的関数 f_i に対して DM が完全に満足し得る最小値および最大値を示す。

この時、ファジィ多目的非線形計画問題(3)に対するDMのファジィ目標$\tilde{G}_i$, $i=1,\ldots,k$と問題(1)に含まれるファジィ係数の両者のあいまい性を同時に考慮すれば、ファジィ係数を含む多目的非線形計画問題(1)は、形式的には、次のようなファジィ目標とファジィ係数を含む多目的非線形計画問題に帰着される。

$$\max \left(\mu_{\tilde{G}_1}(f_1(x,\tilde{a}_1)), \ldots, \mu_{\tilde{G}_k}(f_k(x,\tilde{a}_k)) \right)$$

subject to (7)

$$x \in \tilde{X}=\{ x \in R^n \mid g_j(x,\tilde{b}_j) \leqq 0,\ j=1,\ldots,m \}$$

このような問題を通常の多目的非線形計画問題として取り扱う場合、次の２つの疑問が生じる。

(1) ファジィ係数を含む制約集合をどのように解釈すべきか。

(2) ファジィ係数を含む目的関数値に対して、ファジィ目標が与えられた時、このファジィ目標を満たす度合いをいかに定めるか。

本論文では，これらの問題点を解決するために、Dubois ら[3,4]の導入したファジィ数間の等号関係および不等号関係を表す指標を用いて、ファジィ目標とファジィ係数を含む多目的非線形計画問題(7)に対する新しいパレート最適解の概念を定義する。

3 ファジィ数間の等号および大小関係の指標

2つのファジィ数 $\tilde{m}$, $\tilde{n}$ の大小関係を統合的に取り扱うために，Duboisらは、区間の大小関係の自然な拡張として、次の4種類の指標を導入した。

【定義１】

$$Pos(\tilde{m} \geqq \tilde{n}) = \sup\{\min(\mu_{\tilde{m}}(u), \mu_{\tilde{n}}(v)) \mid u \geqq v\} \quad (8)$$

$$Pos(\tilde{m} > \tilde{n}) = \sup_u\{\inf_v\{\min(\mu_{\tilde{m}}(u), 1-\mu_{\tilde{n}}(v)) \mid u \leqq v\}\} \quad (9)$$

$$Nes(\tilde{m} \geqq \tilde{n}) = \inf_u\{\sup_v\{\max(1-\mu_{\tilde{m}}(u), \mu_{\tilde{n}}(v)) \mid u \geqq v\}\} \quad (10)$$

$$Nes(\tilde{m} > \tilde{n}) = \inf\{\max(1-\mu_{\tilde{m}}(u), 1-\mu_{\tilde{n}}(v)) \mid u \leqq v\} \quad (11)$$

彼らはさらに、ファジィ数間の等号関係を表す指標を次のように定義した[3,4]。

【定義２】

$$Pos(\tilde{m} = \tilde{n}) = \sup_u\{\min(\mu_{\tilde{m}}(u), \mu_{\tilde{n}}(u))\} \quad (12)$$

$$Nes(\tilde{m} \supset \tilde{n}) = \inf_u\{\max(\mu_{\tilde{m}}(u), 1-\mu_{\tilde{n}}(u))\} \quad (13)$$

ここで、Pos, Nes は Possibility（可能性），Necessity（必然性）の省略形で、$\mu_{\tilde{m}}(u)$, $\mu_{\tilde{n}}(v)$ はファジィ数 $\tilde{m}$ と $\tilde{n}$ のメンバシップ関数を表す。

以下においては、ファジィ数 $\tilde{m}$ と $\tilde{n}$ は有界で、それらのメンバシップ関数は連続であると仮定する。

この時、次の 2つの定理は、各指標がしきい値α以上で満たされるための必要十分条件が、ファジィ数 $\tilde{m}$ と $\tilde{n}$ のαレベル集合の左右の端点の大小関係により表されることを示している[8]。

【定理１】

(Ⅰ) $Pos(\tilde{m} \geqq \tilde{n}) \geqq \alpha \Leftrightarrow m_\alpha^R \geqq n_\alpha^L$ (14)

(Ⅱ) $Pos(\tilde{m} > \tilde{n}) \geqq \alpha \Leftrightarrow m_\alpha^R \geqq n_{1-\alpha}^R$ (15)

(Ⅲ) $Nes(\tilde{m} \geqq \tilde{n}) \geqq \alpha \Leftrightarrow m_{1-\alpha}^L \geqq n_\alpha^L$ (16)

(Ⅳ) $Nes(\tilde{m} > \tilde{n}) \geqq \alpha \Leftrightarrow m_{1-\alpha}^L \geqq n_{1-\alpha}^R$ (17)

【定理２】

(Ⅴ) $Pos(\tilde{m} = \tilde{n}) \geqq \alpha \Leftrightarrow$
$m_\alpha^R \geqq n_\alpha^L$ かつ $m_\alpha^L \leqq n_\alpha^R$ (18)

(Ⅵ) $Nes(\tilde{m} \supset \tilde{n}) \geqq \alpha \Leftrightarrow$
$m_\alpha^R \geqq n_{1-\alpha}^R$ かつ $m_\alpha^L \leqq n_{1-\alpha}^L$ (19)

ここで、m_α^L, m_α^R, n_α^L, n_α^R は、ファジィ数 $\tilde{m}$, $\tilde{n}$ のαレベル集合の左右の端点を表す。

以下では、可能性と必然性の概念に基づくこれらの指標を用いて、各目的関数に対して DM がファジィ目標を持つという仮定のもとでファジィ係数を含む多目的非線形計画問題(7)に対する、実行可能性と、パレート最適性を定義する。

4 α実行可能性

坂和ら[9] は、既にファジィ制約集合

$$x \in \tilde{X}=\{ x \in R^n \mid g_j(x,\tilde{b}_j) \leqq 0,\ j=1,\ldots,m \} \quad (20)$$

に対して、ファジィ数の大小関係に関する4種類の指標に基づく、しきい値αに依存したα実行可能性を、次

のように定義した。

【定義３】

（Ⅰ） ファジィ制約集合 $\tilde{X}$ に対して、

$x \in X_{VWF}(\alpha)=$

$$\{x \in R^n \mid Pos(g_j(x,\tilde{b}_j) \leqq 0) \geqq \alpha, j=1,\ldots,m\} \quad (21)$$

の時、$x \in R^n$ は α-Very Weak Feasible(α-VWF)であるという。

（Ⅱ） ファジィ制約集合 $\tilde{X}$ に対して、

$x \in X_{MWF}(\alpha)=$

$$\{x \in R^n \mid Pos(g_j(x,\tilde{b}_j) < 0) \geqq \alpha, j=1,\ldots,m\} \quad (22)$$

の時、$x \in R^n$ は α-Medium Weak Feasible (α-MWF)であるという。

（Ⅲ） ファジィ制約集合 $\tilde{X}$ に対して、

$x \in X_{MSF}(\alpha)=$

$$\{x \in R^n \mid Nes(g_j(x,\tilde{b}_j) \leqq 0) \geqq \alpha, j=1,\ldots,m\} \quad (23)$$

の時、$x \in R^n$ は α-Medium Strong Feasible (α-MSF)であるという。

（Ⅳ） ファジィ制約集合 $\tilde{X}$ に対して、

$x \in X_{VSF}(\alpha)=$

$$\{x \in R^n \mid Nes(g_j(x,\tilde{b}_j) < 0) \geqq \alpha, j=1,\ldots,m\} \quad (24)$$

の時、$x \in R^n$ は α-Very Strong Feasible (α-VSF)であるという。

ファジィ制約集合(21)に対する4種類のα実行可能な集合は、ファジィ数$\tilde{b}_{jL}$のメンバシップ関数が有界かつ連続であるという仮定と、定理１およびαレベル集合の性質[8]から、等価的に次のように表すことができる。

【定理３】

（Ⅰ） $$X_{VWF}(\alpha) = X_{MSF}(\alpha) = \{x \in R^n \mid \min_{b_j \in [b_{j\alpha}^L, b_{j\alpha}^R]} g_j(x,b_j) \leqq 0, j=1,\ldots,m\} \quad (25)$$

（Ⅱ） $$X_{MWF}(\alpha) = X_{VSF}(\alpha) = \{x \in R^n \mid \max_{b_j \in [b_{j,1-\alpha}^L, b_{j,1-\alpha}^R]} g_j(x,b_j) \leqq 0, j=1,\ldots,m\} \quad (26)$$

ここで、$b_{j\alpha}^L, b_{j\alpha}^R$は、ファジィ数$\tilde{b}_{jL}$の$\alpha$レベル集合$[b_{jL\alpha}^L, b_{jL\alpha}^R]$の左右の端点のベクトルを表す。即ち、

$$b_{j\alpha}^L = [\, b_{j1\alpha}^L, \ldots, b_{jq_j\alpha}^L \,], \quad j=1,\ldots,m$$

$$b_{j\alpha}^R = [\, b_{j1\alpha}^R, \ldots, b_{jq_j\alpha}^R \,], \quad j=1,\ldots,m$$

5 I-パレート最適性

ファジィ目標とファジィ係数を含む多目的非線形計画問題 (7)に対する パレート最適性を定義するために、まず、制約集合が非ファジィな非線形不等式の集合Xで表される、次のような多目的非線形計画問題を考える。

$$\max \left(\mu_{\tilde{G}_1}(f_1(x,\tilde{a}_1)), \ldots, \mu_{\tilde{G}_k}(f_k(x,\tilde{a}_k)) \right) \quad \text{subject to} \quad x \in X=\{ x \in R^n \mid g_j(x,b_j) \leqq 0,\ j=1,\ldots,m \} \quad (27)$$

この問題を通常の多目的計画問題として取り扱うためには、ファジィ係数を含む目的関数に対するファジィ目標のメンバシップ値を定義しなければならない。ここで、ファジィ目標のメンバシップ値はDMの各目的関数に対する満足度を表すことに注意すれば、メンバシップ値は、ファジィ目的関数とファジィ目標の一致度として考えるのが妥当であろう。ここでは、一致度として、ファジィ数間の等号関係を表す指標(12),(13)を採用する。即ち、ファジィ目的関数に対するファジィ目標のメンバシップ値を次のように定義する。

【定義４】

$$\mu_{\tilde{G}_i}(f_i(x,\tilde{a}_i)) = Pos(\tilde{G}_i = f_i(x,\tilde{a}_i)) \quad (28)$$

$$\mu_{\tilde{G}_i}(f_i(x,\tilde{a}_i)) = Nes(\tilde{G}_i \supset f_i(x,\tilde{a}_i)) \quad (29)$$

ここで、ファジィ目的関数に対するファジィ目標のメンバシップ値は、それぞれ、『ファジィ目標が対応するファジィ目的関数と等しい可能性の度合い』および『ファジィ目標が対応するファジィ目的関数を含む必然性の度合い』として解釈することができる。

この時、問題 (27) は各指標 (12), (13) に対応して、それぞれ次のような多目的計画問題として表すことができる。

$$\begin{aligned} &\max \quad Pos(f_1(x,\tilde{a}_1) = \tilde{G}_1) \\ &\qquad \cdots \\ &\max \quad Pos(f_k(x,\tilde{a}_k) = \tilde{G}_k) \\ &\text{subject to} \quad x \in X \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} &\max \quad Nes(\tilde{G}_1 \supset f_1(x,\tilde{a}_1)) \\ &\qquad \cdots \\ &\max \quad Nes(\tilde{G}_k \supset f_k(x,\tilde{a}_k)) \\ &\text{subject to} \quad x \in X \end{aligned} \quad (31)$$

多目的計画問題 (30), (31) においては、k個の目的関数が、可能性・必然性の概念に基づく指標(12),(13)に置き変わっていることに注意しよう。このような 2種類の多目的計画問題に対して、指標空間で定義されるパレート最適解として、I-パレート最適解を次のように定義することができる。

【定義５】

(1) (I-Weak Pareto optimality : I-WP)

多目的計画問題 (30) に対して

$$Pos(\tilde{G}_i = f_i(x,\tilde{a}_i)) \geq Pos(\tilde{G}_i = f_i(x^*,\tilde{a}_i)) \quad (i=1,\ldots,k) \quad (32)$$

なる $x \in X$ が存在しないような $x^* \in X$ を I-Weak Pareto optimality (I-WP) と定義する。

(2) (I-Strong Pareto optimality : I-SP)

多目的計画問題 (31) に対して

$$Nes(\tilde{G}_i \supset f_i(x,\tilde{a}_i)) \geq Nes(\tilde{G}_i \supset f_i(x^*,\tilde{a}_i)) \quad (i=1,\ldots,k) \quad (33)$$

なる $x \in X$ が存在しないような $x^* \in X$ を I-Strong Pareto optimality (I-SP) と定義する。

残念ながら、定義５の 2種類のパレート最適解 I-WP, I-SPは、不等式(32),(33)の中にPos(·), Nes(·)の指標が含まれており、決定変数に対して陽に表現されていないので、従来のパレート最適解を求めるために提案された種々の手法[1],[7]を直接適用して求めることはできない。そこで、まず、式 (32), (33) において、$x^* \in X$ がすでに与えられていると仮定し、

$$\beta_i = Pos(\tilde{G}_i = f_i(x^*,\tilde{a}_i)), \quad i=1,\ldots,k \quad (34)$$

$$\gamma_i = Nes(\tilde{G}_i \supset f_i(x^*,\tilde{a}_i)), \quad i=1,\ldots,k \quad (35)$$

とおこう。この時、ファジィ数$\tilde{a}_{iL}$は有界で、そのメンバシップ関数は連続であるという仮定と、定理１およびαレベル集合の性質[8]から、次の定理が成立する。

【定理４】

(1) $Pos(\tilde{G}_i = f_i(x,\tilde{a}_i)) \geq \beta_i$ (i=1,...,k) であるための必要十分条件は、

$$G^R_{i\beta_i} \geq \min_{a_i \in [a^L_{i,\beta_i}, a^R_{i,\beta_i}]} f_i(x, a_i) \quad i \in I_1 \cup I_3 \quad (36)$$

$$G^L_{i\beta_i} \leq \max_{a_i \in [a^L_{i,\beta_i}, a^R_{i,\beta_i}]} f_i(x, a_i) \quad i \in I_2 \cup I_3 \quad (37)$$

(2) $Nes(\tilde{G}_i \supset f_i(x, \tilde{a}_i)) \geq \gamma_i$ $(i=1,\ldots k)$ であるための必要十分条件は、

$$G^R_{i\gamma_i} \geq \max_{a_i \in [a^L_{i,1-\gamma_i}, a^R_{i,1-\gamma_i}]} f_i(x, a_i) \quad i \in I_1 \cup I_3 \quad (38)$$

$$G^L_{i\gamma_i} \leq \min_{a_i \in [a^L_{i,1-\gamma_i}, a^R_{i,1-\gamma_i}]} f_i(x, a_i) \quad i \in I_2 \cup I_3 \quad (39)$$

ここで、$a^L_{i\beta}, a^R_{i\beta}$は、ファジィ数$\tilde{a}_i$の$\beta$レベル集合$[a^L_{i\beta}, a^R_{i\beta}]$の左右の端点のベクトルを表す。即ち、

$a^L_{i\beta} = [\, a^L_{i1\beta}, \ldots, a^L_{ip_i\beta} \,]$, $i=1,\ldots,m$

$a^R_{i\beta} = [\, a^R_{i1\beta}, \ldots, a^R_{ip_i\beta} \,]$, $i=1,\ldots,m$

定理4を用いれば、次の定理に示されるように、$x^* \in X$がI-WP, I-SPであるかどうかは、通常の非線形不等式の集合の存在の有無をチェックすることにより調べることができることがわかる。

【定理5】

(1) $x^* \in X$ が問題(30)に対するI-WPであるための必要十分条件は、

$\beta_i = Pos(\tilde{G}_i = f_i(x^*, \tilde{a}_i))$, $i=1,\ldots,k$

とした時、非線形不等式の集合

$$G^R_{i\beta_i} \geq f_i(x, a_i), \quad i \in I_1 \cup I_3 \quad (40)$$

$$G^L_{i\beta_i} \leq f_i(x, a_i), \quad i \in I_2 \cup I_3 \quad (41)$$

を満たす$x \in X$, $a_i \in [a^L_{i,\beta_i}, a^R_{i,\beta_i}]$が存在しないことである。

(2) $x^* \in X$ が問題(31)に対するI-SPであるための必要十分条件は、

$\gamma_i = Nes(\tilde{G}_i \supset f_i(x^*, \tilde{a}_i))$, $i=1,\ldots,k$

とした時、非線形不等式の集合

$$G^R_{i\gamma_i} \geq f_i(x, a_i), \quad i \in I_1 \cup I_3 \quad (42)$$

$$G^L_{i\gamma_i} \leq f_i(x, a_i), \quad i \in I_2 \cup I_3 \quad (43)$$

を満たす$x \in X$, $a_i \in [a^L_{i,1-\gamma_i}, a^R_{i,1-\gamma_i}]$が存在しないことである。

定理5を利用して、指標レベルβ_i,（あるいはγ_i）$i=1,\ldots,k$ を適当に設定すれば、設定した指標レベルにある意味で近いI-WP（あるいはI-SP）を求めるための、二分法と非線形計画法に基づくアルゴリズムを構成することができるが、詳細は紙面の都合上省略する。

6 I-α-パレート最適解

4節で導入した2種類のα実行可能性の概念と、5節で定義した2種類のI-パレート最適性の概念を組み合わせれば、ファジィ目標とファジィ係数を含む多目的非線形計画問題(7)に対するパレート最適解を、2x2種類定義することができる。ここでは、それらの中の1つとして、次のようなI-α-Very Weak パレート最適解を定義しよう。

【定義6】

ファジィ目標とファジィ係数を含む多目的非線形計画問題(7)に対して、$X_{vwr}(\alpha)$上で、不等式

$Pos(\tilde{G}_i = f_i(x, \tilde{a}_i)) \geq Pos(\tilde{G}_i = f_i(x^*, \tilde{a}_i))$, $i=1,\ldots,k$

なる $x \in X_{vwr}(\alpha)$ が存在しない時、$x^* \in X_{vwr}(\alpha)$をI-α-Very Weak パレート最適解(I-α-VWP)という。

7 おわりに

本論文では、DMが、各目的関数に対してあいまいな目標を持つという仮定のもとでの、ファジィ係数を含む多目的非線形計画問題に対して、可能性・必然性の概念に基づく2種類のα実行可能性と2種類のI-パレート最適性の概念を導入し、両者を同時に考慮した新しい解の概念として、I-α-パレート最適解の概念を定義した。任意のI-α-パレート最適解は、指標レベルβ_i, $i=1,\ldots,k$,を適当に設定することにより、非線形計画法に基づいて求めることができるが、この場合、非線形計画問題の実行可能性を繰り返しチェックしなければならないという問題点があり、検討を要する。また、提案した手法を、現実のファジィ環境における意思決定問題に対する適用により、その有効性について検討する必要がある。

文　献

(1) V. Chankong and Y.Y.Haimes : "Multi-objective Decision Making : Theory and Methodology" North-Holland (1983).

(2) D.Dubois : "Linear Programming with Fuzzy Data" Analysis of Fuzzy Information, Vol.Ⅲ, (Ed.by J.C.Bezdek) CRC Press, pp.241-263 (1987).

(3) D.Dubois and H.Prade : "Fuzzy Sets and Systems : Theory and Applications ", Academic Press (1980).

(4) D.Dubois and H.Prade : "Ranking Fuzzy Numbers in the Setting of Possibility Theory", Information Science, 30, pp.183-224 (1983) .

(5) 乾口、久米：”様相性目標計画問題”、JORSJ, 32, pp.326-351 (1989).

(6) 乾口、市橋、久米：”ファジィ数理計画問題の様相的構成”、システム制御情報学会論文誌、2巻、pp.69-79 (1989).

(7) 坂和正敏：”非線形システムの最適化：1目的から多目的へ”、森北出版、(1986)

(8) 坂和正敏：”ファジィ理論の基礎と応用”、森北出版、(1989)

(9) 坂和,矢野："ファジーパラメータを含む多目的非線形計画問題に対する実行可能性とパレート最適性”、信学論(A)、J72-A, 7,pp.1062-1068 (1989).

(10) 坂和,矢野："ファジィ係数を含む多目的線形計画問題に対するファジィ目標を考慮した解の概念に基づく対話型意思決定”、日本ファジィ学会誌、2, 4, (1990)（印刷中）.

問い合わせ先：〒724 東広島市西条町大字下見
広島大学工学部第二類（電気系）
坂和正敏
TEL 0824-22-7111（内線3474）
FAX 0824-22-7195

SB4-3

ファジィ線形計画法による多重成分スペクトルの分解

Deconvolution of Multi-Component Spectra using Fuzzy Linear Programming Method

林雅彦　影井清一郎　佐藤寿邦
Masahiko Hayashi Seiichirou Kaguei Hisakuni Sato
横浜国立大学工学部
Faculty of Engineering, Yokohama National University

Abstract : A new method using the fuzzy liner programming is proposed to the quantitative analysis for multi-component systems. Simulations on computer shows that, when an unknown component is contained in multi-component spectra, apparent components appear in the analysis of the ordinary linear programming method, but it doesn't appear from the fuzzy liner programming.

1　はじめに

コンピュータ化された分光計の普及により、現在、多数の化学種に対するスペクトルがライブラリー化されつつある。本報告は混合系の定量分析の方法として、混合系の測定スペクトルを線形計画法によって既にライブラリー化してある成分のスペクトルに分解する方法を提案した。線形計画法による多重成分のスペクトルの分解を

- 混合系の成分がすべて既知の場合
- 混合系に未知の成分が含まれる場合

について、コンピュータシミュレーションにより検討した。

2　通常の線形計画法

多成分のスペクトルは、これに含まれる成分のスペクトルの和として表される。

$$g(\lambda)=\sum_{n=1}^{N}x_n f_n(\lambda) \tag{1}$$

ただし、$g(\lambda)$ は多成分スペクトル、x_n は n−成分の混合係数、$f_n(\lambda)$ は n−成分の単位量あたりのスペクトルである。今、波長 $\lambda_m(m=1\sim M)$ で実測値 $g_m(m=1\sim M)$ を得たとすると、

$$g_m=\sum_{n=1}^{N}x_n f_n(\lambda_m)\quad for\quad m=1\sim M \tag{2}$$

もし、$1\sim n$ 成分以外の未知の成分が含まれていたとすると一般には

$$g_m\geq\sum_{n=1}^{N}x_n f_n(\lambda_m)\quad for\quad m=1\sim M \tag{3}$$

従って、各成分 $x_n(n=1\sim N)$ を求めることは以下の線形計画問題を解くことになる。

[LP 問題] $f_n(\lambda_m), g_m(m=1\sim M, n=1\sim N)$ が与えられたとき

制約条件：

$$\sum_{n=1}^{N}x_n f_n(\lambda_m)\leq g_m\quad for\quad m=1\sim M \tag{4}$$

を満たし

目的関数：

$$z=\sum_{n=1}^{N}x_n\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}}f_n(\lambda)d\lambda \tag{5}$$

を最大にする $x_n(n=1\sim N)$ を求める。

実際には $g_m(m=1\sim M)$ に誤差が入る。この影響をコンピューターシミュレーションで検討する。ここでは Lorentz type の line shape を成分に持つスペクトルを仮定する。

$$f(\lambda)=\frac{\gamma^2}{(\lambda-\mu)^2+\gamma^2} \tag{6}$$

ただし、μはピーク波長、γは半値半幅である。また、誤差として標準偏差 0.002 の正規乱数を加える。すなわち、シミュレーションに使う混合スペクトルの実測値 g_m は式 (7) になる。

$$g_m=\sum_{n=1}^{N}x_n\frac{\gamma_n^2}{(\lambda_m-\mu_n)^2+\gamma_n^2}+noise \tag{7}$$

シミュレーションでは、混合スペクトルを分解して各成分の混合係数 x_n' を求める。そしてこの x_n' を使って混合スペクトルを再合成する。

$$g_m'=\sum_{n=1}^{N}x_n' f_n(\lambda_m)\quad for\quad m=1\sim M \tag{8}$$

再合成スペクトルと元の混合スペクトルの差によって、もし混合スペクトル中に未知の成分が含まれるならそのスペクトルを発見できる。

$$h_m = g_m - g'_m \quad for \quad m = 1 \sim M \tag{9}$$

テストデータとして表1に示す5成分のスペクトルを考える。図1は表1の成分スペクトル$f_n(\lambda)$に混合係数x_nを掛けたグラフである。図2に式(7)を使った混合スペクトルg_mのグラフを示す。これは$\lambda_{min} = 0$、$\lambda_{max} = 1000$としてこの間を100等分した各波長で実測値$g_m(m = 1 \sim 101)$を計算したものである。

表1中のすべての成分が既知である場合に、通常の線形計画法で混合スペクトルg_mを分解して各成分の混合係数を求めた結果が表2である。図3は表2と元の混合スペクトルより差を計算し、それを10倍したグラフである。このグラフには個のスペクトルが現れているが、これらは表1中のどれにも該当しないので見かけ上のスペクトルであるといえる。

次に、表1において$n = 1 \sim 4$が既知の成分で$n = 5$が未知の成分としてg_mを分解した結果が表3と図4である。図4よりピーク波長μが300のスペクトルとピーク波長μが600のスペクトルが見て取れる。$\mu = 300$のスペクトルは、表1中の$n = 5$のスペクトルである。これに対し、もう一方のスペクトルは見かけ上のスペクトルである。

上の二つの結果より、通常の線形計画法を用いてすべての成分が既知であるスペクトルを分解した場合も未知の成分を含むスペクトルを分解した場合も見かけ上のスペクトルが現れることがわかる。

3 ファジィ線形計画法

ファジィ線形計画法における制約条件は大体g_m以下に抑えたいというファジィ不等式で与えられる。また目的関数の値を最大にしようとするかわりに、大体z_0にしたいというファジィ不等式となる。通常の線形計画法での式(4)と式(5)は、ファジィ線形計画法では次のように記述される。

［ファジィLP問題］

$$\sum_{n=1}^{N} x_n f_n(\lambda_m) \lesssim g_m \quad for \quad m = 1 \sim M \tag{10}$$

$$\sum_{n=1}^{N} x_n \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} f_n(\lambda) d\lambda \lesssim z_0 \tag{11}$$

式(11)のz_0は混合スペクトルg_mのグラフ上で、波長軸と実測値g_mによって囲まれる部分のλ_{min}からλ_{max}の間の面積である。

ファジィ不等式(10)と(11)はそれぞれファジィ制約$\tilde{B}_m$とファジィ目標$\tilde{G}$を対応させる。$\tilde{B}_m$と$\tilde{G}$のメンバーシップ関数$\mu_{\tilde{B}_m}$と$\mu_{\tilde{G}}$は以下のように定式化できる。

$$\mu_{\tilde{B}_m}(\sum_{n=1}^{N} x_n f_n(\lambda_m)) = \begin{cases} 0 & (g_m + d_m \leq \sum x_n f_n(\lambda_m)) \\ 1 - \frac{x_n f_n(\lambda_m) - g_m}{d_m} & \\ \quad (g_m \leq \sum x_n f_n(\lambda_m) \leq g_m + d_m) & \\ 1 & (\sum x_n f_n(\lambda_m) \leq g_m) \end{cases}$$
$$for \quad m = 1 \sim M \tag{12}$$

$$\mu_{\tilde{G}}(x_n \int f_n(\lambda) d\lambda) = \begin{cases} 1 & (z_0 \leq x_n \int f_n(\lambda) d\lambda) \\ 1 - \frac{z_0 - x_n \int f_n(\lambda) d\lambda}{d_0} & \\ \quad (z_0 - d_0 \leq x_n \int f_n(\lambda) d\lambda \leq z_0) & \\ 0 & (x_n \int f_n(\lambda) d\lambda \leq z_0 - d_0) \end{cases} \tag{13}$$

式(13)のd_0は目的関数値の志望水準z_0に対する許容変動幅を意味し、その大きさは決定者によって主観的に定められる。式(12)のd_mも同様に実測値g_mに対する許容変動幅である。

ファジィ線形計画法で混合スペクトルの分解のシュミレーションを行う。前と同様に表1に示す成分を持つスペクトルを考え、ファジィ不等式中の各パラメータは$z_0 = 304.3$、$d_0 = 30$、$d_m = 0.1(m = 1 \sim 101)$とした。

すべての成分が既知であるときの結果が表4と図5で、$f_5(\lambda)$が未知の成分であるとしたときの結果が表5と図6である。図5で差h_mのグラフはほぼ横軸上にあるので元の混合スペクトルには未知の成分が含まれていないことが判断できる。図6で現れているスペクトルは表1中の$f_5(\lambda)$で、あらかじめ未知の成分としていたものである。ファジィ線形計画法を用いると、通常の線形計画法で現れていた見かけ上のスペクトルが現れないことがわかる。

4 まとめ

通常の線形計画法では制約条件で表されるように、測定を行った各波長で成分のスペクトルの和が実測値以下であるという条件を必ず満たしている。一方、ファジィ線形計画法の場合はファジィ不等式を用いるので、この条件を満たしていないこともありえる。シュミレーションの結果より次のことがわかった。

線形計画法による多重成分のスペクトルを分解を行うとき、

- すべての条件を満足するようにすると見かけ上の未知のスペクトルが現れること。また、いくつかの条件は満たさなくても良いとすると見かけ上のスペクトル成分が消えること。
- 未知の成分が含まれるときは、いくつかの条件は満たさなくても良いとする手法が有効であること。

表 1: シミュレーションに用いた成分スペクトルデータ

番号 n	ピーク波長 μ	半値半幅 γ	混合係数 x_n	$\int_0^{1000} f(\lambda)d\lambda$
1	200	100	0.25	255
2	400	150	0.25	380
3	500	50	0.25	147
4	600	150	0.25	381
5	300	100	0.05	268

表 2: すべての成分が既知の場合で通常の線形計画法により求めた混合係数 x'_n

x'_1	x'_2	x'_3	x'_4	x'_5
0.233	0.234	0.265	0.238	0.070

表 3: 未知の成分が 1 個ある場合で通常の線形計画法により求めた混合係数 x'_n

x'_1	x'_2	x'_3	x'_4
0.248	0.270	0.256	0.232

表 4: すべての成分が既知の場合でファジィ線形計画法により求めた混合係数 x'_n

x'_1	x'_2	x'_3	x'_4	x'_5
0.244	0.248	0.253	0.248	0.055

表 5: 未知の成分が 1 個ある場合で通常の線形計画法により求めた混合係数 x'_n

x'_1	x'_2	x'_3	x'_4
0.266	0.273	0.243	0.249

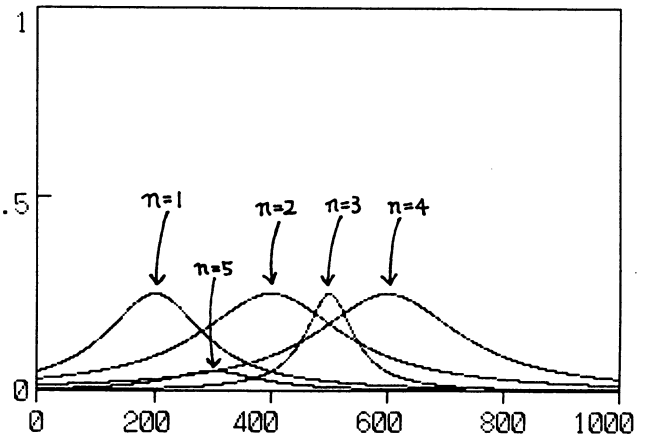


図 1: シミュレーションに用いた成分スペクトル $x_n f_n(\lambda)$

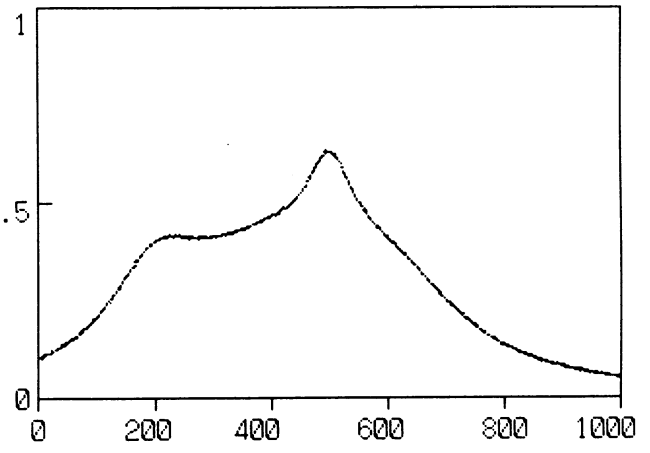


図 2: シミュレーションに用いた混合スペクトル g_m

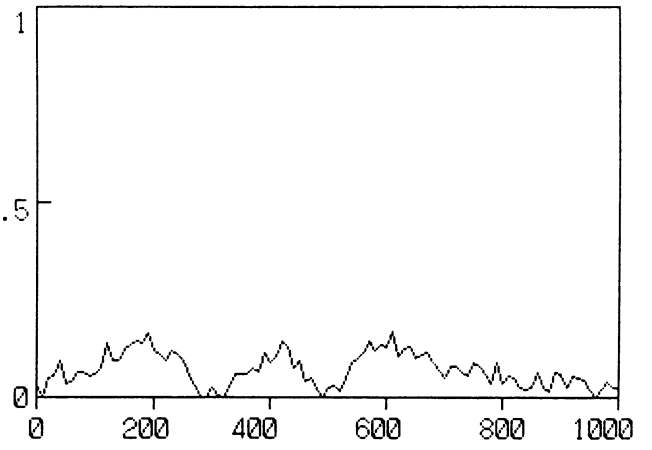


図 3: すべての成分が既知の場合で通常の線形計画法による差 $h_m * 10$

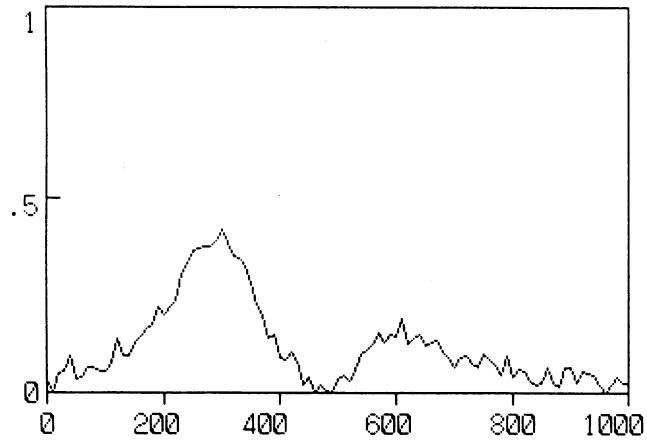


図 4: 未知の成分が 1 個ある場合で通常の線形計画法による差 $h_m * 10$

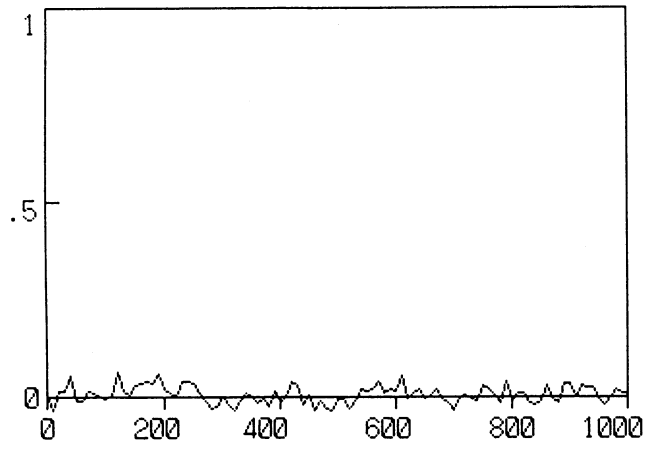


図 5: すべての成分が既知である場合でファジィ線形計画法によるの差 $h_m * 10$

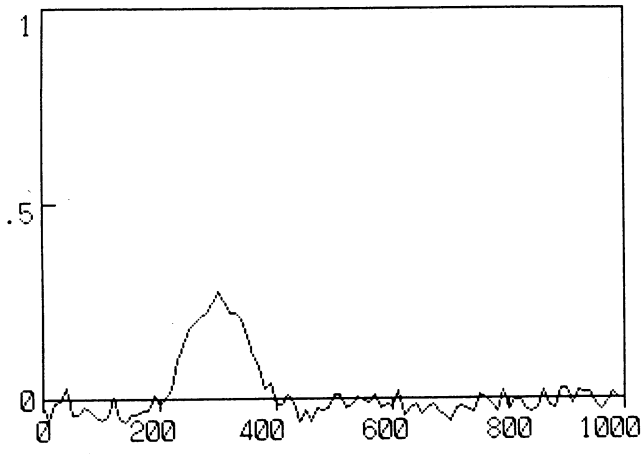


図 6: 未知の成分が 1 個ある場合でファジィ線形計画法によるの差 $h_m * 10$

参考文献

[1] 佐藤寿邦，小西正三郎：吸収スペクトル測定による多成分同時定量，分析化学会講演集 (1989) .

[2] 本田中二，大里有生：ファジィ工学入門，海文堂 (1989) .

[3] avid I.Steinberg : Computational Matrix Algebra , Internaional Student Edition(1974) .

[4] Vašek Chvátal(阪田省二郎，藤野和建 訳)：線形計画法 上，下，啓学出版 .

[問い合わせ先]

〒 240 横浜市保土ケ谷区常盤台 156
横浜国立大学 工学部 電子情報工学科
林雅彦
TEL:045-335-1451 内線 2924
FAX:045-334-3215

SB4-4

ファジィアルゴリズムを用いた時系列情報からの特徴抽出に関する一考察

On feature extraction from time series data based on fuzzy algorithm

広田 薫(*Kaoru HIROTA*) *
○生駒哲一 (*Norikazu IKOMA*)**

* 法政大学工学部計測制御専攻
Department of Instrument and Control Engineering, College of Engineering, HOSEI University
** 法政大学大学院工学研究科システム工学専攻
The HOSEI University Graduate School, Engineering Division, System Engineering

ABSTRACT

In the case of generating the sequence of symbols of partial feature from time series data and extracting global feature by using automaton, it is not suitable to use a crisp algorithm if encoding to symbols is done not uniquely. Using fuzzy algorithm, however, the membership value of state becomes smaller than the previous values because of t-norm operation . So, if some symbols are not precise, the membership value grows downward and its recovery is not cared. To improve this problem, a new composition method , which is used in state transition of automaton, is proposed.

KEY WORDS: Fuzzy algorithm, Time series data, Feature extraction

1. はじめに

ファジィアルゴリズムは、1968年にZadehによって提案された非決定性アルゴリズムのファジィ拡張である[1)]。ファジィアルゴリズムの一般的表現としてファジィチューリングマシン及びファジィオートマトンが提案されている[1),2)]。時系列データから細部の特徴を取り出し、それらをそれぞれの特徴を表す記号の列と見なしてデータ全体の特徴を抽出する場合を考える。このときには、記号列がある特徴のシーケンスに一致するかどうかを判別するために、オートマトンを使用することができる。しかし、細部の特徴として出力される記号が必ずしも一意に決められるとは限らず、また誤った記号が出力される可能性をも含んでいる。そのためクリスプな状態遷移をするオートマトンを用いることはこの場合には有効ではない。そこでファジィオートマトンを用いることが有効となる。

ファジィオートマトンが状態遷移を行なうときには、遷移元の状態のメンバーシップ値と状態遷移行列の要素とが、t-normにより演算される。t-normの性質として、演算後のメンバーシップ値が演算前の値より大きくなることはない。このため、メンバーシップ値の十分には信用できない記号列をファジィオートマトンに消費させた場合、終了状態や出力記号のメンバーシップ値が必要以上に小さくなると考えられる。

この問題を解決するために、ファジィオートマトンの状態遷移における t-normの代わりに新たな演算を用いることを提案する。この演算を用いた合成を用いることにより、信頼性の低い状態遷移によって小さくなったメンバーシップ値を、以後の情報の信頼性に基づいて回復するような効果が得られる。よって、時系列情報が多少の誤りを含んでいたとしても、その影響を受けずに有効な特徴の抽出をすることが可能となる。

2. ファジィアルゴリズムを用いた時系列情報からの特徴抽出

ファジィアルゴリズムを用いて時系列情報から特徴を抽出する方法を以下に述べる。まず始めに、入力情報のミクロな特徴に基づいて量子化を行なう。この際にクリスプな量子

化では信号の誤りの影響を大きく受けるので、ファジィ量子化を行なう。

次に、量子化された情報がオートマトンにより受理されるか否かにより、ある特徴を示すか否かを判定する。この際にもクリスプではなく、ファジィオートマトンを用いる。ただし、オートマトンの状態遷移行列はクリスプなものを用い、入力記号がファジィ化されていることによりファジィ状態遷移を行なう。

2.1. ファジィベクトル量子化

入力信号のN次元ベクトルを以下のように表す。

$$\mathbf{u}=(u_1,u_2,\cdots,u_N)\in R^N \qquad (1)$$

入力信号の列$\mathbf{u}(t-T)$～$\mathbf{u}(t+T)$からn個の記号の集合Iへのファジィベクトル量子化は、次のようなメンバーシップ関数で表される。

$$f_q: R^{N(2T+1)}\ni \mathbf{u}^T\mapsto \mathbf{I}\in[0,1]^n \qquad (2)$$

2.2. ファジィオートマトン

ファジィオートマトンはW.G.Wee らによって定式化されている[2]。ここでは以下のように記述する。

$$\mathbf{M}(\mathbf{I},\mathbf{Q},\mathbf{V},\mathbf{F}^*,\mathbf{G}^*) \qquad (3)$$

$\mathbf{I}\in[0,1]^n$ ：入力記号のファジィベクトル

$\mathbf{Q}\in[0,1]^m$ ：内部状態のファジィベクトル

$\mathbf{V}\in[0,1]^l$ ：出力記号のファジィベクトル

$\mathbf{F}^*$：状態遷移を表すファジィ行列の集合

$\mathbf{F}(i_j)$ $(\in \mathbf{F}^*)$ は入力記号がi_jであるときの $m\times m$の状態遷移ファジィ行列である。$\mathbf{F}(i_j)$ の各要素は、

$$f_{i_j}(q_p,q_r)\in[0,1],p=1\sim m,r=1\sim m \qquad (4)$$

と表記し、入力記号がi_jのときの、状態q_pからq_rへ遷移するメンバーシップ値である。

$\mathbf{G}^*$ ： 出力記号を生成するファジィ行列の集合

$\mathbf{G}(i_j)$ $(\in \mathbf{G}^*)$ は入力記号がi_jであるときの $m\times l$の出力記号生成ファジィ行列である。$\mathbf{G}(i_j)$の各要素は

$$g_{i_j}(q_p,v_r)\in[0,1],p=1\sim m,r=1\sim l \qquad (5)$$

入力記号がi_jのときに状態がq_pであれば、出力記号として v_rを出すというメンバーシップ値である。

入力記号i_jを消費する前の内部状態を $\mathbf{Q}(t)$、入力記号を $\mathbf{I}(t)$ で表す。このときの状態遷移は以下のように行なう。

$$\mathbf{Q}(t+1)=\cup\{\mathbf{F}(i_j(t))\circ\mathbf{Q}(t),j=1\sim n\} \qquad (6)$$

$\circ$ はmax-min合成を表す。また、任意のファジィ行列 **A,B ,C** に対して、

$$(\mathbf{A}\circ\mathbf{B})\oplus(\mathbf{A}\circ\mathbf{C})=\mathbf{A}\circ(\mathbf{B}\oplus\mathbf{C}) \qquad (7)$$

ただし、

$\oplus$：和

$\circ$：行列積

であるので、

$$\mathbf{Q}(t+1)=\{\cup\mathbf{F}(i_j(t)),j=1\sim n\}\circ\mathbf{Q}(t) \qquad (8)$$

と同じである。

出力記号は以下の式に従って生成される。

$$\mathbf{V}(t)=\cup\{\mathbf{G}(i_j(t))\circ\mathbf{Q}(t),j=1\sim n\}$$
$$=(\cup\{\mathbf{G}(i_j(t)),j=1\sim n\})\circ\mathbf{Q}(t) \qquad (9)$$

2.3. ファジィアルゴリズムを用いた時系列情報からの特徴抽出

ファジィアルゴリズムを用いた時系列情報からの特徴抽出は次のように行なう。

(1)ファジィ量子化により時系列情報$\mathbf{u}(t-T)$～$\mathbf{u}(t+T)$から記号のファジィベクトル$\mathbf{I}(k)$を(2)式により求める。

(2)ファジィ量子化により得られる記号列をファジィオートマトンに消費させ、受理された場合の消費開始時刻から終了時刻までの出力記号の和集合 $\tilde{v}$ を、ファジィオートマトンの出力とする。つまり

$$\tilde{v}(k)=\cup\{\mathbf{V}(k,t),t\in t^*\} \qquad (10)$$

t^*：オートマトンにより受理され得る記号生成開始時刻の集合

をオートマトンの出力とする。

2.4. 新たな合成を用いたファジィオートマトン

ファジィオートマトンにおいて状態遷移を行なうとき、状態を表すファジィベクトルと状態遷移行列との合成を行なう。この合成にmax-min合成を用いる場合、 min演算のために状態遷移の度に状態のメンバーシップ値は小さくなる一方である。状態遷移行列のメンバーシップ値が正しい値であると確信できるならば問題はないが、実際にはそのような状況は稀であると考えられる。また、min演算のようなt-normは２値論理演算のファジィ拡張として導入されたものであり、２値論理を満たすという境界条件を満足するものであれば良いわけである。

ここではt-normの制約にとらわれずに、ファジィオートマトンにおける状態遷移ファジィ行列と内部状態を表すファジィベクトルとの合成に、式(11),(12)のような相乗平均演算を用いることにする。

$$a \textcircled{2} b = (ab)^{1/2} \tag{11}$$

$$F \circ Q = \mathrm{Max}\{ f_{ik} \textcircled{2} q_k \quad ,\text{for all } k, \text{for all } i\} \tag{12}$$

相乗平均演算はt-normの満たすべき以下の要件T1からT4のうち、 T1-a及びT4を満たしていない。

T1−a) $a \textcircled{1} 1 = a$,

T1−b) $a \textcircled{1} 0 = 0$

T2) $a \le b$ ならば $a \textcircled{1} c \le b \textcircled{1} c$

T3) $a \textcircled{1} b = b \textcircled{1} a$

T4) $a \textcircled{1} (b \textcircled{1} c) = (a \textcircled{1} b) \textcircled{1} c$

また、次のような条件を満たしていることもわかる。

$$a \le b \quad \text{ならば} \quad a \le a \textcircled{2} b \le b \tag{13}$$

a=b のときには等号が成立する。

以上の論議では本演算は2項を対象とするものであったが、以下のように n項演算へ拡張可能である。

$$\textcircled{n}(a_1, a_2, \cdots, a_n) = (a_1 a_2 \cdots a_n)^{1/n} \tag{14}$$

n 項演算に拡張した場合には、前述した本演算の満たす条件 (12) は以下のように記述される。

$$\mathrm{Min}\{a_i\} \le \textcircled{n}\{a_i\} \le \mathrm{Max}\{a_i\} \tag{15}$$

3. 数値実験

本手法により時系列情報から特徴抽出が可能なことを検証するために以下のような数値実験を行なった。

[数値実験] 1次元の時系列情報のグラフの”底”となる部分を抽出する。

(1)ファジィ量子化により時系列情報u(t)から記号のファジィベクトルIを求める。記号の種類とその意味を表-1に示す。それら記号に対するメンバーシップ関数を以下に示す。

表-1 入力情報の符号化に用いる記号

記号	意味
I1	グラフが減少傾向である
I2	グラフが平坦である
I3	グラフが増加傾向である

$$\mu_{I1}(k) = E\{\mu_P(u(t+1)-u(t)) \quad ,t = k-n \sim k+n\} \tag{16}$$

$$\mu_{I2}(k) = E\{\mu_Z(u(t+1)-u(t)) \quad ,t = k-n \sim k+n\} \tag{17}$$

$$\mu_{I3}(k) = E\{\mu_N(u(t+1)-u(t)) \quad ,t = k-n \sim k+n\} \tag{18}$$

ここでE{}は平均を表す
ただし、k=0,T,2T,3T,...でありT=2n+1である。また μ_P, μ_Z, μ_N は以下のようなメンバーシップ関数である。

$$\mu_P(x,t) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta_P(t) < x \\ 1 + (x - \theta_P(t))/\theta_P(t) & \text{if } 0 \le x \le \theta_P(t) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{19}$$

$$\mu_Z(x,t) = \begin{cases} 1 - 2x/\theta_P(t) & \text{if } 0 < x < \theta_P(t) \\ 1 - 2x/\theta_N(t) & \text{if } \theta_N(t) < x < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{20}$$

$$\mu_N(x,t) = \begin{cases} 1 & \text{if } x < \theta_N(t) \\ 1 + (x - \theta_N(t))/\theta_N(t) & \text{if } \theta_N(t) \le x \le 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{21}$$

(18)から(20)のメンバーシップ関数における θ_P, θ_Nの値は次のような規則に従って変化する。

$$\theta_P(t+1) = \begin{cases} \dfrac{t \cdot \theta_P(t) + x(t+1)}{t+1} & \text{if } 0 < x(t+1) \\ \theta_P(t) & \text{otherwise} \end{cases} \tag{22}$$

$$\theta_N(t+1) = \begin{cases} \dfrac{t \cdot \theta_N(t) + x(t+1)}{t+1} & \text{if } x(t+1) < 0 \\ \theta_N(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

(2)ファジィ量子化により得られる記号列をファジィオートマトンに消費させ、受理された場合の消費開始時刻から終了時刻までの出力記号の和集合 $\tilde{v}$ を、ファジィオートマトンの出力とする。

ファジィオートマトンの内部状態の一覧を表 -2 に、各記号に対する状態遷移行列を表 -3 に示す。また出力記号を生成する行列は入力記号に対して不変であり、出力記号が1つとなるものを用いるので式(24)のようなベクトルとなる。

表-2 内部状態の一覧

内部状態	備考
q_0	開始状態
q_1	
q_2	
q_3	終了状態

$$G = [\ 0\ 0\ 1\ 0\ ] \quad (24)$$

4. 実験結果及び検討

前述したファジィ量子化及びオートマトンを用いて数値実験を行なった。入力として用いたデータを図-1に、また得られた出力記号のメンバーシップ値を図-2 に示す。図-2において、(a)はt-normのmin演算を用いた場合であり、(b)は式(11)の演算を用いた場合である。

5. おわりに

ファジィアルゴリズムによる時系列情報からの特徴抽出の1つとして、ファジィオートマトンを用いて時系列情報から特徴抽出を行なう方法について論議し、状態遷移ファジィ行列の合成におけるt-normの代わりに新しい演算を用いることを提案した。この手法により、時系列情報が部分的に誤りを含むような場合にも、その影響を少なくする効果があることを計算機実験により検証した。

参考文献

1) L.A.Zadeh, *Fuzzy Algorithm,* Infom. and Control **12** pp. 94-102(1968).

2) W.G.Wee,K.S.Fu, *A Formulation of Fuzzy Automata and its Application as a Model of Learning Systems,* IEEE Trans. Vol.SCC-5, No.3,(1969).

問い合わせ先

法政大学工学部, 郵便番号184, 東京都小金井市梶野町3-7-2, 0423-81-5341(内線304)

表-3 ファジィオートマトンの状態遷移行列

入力記号I1				入力記号I2			
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	1	1	0	0	0	0
入力記号I3							
0	0	0	0				
1	1	0	0				
0	0	0	0				
0	0	0	0				

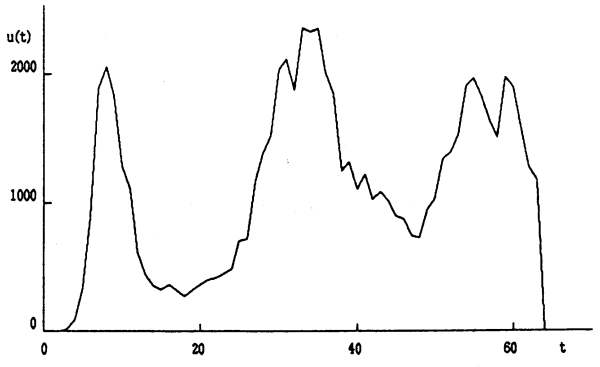


図-1 入力に用いたデータのグラフ

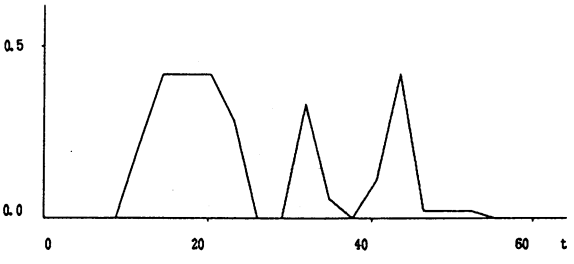


図-2 (a) min演算による出力記号

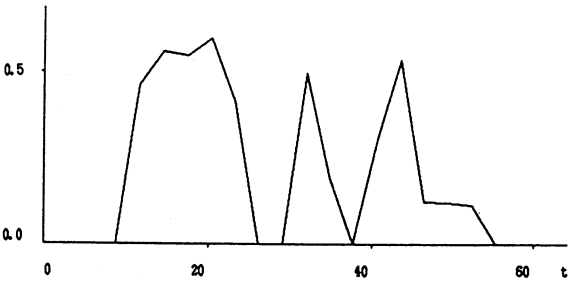


図-2 (b) 相乗平均演算による出力記号

SB5-1

ファジィ予測支援システムとその環境問題への応用

FUZZY DECISION SUPPORT SYSTEM AND ITS APPLICATION TO ENVIRONMENTAL PROBLEMS

甲斐沼美紀子*, 中森義輝**, 森田恒幸*
Mikiko KAINUMA, Yoshiteru NAKAMORI and Tsuneyuki MORITA

*国立環境研究所, **甲南大学理学部
*Natl. Inst. for Environ. Stud., **Konan University

Abstract : We have developed a fuzzy decision support system for the systematic support to analysis and control of the man-environmental system. Although our main concern is the environmental problem, the support system have a universal application in data analysis, system structuring, statistical modeling and simulation. We applied this system to the prediction of the metropolitan environmental problems caused by Tokyo Bay development. The model consists of several rules reflecting local characteristics, and behaves like a nonlinear dynamic model in total through membership functions.

1．はじめに

近年、急速な都市化による広域的な環境変化や地球規模の環境変動が世界的な問題となってきているが、この種の変化は広範囲な領域にまたがった複雑な現象であり、これらの問題を取り扱うためには、専門家の知識と判断を随時とりこみながら広域的な環境の変動を予測していく必要がある。このため、我々は知識情報システム[1)]、モデリング支援システム[2)]、予測シミュレータの三種類の支援システムを開発してきた。

この支援システムの特徴は、情報を様々な角度で提示し、専門家の判断を組み込みながら、対話的にモデルの作成を支援することにある。ここでは、ファジィ理論を適用して、専門家の判断の定量化や、環境システムの非線形性の表現を試みた。

本システムを利用して東京湾岸の開発による環境影響予測モデルを構築した。まず、専門家の知識をデルファイ調査を通じて収集し、知識情報システムに入力した。これらの情報を基に、予測モデルに必要な変数や変数間の関係について検討した。次にモデリング支援システムを利用して、予測モデルを構築した。その際、信頼性のそれほど高くないデータと不確かな知識によるモデリング作業を、視覚的な直感に訴えながら進行し、コンピュータとの対話を通して、地域的特性を考慮したルール群と、過去に存在しなかった状態や実行されたことのない政策結果を予測するための外挿用ルールを構築した。

2．知識情報システム

知識情報システムには次のような機能がある。

① ファイルの登録・表示・修正機能

予測対象に関するいろいろな情報を集めてシステムに蓄える。これは文献調査や専門家へのインタビューなどによる。収集した情報は命題ファイルの形で計算機に入力する。個々の命題ファイルは特定の命題とその推論過程の構造から構成されている。この種のデータを大量に収集し、知識の背景情報や評価情報、情報源などとともに知識情報システムのファイルに入力し、管理させる。

② ファイルの検索機能

命題ファイルに記入されているキーワードを検索画面に表示させることができ、その中から適当なキーワードを選択すると、キーワードを含む命題の命題番号と中心命題が表示される。命題番号を選択することにより対応する命題を表示させることができる。

③ 構造モデル作成機能

複数の命題ファイルに共通する事象あるいは関連する事象を組み合わせて事象を連結し、構造図を作成することができる。

④ ファジィ推論機能

定性的な構造モデルから定量的な予測を行なうためには変数の数値データが必要である。しかし、一定の数値データを入手することは可能でも、統計手法が十分な説得力をもつほどデータが豊富ではないケースが頻繁にみられる。この場合には専門家がデータを解釈して変数間の関係を判断し、ファジィ推論[3)]を用いた予測結果を表示させることができる。

⑤ 数値データのグラフ表示機能

予測モデル作成に必要なデータを蓄積し、必要に応じて、時系列図、色ぬり地図、散布図等を表示させることができる。

ファジィ推論モデルは次のようなルールの集合から成るモデルである。

$$[\text{ルール}P^k] \quad \text{if } x_i \text{ is } A^k_i,\ i=1,2,\cdots,r \quad \text{then } x_j \text{ is } A^k_j,\ j=r+1,\cdots,m \qquad (1)$$

ここで、$I=\{x_1,x_2,\cdots,x_r\}$を説明変数の集合、$O=\{x_{r+1},$

$x_{r+2},\cdots,x_m\}$を被説明変数の集合とする。$A^k{}_i$はファジィ部分集合であり、メンバーシップ関数を$A^k{}_i(x_i)$と表わす。

ファジィ推論モデルによる予測は次のように実行する。ルールの総数をp個とし、$x_i(i=1,2,\cdots,r)$の入力値を $x_{i\cdot}$とするとき、$x_j(j=r+1,\cdots,m)$の予測分布は次式で与えられる。

$$B_j(x_j)=\max_k \{w^k \cdot A^k{}_j(x_j)\} ,$$

$$w^k=\min_i \ A^k{}_i(x_{i\cdot}) \qquad (2)$$

ここでのファジィ集合は、高い、中ぐらい、低いなどの言葉で与えられ、専門家が対話的に設定できるようになっている。予測値はメンバーシップ関数の重心として与えられる。

図1は石油価格を制御変数としてファジィ予測を行った例である。石油価格の急激な上昇に伴って一時的に交通公害は緩和されるが、高度情報化、産業のソフト化の進展につれて再び悪化する様子が窺える。この種の予測によって変数間のマクロな関係を検討することができ、予測という思考実験を通じて問題の理解を深めることができる。

3．モデリング支援システム

モデリング支援システムは数値データ及び因果関連データを用いて統計モデルあるいは分布モデルの混在する知識ベース型モデルの構築を支援する。各部分領域サブモデルはいくつかのルールの集合であり、分布モデルはデータから統計モデルがうまく構築できない場合、もしくは過去に実行されたことのない政策の影響を予測する場合に構築する。

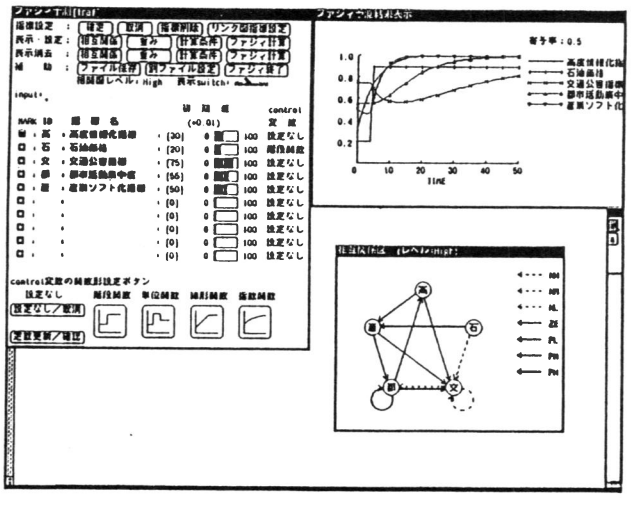


図1　ファジィ推論の一例

3.1　ファジィ予測モデル

ファジィ予測モデルはルールの集合からなるモデルであり、ここでは、結論部が変数の分布を与えるタイプと線形式で表現されるタイプとを扱う。まず、分布予測モデルとは、(1)式のようなルールの集合からなるモデルであるが、メンバーシップ関数は過去のデータの分布から合成される[4]。

分布予測モデルによる予測は次のように実行する。ルールの総数をp個とし、$x_i(i=1,2,\cdots,r)$の入力値を$x_{i\cdot}$とするとき、$x_j(j=r+1,\cdots,m)$の予測分布は次式で与えられる。

$$B_j(x_j)=\frac{\sum_{k=1}^{p} w^k \cdot A^k{}_j(x_j)}{\sum_{k=1}^{p} w^k} ,$$

$$w^k=\prod_{i=1}^{r} A^k{}_i(x_{i\cdot}) \qquad (3)$$

一方、線形予測モデルは次のようなルールの集合からなるモデルである。

$$[\text{ルール}L^k] \quad \text{if } x_i \text{ is } A^k{}_i,\ i=1,2,\cdots,r$$
$$\text{then } x_j=c^k{}_{j0}+\sum_{h\neq j} c^k{}_{jh}\cdot x_h, j=1,2,\cdots,m \qquad (4)$$

ここで、結論部線形式右辺の変数の中にはx_jと同時間ステップの状態変数が含まれうる。ただし、ここで扱う予測モデルは逐次的に値が決定していく体系となっている。このモデルによる変数$x_j(j=r+1,r+2,\cdots,m)$の予測値は

$$x_{j\cdot}=\frac{\sum_{k=1}^{p} w^k \cdot x^k{}_{j\cdot}}{\sum_{k=1}^{p} w^k}$$

$$w^k=\prod_{i=1}^{r} A^k{}_i(x_{i\cdot}) \qquad (5)$$

により与えられる。ただし、$x_{i\cdot}(i=1,2,\cdots,r)$はモデルへの入力値であり、$x^k{}_{j\cdot}$はルール$L^k$の線形式から求められる$x_j$の値である。局所的な線形関係をうまく発見することと、メンバーシップ関数の同定がモデリングの作業である[5]。

ここで利用するファジィ予測モデルはこれら二つのタイプを混合したものである。まず、顕著な地域的特性を示すいくつかの入力変数について条件部を構成する。結論部では、おのおのの被説明変数に対し、線形モデルかまたは分布モデルの一方を選択する。最終的な混合形モデルによるシミュレーションでは、各ルールからの出力は線形モデルについてはデータフィッテ

ィングにより、一方分布モデルの場合はメンバーシップ関数の重心を出力する。

ところで、条件部には必ずしもすべての入力変数に関する条件を記述するわけではない。入力変数同士も相関を以て動いていると考えられるから、条件部に登場しない入力変数のとりうる範囲を分布モデルの考え方を用いて制限する。これは一部の入力変数の値を指定するだけでモデルが動くことを意味する。すなわち、I_a（$\subset I$）を入力変数のうち値を固定する変数とし、$I_{\bar{a}} = I - I_a$とおくとき、$x_j \in I_{\bar{a}}$ に対し、

$$w_j(x_j) = \frac{\sum_{k=1}^{p} w^k \cdot A^k{}_j(x_j)}{\sum_{k=1}^{p} w^k},$$

$$w^k = \prod_{x_i \in I_a} A^k{}_i(x_{i\cdot}) \qquad (6)$$

という分布が想定できる。ここに$x_{i\cdot}$は入力変数x_iの入力値である。

シミュレーションを実行する際は$w_i(x_i)$を確率分布化し、乱数により入力値を決めるか、または対話的に入力する。$I_a=\phi$の場合は$w^k=1(k=1,2,\cdots,p)$とおき、つねに$w_j(x_j)$の存在を仮定する。ここでは、この関数$w_j(x_j)$を入力変数x_jの入力許容関数と呼ぶ。これは過去のデータが示唆する入力変数の組合せの分布を表現している。対話的に入力変数の値を逐次決める際、一つの変数の値が決まるごとに残りの変数の分布が変化する。この状況を計算機のスクリーンに表示すれば、モデルの動きを見ながらシミュレーションが実行できる。なお$w_j(x_j)$は、値を決める変数の順序には依存しないことに注意する。

3.2 対話的アルゴリズム

ファジィモデルの同定プロセスは、データのファジィ分割、メンバーシップ関数の同定、および線形式の変数選択というサブ問題から構成されるが、これらは互いに独立ではなく、モデリングを複雑にしている。環境問題のモデリングでは、データの不備やモデリングの目的を考慮した、対話的なモデリングが望ましい。すなわちここでは、主観判断支援のために、データやモデルを観る装置「対話型モデリング支援システム」を導入する。

モデリング・プロセスは、ルールベース型モデルの条件部を構築するためのデータ空間分割パート、結論部の線形モデル構築のための統計モデリングパート、およびモデル検証のためのシミュレーションパートに大きく分けられる。これらのパートでの検討を繰り返し行うことにより、ルールベース型モデルを構築していく。

クラスタリングパートにおいては、一つの入力変数に着目して、データ分離度という指標と分割のされ方のグラフック表示とを参照して、総合的判断によりデータ分割を実行する。このとき留意することは、データがよく分離されているかということと、各部分データを用いて変数間の線形関係がうまく抽出できそうかということである。また、各変数のデータのファジィ部分集合への帰属度を表わすメンバーシップ関数のディフォルトを設定する。すなわち分布モデルの初期設定を行う。

線形モデルの構築は統計モデリングパートにおいて行う。ここでのモデリング・プロセスは大きく三つのステージからなり、それぞれ、数値データの観察、モデル構造の考察、およびモデルの検証に対応している。これらのステージにおける検討を繰り返し行うことにより、各ファジィ部分集合上で最良の線形モデルを構築する。実際は、この統計モデリングパートでまず全域線形モデルを構築し、それよりもルールベース型のファジィモデルの構築が望ましいと判断できるとき、クラスタリングパートに移る。

シミュレーションはルールの結論部を決定するためにルールごとに検討を行うケースと、複数またはすべてのルールを用いてメンバーシップ関数のチューニングを行うケースの二通りを用意する。各ルールに対しては、まず分布モデルによる予測を行う。ついで線形モデルを用いてモンテカルロ・シミュレーションによる予測を行う。これらの結果を比較することにより、各ルールの各被説明変数に対する予測モデルを線形モデルとするか、あるいは分布モデルとするかを決定する。複数のルールを用いるシミュレーションでは、メンバーシップ関数のチューニングにより、非線形部分の調整あるいは許される外挿の範囲を決める。場合によっては、外挿のための新たなルールの構築が必要となる。

以上の手順の基本的特徴は、データおよびモデルをいかに「観る」かという発想のもとで、データのファジィ分割と線形モデル構築作業とを分離し、メンバーシップ関数のチューニングによりルールの協調化を図ることにある。各ファジィ部分集合上で線形モデルを構築するが、線形モデルが不適切な被説明変数に対しては分布モデルを採用する。また、過去のデータの範囲外を予測するために、メンバーシップ関数の拡張または外挿用ルールの構築を検討する。

3.3 外挿用ルール

あくまでも将来を予測するのであるから、過去に存在しなかった状態や、実行されなかった政策の影響に対しても対処できなければならない。このためには過去のデータから構築したモデルでどの範囲まで外挿を許すかということを検討しなければならない。また、ルールが合成される非線形部分もメンバーシップ関数のチューニングにより修正しなければならない。ここでは、以下のようなシミュレーションにより対話的にこれらの検討を行う。

ルールの総数をpとする。$x_{ih}(h=1,2,\cdots,N)$を入力変数$x_i \in I$に対するh番目の入力とする。だだし、$x_i \in I_a$の場合はN個の値はすべて等しく、$x_i \in I_a^-$の場合は分布$N[w_i(x_i)]$に従うN個の乱数で与える。ここに、

$$N[w_i(x_i)]=w_i(x_i)/\int_{Dom[x_i]} w_i(x_i)dx_i \qquad (7)$$

変数 $x_j \in O$のルール$R^k(k=1,2,\cdots,p)$による予測値を$x^k{}_{jh}(h=1,2,\cdots,N)$とする。ただし、予測値は、線形モデルではデータフィッテイング、分布モデルではメンバーシップ関数の重心とする。それらのルール平均は

$$x_{jh} = \frac{\sum_{k=1}^{p} w^k \cdot x^k{}_{jh}}{\sum_{k=1}^{p} w^k},$$

$$w^k=\prod_{i=1}^{r} A^k{}_i(x_{ih}) \qquad (8)$$

であり、予測値x_{jh}の確信度を

$$C_h = \prod_{i=1}^{r} w_i(x_{ih}) \Big/ \max_h\{\prod_{i=1}^{r} w_i(x_{ih})\} \qquad (9)$$

と定義する。さらに、乱数に関する平均を

$$w_{j\cdot} = \sum_{h=1}^{N} C_h \cdot x_{jh} \Big/ \sum_{h=1}^{N} C_h \qquad (10)$$

により計算し、予測の散布度を

$$S_{j\cdot} = \sum_{h=1}^{N} C_h \cdot \{x_{jh}-x_{j\cdot}\}^2 \Big/ \sum_{h=1}^{N} C_h \qquad (11)$$

と定義する。予測値の確信度、散布度等を参照して、モデルの評価を行う。

4．東京湾開発影響予測への適用

「東京湾開発」とは東京湾およびその臨海部における開発のことをいう。東京湾開発についての計画は、構造段階のものまで含めると既に 200件近くも提案されているが、現在事業中あるいはある程度まで計画が固まっているものは50件程度である。東京湾地域で計画されている開発は多様かつ広範囲に及び、約3000haである。主要な道路や架橋計画だけでも総延長約80kmに及ぶ。

東京湾開発に関連するデルファイ調査の集計によれば、当然のことながら臨海部でのオフィスや住宅の需要が高まることが予想されている。また、交通施設整備にともなう新たな開発需要、廃棄物処理地の不足、ゆとりある空間創造の気運などにより、埋め立て再開発の需要はますます伸びると予想されている。これにともない、水質汚濁、交通公害、自然保護、災害などの諸問題に対する悲観的なシナリオが支持されている。

ここで構築したモデルは、東京湾開発による波及効果を、人口密度、産業出荷額密度、交通密度および二酸化窒素濃度の側面からマクロに捉えようとするものである。東京湾岸におけるオフィスと人口増加のほかに、各行政区の住宅、道路、工業用地面積割合をシナリオとして与えることが可能である。シナリオとして与えない場合は、過去の統計に基づいたファジィ推論により政策の可能な分布が求められ、それに従う乱数によりシナリオ値が決定される。

モデル構築に利用するデータは関東地方全域の市および区のもので、地域によってかなりのばらつきがある。散布図によるデータの視察から、全域の線形回帰モデル構築は不適当であると判断し、データ分割による条件付き区分線形モデルを構築する。ここで、条件はファジィ集合として与え、メンバーシップ関数をチューニングすることにより、複数の区分線形モデルを統合的に用いて予測を行う。つまり、各地区は少しずつ異なるモデルを持つことになり、全体として一つの非線形モデルを構成する。ただし、部分データセットによっては線形モデルが不適切なケースがあり、その場合は予測値の条件付き分布を与える分布モデルを採用する。

最終的なモデルの評価は我々人間の判断によるしかないので、シミュレーション結果を見ながらモデルの再考を繰り返すことにより、さらにモデルの信頼度を高めていきたい。

<u>参考文献</u>

(1) 甲斐沼,森田,中森:知識ベース・システムの開発,第5回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集,147/152 (1989)
(2) Nakamori,Y.:Developoment and application of an interactive modeling support system, Automatica, 25, 2, 185/206 (1989)
(3) 寺野,浅井,菅野共編:ファジィシステム入門,オーム社, 255p (1987)
(4) 中森,馬屋原,甲斐沼,森田:混合型ファジィモデル構築について,第5回ファジィ・システム・シンポジウム講演論文集,166/174 (1989)
(5) Sugeno,M. and G.T.Kang:Structure Identification of fuzzy model, Fuzzy Sets and Systems, 28,15/33 (1988)

問い合わせ先：〒305　つくば市小野川16-2
国立環境研究所
甲斐沼美紀子
TEL 0298-51-6111,EXT 322
FAX 0298-51-4732

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SB5-2

キーワード間の関連性およびその漠度を用いた文献検索支援

Document Retrieval Support using Associations between Keywords and its Vagueness

吉田　裕見・　　廣田　薫・・
Hiromi Yoshida,　　Kaoru Hirota
・ ＮＫＫ　エレクトロニクス研究所
Electronics Research Center, NKK Corporation
・・ 法政大学工学部
College of Engineering, Hosei University

ABSTRACT : A theoretical study for retrieval support of document databases using associations between keywords is presented. It is proposed that the association between keywords is defined as a similarity measure based on the co-occurrence of keywords in documents. A measure which depends upon the amount of information is applied to the vagueness contained in the associations , and the association is defined as an interval value. Finally the above study is adapted for making the database , which has associations between keywords , and for making a retrieval support simulation system for the information engineering field of the database of JICST.

1．まえがき

情報の検索・収集の典型である文献データベースに対する検索では、一般的に検索者は自分の要求する概念を代表する語をシソーラス中の統制された用語の中から選択し、それをもとに検索論理式を設定しなければならない。従って、文献検索では検索キーワードの選択が重要な位置を占める。

検索を支援する方法として、用語間の関連性に集合論に基づくモデルを適用した、ファジィシソーラスを利用するもの(*[1])、あるいは、キーワード関係知識ベースを利用するもの(*[2])等の情報検索モデルが提案され、その試作システムの性能が報告されている。

ここでは、用語間の関連性に対して、集合論に基づく類似性測度を導入することにより、関連度として定義するとともに、関連度に含まれる情報のあいまいさ（漠度）に対して情報量に左右される心理的な量感覚を持たせた測度を導入することにより、関連度を区間値として取り扱う検索支援モデルについて提案する。

また、上記のモデルを実際に公開されている文献データベースである、ＪＩＣＳＴ（日本科学技術情報センター）の科学技術文献データベースの特定の領域を対象として適用した、検索支援の試作システムについてその結果を報告する。

2．検索論理式と検索支援のファジィモデル

一般的に文献検索を行なう際の検索条件は、論理演算子と検索キーワードから構成される論理式を用いる。ここでは、 AND / OR / NOT の３種類の論理演算子と検索キーワードから構成される検索条件を前提として、検索結果集合に含まれる各論文に対するファジィ集合論を適用した評価について検討する。(* [1],[2])

2．1　検索論理式

検索論理式 Qは、副検索式 SQ と論理演算子から構成され、(2.1)式および(2.2)式に示す連言標準系で表わされるものとする。キーワードを Kで表わすと、

$$Q = SQ(1) \wedge SQ(2) \wedge \cdots \wedge SQ(N) \qquad (2.1)$$

$$SQ(I) = K1(I) \vee K2(I) \vee \cdots \vee Kn(I) \vee \neg Kn(I)+1 \vee \cdots \vee \neg Kn(I)+m(I) \qquad (2.2)$$

N　：　副検索式SQの数
n(I)　：　I番目の副検索式SQ(I)に含まれる'¬' を持たないｷｰﾜｰﾄﾞの数
m(I)　：　I番目の副検索式SQ(I)に含まれる' ¬' を持つｷｰﾜｰﾄﾞの数

ここで、　N ≧ 1
n(I)≧0　かつ　m(I)≧0
かつ　n(I)+m(I)≧1

例えば、(2.1)式 を用いて、『ファジィ集合を扱える言語処理系で、Ｐｒｏｌｏｇ　あるいはＬＩＳＰをベースとする言語処理系(ﾊﾟｰｿﾅﾙｺﾝﾋﾟｭｰﾀ用を除く)に関する文献』を検索する場合の検索論理式は、

Q = ('ﾌｧｼﾞｨ集合')∧('言語処理系')
∧('Prolog','LISP')∧(¬'ﾊﾟｰｿﾅﾙｺﾝﾋﾟｭｰﾀ')

で表わされ、副検索式は各々、
SQ(1)=('ﾌｧｼﾞｨ集合')、SQ(2)=('言語処理系')、
SQ(3)=('Prolog','LISP')、
SQ(4)=(¬'ﾊﾟｰｿﾅﾙｺﾝﾋﾟｭｰﾀ')
で表わされる。従って連言標準系の各副検索式は、各々異なる属性を表わし、副検索式を構成する各キーワードがその属性値を示す。

(2.1)式および (2.2)式の条件に適合する文献は、集合演算子∩、∪を用いてそれぞれ(2.3)、(2.4)式で表わされる。

$$SR(I) = D(K1(I)) \cup D(K2(I)) \cup \cdots \cup D(Kn(I)) \cup D(\neg Kn(I)+1) \cup \cdots \cup D(\neg Kn(I)+m(I)) \qquad (2.3)$$

$$R = SR(1) \cap SR(2) \cap \cdots \cap SR(N) \qquad (2.4)$$

D(K)　：　ｷｰﾜｰﾄﾞ K を持つ文献集合
SR(I)　：　SQ(I)に対する文献集合
R　：　Qに対する文献集合

2．2　検索支援のファジィモデル

i 番目の文献のキーワード集合を Ai とし、副検索式の j番目のキーワードと i番目の文献の関連度 Rij は、(2.5) 式で定義されるものとする。

$$Rij \triangleq \bigcup_{Kk \in Ai} Wjk \qquad (2.5)$$

∪ : S ノルム

ここで Wjk は、検索キーワード Kj と Aiの要素であるキーワード Kk 間の関連度を示す数値で、後述の類似性測度 S(Kj,Kk) を用いて表わされる。 Rij については、通常の文献検索（二値の検索）では、

$$Rij = 1 \quad Kj \in Ai$$
$$= 0 \quad Kj \notin Ai$$

と、考えることができる。

(2.5) 式の S ノルムに対するファジィ演算として、代数和 (Algebraic Sum)演算および MAX演算を採用した場合について検討する。

(1) 代数和演算を採用した場合

$$Rij = 1 - \prod_{Kk \in Ai} (1 - Wjk) \qquad (2.6)$$

(2) MAX演算を採用した場合

$$Rij = \max_{Kk \in Ai} (Wjk) \qquad (2.7)$$

i 番目の文献の SQ(I) に対する適合度 ri(I)は、(2.3)式から

$$ri(I) = \bigcup_{Kj \in SQ(I)} Rij \qquad (2.8)$$

(2.8)式を具体的に計算するにあたって、SQ(I)の各キーワードを否定詞を持たないものと持つものに分け、それぞれを $Kj^{\oplus}$ 、$Kj^{\ominus}$ で表わす。 $Kj^{\ominus}$ に関するファジィ否定演算としては一般的な“１からの差”演算を用いる。

(2.8)式の S ノルムに対するファジィ演算として、代数和演算およびMAX演算を採用した場合について検討する。

(1) 代数和演算を採用した場合

$$ri(I) = 1 - \{ \prod_{Kj^{\oplus} \in SQ(I)} (1-Rij) \cdot \prod_{Kj^{\ominus} \in SQ(I)} (Rij) \} \qquad (2.9)$$

(2) MAX演算を採用した場合

$$ri(I) = \max_{Kj^{\oplus} \in SQ(I),\ Kj^{\ominus} \in SQ(I)} \{ (Rij), (1-Rij) \} \qquad (2.10)$$

i 番目の文献の検索論理式 Qに対する適合度 ri は、(2.4) 式から、

$$ri = \bigcap_{I=1}^{N} ri(I) \qquad (2.11)$$

∩ : t ノルム

(2.11)式の t ノルムに対するファジィ演算として、代数積 (Algebraic Product)演算および MIN演算を採用した場合について検討する。

(1) 代数積演算を採用した場合

$$ri = \prod_{I=1}^{N} \{ ri(I) \} \qquad (2.12)$$

(2) MIN演算を採用した場合

$$ri = \min_{I=1}^{N} \{ ri(I) \} \qquad (2.13)$$

(2.12)式あるいは(2.13)式 が、検索論理式 Q に対する i番目の文献の適合度を [0,1]閉区間のメンバシップ値として表わす。

3．キーワード間の関連度を表わす測度

語と語の関連度を表わす尺度として、語の概念の近親性を表わす類似性測度を採用する。ファジィ集合論に基づく類似性測度としては、いくつかのものが提案されている。(*[3])

ここでは、関連度を表わす測度として、(3.1)式で表わされる類似性測度 S を採用する。(*[1])

$$S(a, b) = \frac{\| f(A) \cap f(B) \|}{\| f(A) \cup f(B) \|} \qquad (3.1)$$

ここで、 f(A) ：語 a の出現頻度
f(B) ：語 b の出現頻度

(3.1)式の ‖ A ‖ は、ファジィ集合 A の濃度(Cardinality)を示す。 (3.1)式中の f(A)、f(B)として具体的には、関連語の抽出源とした文献集合中の各文献の持つキーワード集合の要素として、a および b の出現する度数を採用する。

(3.1)式で定義される類似性測度 Sを、心理学における対象間の類似性に関する集合論的なモデルを用いて検討する。 Tversky は、以下の２つの性質((3.2)式 (3.3)式)を満たす関数 Fをマッチング関数と呼び、マッチング関数を用いた集合論的モデルを提案している。(*[4])

△={a,b,c,･･･} ： 特徴の集合として特徴づけられた対象の集まり
A,B,C ： a,b,c に付随した特徴の集合
S(a,b) ： a の b に対する類似性測度。
a,b in △。

とすると、

(1) マッチング(matching)

$$S(a,b) = F(A \cap B, A-B, B-A) \qquad (3.2)$$

(2) 単調性(monotonicity)

$$S(a,b) \geqq S(a,c) \qquad (3.3)$$

↑

$A \cap B \supset A \cap C$, $A-B \subset A-C$, $B-A \subset C-A$

(3.1)式は、Tversky の提案している類似性に関する集合論的モデルのうち、ratioモデル((3.4)式)において、特徴に関する対称性を考慮した場合(α=1.0, β=1.0)に相当する。

$$S(a,b) = \frac{f(A \cap B)}{f(A \cap B) + \alpha f(A-B) + \beta f(B-A)} \qquad (3.4)$$

α、β ： 定数、$\alpha \geqq 0$、$\beta \geqq 0$
f ： 非負の測度。例えば、濃度

4. 関連度の信頼性

4. 1 関連度のあいまいさを表わす測度

キーワード間の関連度を表わす測度として、(3.1)式に示す類似性測度を採用した。
しかしながら、(3.1) 式は、特徴の集合の濃度の比で表わされているため、濃度の絶対値に依存しない測度となっている。

ここで、(3.1)式で表わされる関連度のあいまいさを表わす測度（漠度）V について検討する。

$$V : I \times I \rightarrow [0,1] , \quad I = \{ 0 \text{ 以上の整数} \}$$

V として、(4.1)式で表わされるものを考える。

$$V = F(f(A) , f(B)) \qquad (4.1)$$

V に、S の情報のあいまいさを示すVagueness 的な性質をもたせ、V の必要条件を検討する。

(1) 境界条件

$$F(\infty , \infty) = 0.0 \qquad (4.2)$$
$$F(1 , 0) = 1.0 \qquad (4.3)$$
$$F(0 , 1) = 1.0 \qquad (4.4)$$

(2) 単調性

$a1 = f(A1)$, $a2 = f(A2)$
$b1 = f(B1)$, $b2 = f(B2)$
$a1 \geqq a2$, $b1 \geqq b2$
とすると、

$$F(a1 , b1) \leqq F(a2 , b2) \qquad (4.5)$$

(3) 対称性

$$F(a , b) = F(b , a) \qquad (4.6)$$

4. 2 測度を表わす関数の同定

V は、情報 S のあいまいさを示す測度である。V の情報量 f(A)、f(B)の増減に対する変化の割合は、人間の心理的要因に依るところが大きい。

心理的印象として、例えば、情報量の多い(V が小さい) 場合の情報量の増減に対する V の変化の割合は、情報量の少ない(Vが大きい) 場合の情報量の増減に対する V の変化の割合より小さいと考えるのが妥当である。

V の変化量 V' に及ぼす心理的要因による影響が大きいこと、また、それは情報量を表わす測度の１つである V 自体の値に左右されることから、 V' を V のべき関数として定義する。(*[5])
V' を a(=f(A))、b(=f(B)) を用いて表現すると、

$$\frac{\partial V}{\partial a} = -\alpha V \qquad (4.7)$$
$$\frac{\partial V}{\partial b} = -\beta V \qquad (4.8)$$

α、β : 定数

(4.7)式および(4.8)式から、

$$dV = \frac{\partial V}{\partial a} da + \frac{\partial V}{\partial b} db \qquad (4.9)$$
$$= -\alpha V \, da - \beta V \, db$$

$$\therefore \quad V = C \cdot e^{-\alpha a - \beta b} \qquad (4.10)$$

C : 定数

境界条件(4.2)式は満たされており、(4.3)、(4.4)式より、

$$1 = C \cdot e^{-\alpha} = C \cdot e^{-\beta} \qquad (4.11)$$
$$\therefore \quad \alpha = \beta \ , \quad C = e^{\alpha} \qquad (4.12)$$

従って、(4.10)式は、以下のようになる。

$$V = e^{-\alpha(a+b-1)}$$
$$= e^{-\alpha(f(A)+f(B)-1)} \qquad (4.13)$$

(3.1)式で定義したキーワード間の関連度を S_0 とし、(4.13)式から求められる漠度 Vを用いて、最終的なキーワード間の関連度 Sを、次の(4.14)式、(4.15)式で各々、上限値および下限値が与えられる区間値 [S_l , S_u]として取り扱う。

$$S_l = S_0 \cdot (1 - V) \qquad (4.14)$$
$$S_u = S_0 + (1 - S_0) \cdot V \qquad (4.15)$$

5. 検索支援システムの試作

5. 1 試作システム

JICST の科学技術文献データベースを対象として、理論の検証を目的とした検索支援システムを試作し、ワークステーション(NEWS NWS-841)上に実装した。
概略の流れ図を、図. 5.1 に示す。

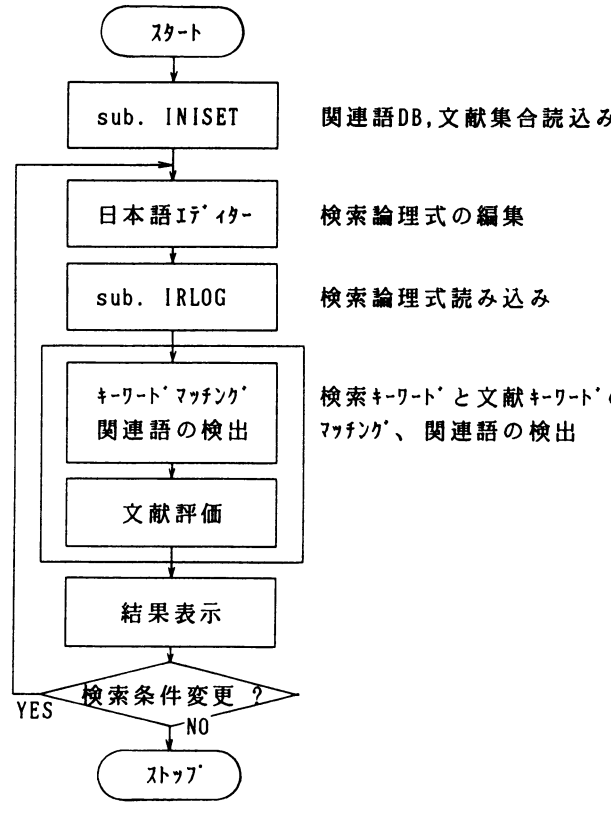


図. 5.1 試作システムの流れ図

試作システムでは、JICST データベースの情報工学の分野から検索した最新の 300文献を母集団として、各文献から抽出したキーワード 1132 語についてキーワード間の関連度を計算し、そのマトリックスをデータベース化した。

(4.13)式の未定の定数αについては、一対のキーワードの出現頻度の和(f(A)+f(B)) を全ての対について母集団内で求め、和の最大値近傍で漠度 Vが 0.1程度になるように決定した。この場合、αは 0.05 となる。図. 5.2 にキーワード対の出現頻度を示す。

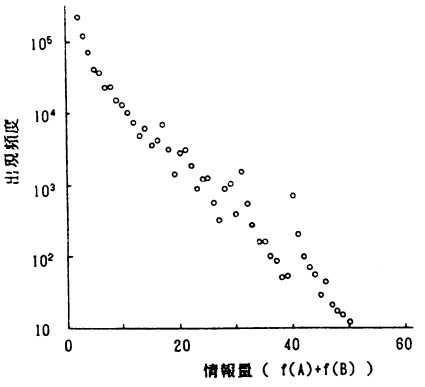


図. 5.2 情報量とその出現頻度

文献の評価にあたって、s ﾉﾙﾑ および t ﾉﾙﾑに対するファジィ演算として、代数和および代数積演算を採用した。以下に評価のアルゴリズムを示す。

(1) 入力された検索論理式の各キーワード毎にそれ自身を含む関連語集合に展開する。
(2) 各文献毎に文献の持つキーワードの中に関連語が含まれているか否かのマッチングを行う。マッチしたキーワードについては、関連語の持つ関連度S の値を与える。
(3) (2.6)式、(2.9)式、(2.12)式に従って文献の検索論理式に対する適合度を求める。
(4) (2),(3) を各文献について行なう。

以上の結果から適合度の大きい順に文献をソーティングし、その結果を検索者に示している。

5. 2 シミュレーション結果

計６名の被験者に各自の業務に沿った検索要求を設定してもらい、試作システムを用いて、その要求に対する検索支援のシミュレーションを行った。関連度のついては、S_0、S_U、S_1の３種類のものを用いた。

選定された文献は、各文献についてその要約から検索要求にどの程度適合しているかを、被索者が以下の３段階で評価することにより、試作システムの有効性を確認することとした。

○ : 適合している。
△ : 関連がある。
× : 不適合。

表. 5.1 は、試作システムが選定した上位５文献についての被験者による評価をまとめたものである。表. 5.1 には比較のため、適合度1.0 の文献（検索キーワードと文献の持つキーワードが完全にマッチする文献）の評価結果を表示した。

表. 5.1 によると、実施したシミュレーションの範囲内では、関連語を用いることにより、キーワードの完全マッチングによる検索結果と比較して、約２倍の関係する文献が選定されている。但し、S_0、S_U、S_1 の各結果の間に有意な差は現われていない。

表. 5.1 には、検索要求に対応する領域の文献が母集団に含まれていない場合の結果も含まれており、この場合には適合度順の文献の並びと被験者の評価との間にばらつきがある。文献適合度の値が高い検索結果を見ると、適合度順の並びと被験者による評価との対応は良い傾向にある。

表. 5.1 選定文献の評価結果

関連度 / 評価	S_0	S_U	S_1	S_0 (1.0)
○	14	14	13	8
△	35	35	38	12
×	82	82	79	10

6. むすび

文献データベースに対する検索支援の方法として、データベースの特定の領域におけるキーワード間の関連度を用いる方法は、検索要求に関連するより多くの文献を選定するうえで有効である。今後、母集団となる文献を拡充し、漠度を導入した場合の差異を確認していく予定である。

参考文献

[1] 三宅輝久、宮本定明、中山和彦、” ﾌｧｼﾞｨ集合に基づくﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽの索引語関係の生成と情報検索への応用”、第4回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ講演論文集、pp.309-312 , 1988.
[2] Y. Ogawa, T. Morita , "A fuzzy Document Retrieval Method Using Keyword Connection Matrix and Its Learning Method", Proc. of 3rd IFSA Congress , pp.149-152 , 1989.
[3] Dubois,D. and Prade,H., Fuzzy Sets and Systems : Theory and Applications , Academic Press , pp.21-25 , 1980.
[4] Tversky,A. , "Features of Similarity " , Psychological Review , Vol.84 , No.4 , pp.327-352 , 1977.
[5] Lindsay,P.H. and Norman,D.A. , 情報処理心理学入門Ⅰ , ｻｲｴﾝｽ社 , pp.259-279 , 1983.

問い合わせ先：〒210 川崎市川崎区南渡田町1-1
NKK ｴﾚｸﾄﾛﾆｸｽ研究所
吉田 裕見
TEL 044-322-6277
FAX 044-322-6280

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SB5-3

為替ディーリング・サポート・システムにおけるファジィ経済モデル

A fuzzy economic model in decision support system for foreign exchange dealing

柳生辰夫 Tatsuo Yagyu
深海　悟 Satoru Fukami
高木友博 Tomohiro Takagi
技術研究組合　国際ファジィ工学研究所
Laboratory for International Fuzzy Engineering Research

Abstract : A present Decision Support System does not adjust the varying dynamics, at least in the short-run. This research considers a foreign exchange dealing as an example of this system.

In economics the exchange rate is one of the most difficult variable to determine. It is not only influenced by economic activity but also economic policy, political effect and so on.

For this reason we made the relations between Japan and US. economical model using fuzzy theory and systemized expert knowledge of economist and dealer.

The model includes eight blocks, money market, external balance, final demand, prices, production, employment,exchange rate,and stance of central bank and consists of the variables of eight blocks and abstracted variables based on expert knowledge.

1．はじめに

意思決定支援システム（以下DSSと称する）は、シミュレーション、予測、最適化、データ検索・加工、などを通じて様々な層の意思決定に役立つ情報を提供するシステムである。最終的な判断は人間の持つ経験や勘により行なわれる。また、DSSが対象とする業務は従来からPLAN, DO, SEEのパターンで進められてきた。すなわち、データーベースに蓄えられたデータをもとに静的に計画を作成し、それを実行し結果を評価するというサイクルである。しかしながら、意思決定支援システムの対象が、時々刻々変化するような場合には、対象の状況を早く正確に認識するかが、意思決定結果に重要な影響を及ぼすことになる。

我々は、今後のDSSにおける問題点を明らかにすると共にその解決策を探ることを目的として、為替ディーリングサポートシステムの研究を進めている。

為替ディーリングにおいてはディーラーは例えば米貿易収支、米失業率等の具体的な数値データ、あるいは要人の発言等を入力データとして、景気、物価等の現在の状態および今後の見通しを推測し、これらの推測値に基づいて判断をくだしている。ここで、米貿易収支、米失業率から景気の動向を推測するためには経済のメカニズムに関する知識が必要である。本稿で述べるファジィ経済モデルはこの経済メカニズムを表現することを目的とするものである。本稿ではこの経済モデルに関して、数値データとニュースで発表されるテキストデータを組み合わせて処理をする方法について論じ、ついで経済モデル上での各変数の状態を更新する方法について述べる。さらにモデルで扱う変数をフレームで表現することを検討し、最後に結論と今後の課題について述べる。

2．為替ディーリングサポートシステムの概要

現在我々が想定しいるシステムは、状態認識部、状態群、予測・シナリオ生成部よりなる。

ここで状態群とは物価動向、生産動向、中央銀行のスタンスなど抽象化された経済の状態を表す水準値を持つ変数群(以下これをマクロ変数と呼ぶ）である。

状態認識部は、システムに入力される各種経済指標(数値データ)及び要人の発言などのニュース(テキストデータ)から、経済メカニズムに関する知識をもとにこれらマクロ変数の水準値を更新する部分である。

予測・シナリオ生成部は、マクロ変数の水準値をもとに為替相場動向の予測を行い、予測を説明するシナリオを生成する部分である。

3．ファジィ経済モデル

(1)　経済モデルの位置づけ

本経済モデルは、為替ディーリングサポートシステムにおける状態認識部で使用されるものであり、以下の2つを表現することを目的としている。

(a)マクロ変数項目を具体化した経済の状態
(b)経済メカニズムに関する知識

ここで(a)はモデル中の状態変数(ミクロ変数）で、(b)はモデルの構造でそれぞれ表現する。

(2)　状態表現

状態は以下の2種類の状態変数により実現する。

(a)ミクロ変数
(b)マクロ変数

ここでミクロ変数は本モデルが持つ変数であり具体的には、貿易収支、失業率の状態といったものに対応する。ミクロ変数は、さらに具体的な数値、テキストデータ、因果の関係性を記述した属性からなる。マクロ変数は状態認識部の出力になるものであり、本経済モデルに基づく推論処理の結果得られるミクロ変数の状態を抽象レベルに解釈したものである。

これらの変数により表現する状態は市場関係者が現在把握している状態であり、この状態には現在の状態の推定値、過去からの経緯、現在考えている将来の状態が含まれる。

また、状態変数更新のため入力には定性的なものと定量的なものが混在している。これらの情報から状態を表現するため定量値として入力されるデータについては定性値に変換する必要がある。例えば、"前月の失業率5.6%"が入力されると、これまでの傾向および今回の変化率から"失業率は下降傾向であるが今回大幅に増加した"などを導く。

さらに、これらの定性的に表現された情報から現在の水準（レベル）を数値的に計算するため、定性値を定量値へ変換する。レベルは［0,1］区間で表現し、1に近づく程レベルは高くなる。

3.1 モデル構成

経済モデルは、マクロ変数に対応する日米経済それぞれの最終需要、バランス（国際収支）、物価、生産、金融市場、雇用、為替、中央銀行のスタンスの各ブロックからなり、日米経済は物価、金融市場、バランス、為替レートによりリンクされる［1］。各ブロックは、図1に示すような因果関係で結合される状態変数(ミクロ変数)からなる。状態変数が他の状態変数に及ぼす影響は、状態のレベルにより重みづけが変化するルールの集合として表現する。ミクロ変数はさらに経済指標等の数値データ、要人の発言等のテキストデータ、因果関係による影響等の複数の属性より構成される。また、各ブロック自体もマクロ的な状態変数としてブロック内の動向を表現する。

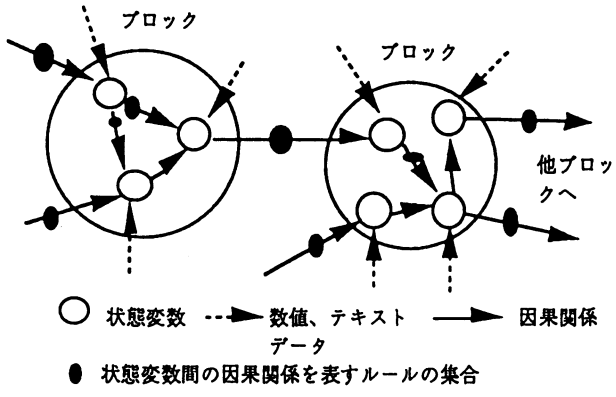


図1　経済モデルのイメージ

以下にいくつかのブロックの例を上げ概要を示す。

(1)　最終需要ブロック

最終需要の状態は、輸出、輸入、国内総需要、家計所得の各状態変数からなる。

輸出、輸入、家計所得の状態値は、実績値としての数値データと因果関係で結ばれる状態変数の状態値、輸出入、家計所得に関する市場の観測、要人の発言により決定される。

国内総需要の状態は、政府支出、設備投資、個人消費の状態変数からなり、その状態値は実績値としての数値データと因果関係で結ばれる状態変数の状態値、モデル内で推論される市場の観測、要人の発言により決定される。

(2)　中央銀行のスタンス

状態変数としては金融政策の状態と金融政策に関する市場の観測からなる。

各状態変数は、実績値としての数値データと因果関係で結ばれる状態変数の状態値、要人の発言により決定される。

3.2 モデル上での状態の更新

本経済モデルによる推論とは、入力された数値データおよびテキストデータをもとにモデル上の各状態変数（ミクロ変数、マクロ変数）を更新し、新たな状態を作り出すことを指す。ここで、各数値データ項目およびニュースはどの状態変数に入力されるかがあらかじめ決められているものとする。したがって本推論処理は以下のステップに分けられる。

ステップ１.データが入力された状態変数の更新
　　これはさらに数値データに基づく更新とテキストデータに基づく更新に分けられる。
ステップ２.変数間の因果関係に基づく他の状態の更新
ステップ３.ミクロ変数の更新が終了した後のマクロ変数の更新

以下ではこれらについて順を追って説明する。

3.2.1 数値データに基づく状態更新

状態変数の属性である経済指標などの時系列データを推論の過程で定性的に扱うため定量値から定性値へ変換する必要がある。そこで数値データのこれまでの傾向性と変化の幅からその数値を定性的に表現する。

（１）相対力指数による傾向判断

相対力指数（ＲＳＩ＝Relative Strength Index）とは、米国の商品市場で開発され普及した指標で、過去１４日間の各前日終値対比変動幅を、上げか下げかの符号を無視して、単純に合計し、この値で、前日対比上昇幅のみ合算したものを除した結果の数字である。為替市場ではこのRSIの数値が高い程、天井に近づいていることを表し、低いほど底値に近いことを表す。目安として、60～70%で下降の転換サイン、30～40％を割ったとき上昇への転換サインとみる［2］,［3］。このRSIを時系列データの傾向判断に利用する。ただし、RSIを次のように解釈する。

1)　30～40%で上昇への転換とみるのは為替市場での取引が活発に行われることによるからであり、人的な介入があまりない経済指標においてはそのまま下降する。

2)　60～70%で下降の転換とみるのも１）と同様の理由で人的な介入があまりない経済指標においてはそのまま上昇すると解釈する。

３）30～70%では横這いと判断する。

以上のRSIに関する解釈をメンバーシップ関数として表したのが図2である。

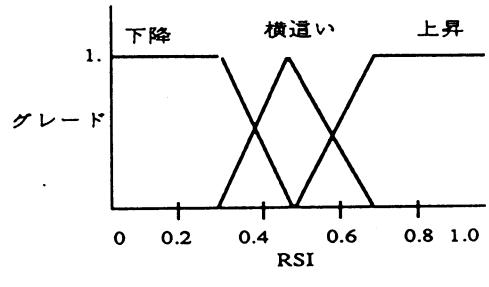


図2　傾向のメンバーシップ関数

RSIの作成手順は次の通り。

1) 過去12ケ月分の前月との差をもとめる。

2) プラスの変化とマイナスの変化の合計を算出し、11ケ月の平均を次の計算式よりもとめる。
Xiはプラスの変化、Yiはマイナスの変化、X12、Y12は当月の変化を表す。

$$SXi = \frac{\left(\sum_{i=1}^{11} Xi/11\right)*10+X12}{11} \quad (1)$$

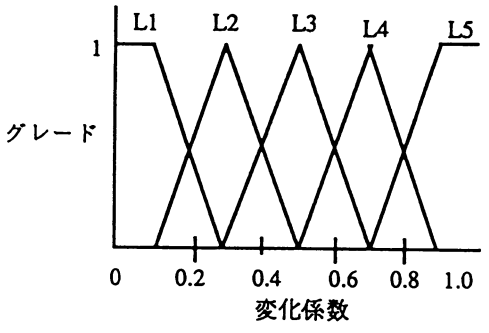
$$SYi = \frac{\left(\sum_{i=1}^{11} Yi/11\right)*10+Y12}{11} \quad (2)$$

3) 相対力指数をもとめる。

（2）変動幅の判断

$$RSI = \frac{SXi}{SXi + SYi} \quad (3)$$

主要経済指標20項目程度(失業率、消費者物価指数など)の対前月比より変化係数をもとめ5段階のラベルを定義し、変動幅に関するメンバーシップ関数として定義したのが図3である。



(L1：大幅な減少、L2：やや減少、L3：横這い、L4：やや増加、L5：大幅な増加)

図3 変動幅のメンバーシップ関数

変化係数の作成手順は次の通り。

1) 過去12ケ月分の対前月比をもとめる。

2) 当月を含む移動平均をもとめる。

3) 移動平均から当月の変化率の偏差をもとめる。

4) 偏差値を［0、1］区間でノーマライズし変化係数をもとめる。

(3) レベルメータ操作

トレンドに逆行またはアクセレレートするような現象を圧力(例えば、インフレ圧力など)と考え、RSIおよび変化係数からもとめられる数値データの傾向と変動幅の組み合わせで直積をとり、直接法により推論を行う。得られた推論結果から圧力のレベルメータ操作量を非ファジィ化する。レベルメータ操作のための制御用ルールの例を表1に示す。

表1 数値データによるレベルメータ操作ルールの例

傾向＼変動幅	大幅な増加	やや増加	不変	やや減少	大幅な減少
上昇	レベル極めてアップ	レベルかなりアップ	レベルややアップ	不変	レベルややダウン
横這い	レベルかなりアップ	レベルややアップ	不変	レベルややダウン	レベルかなりダウン
下降	レベルややアップ	不変	レベルややダウン	レベルかなりダウン	レベル極めてダウン

また、数値データの現在の状態もこのレベル操作により行う。圧力レベルの操作と異なるのは、現在の状態のレベルは過去のデータに関する固有の知識に基づいてレベルの操作をする必要があるという点である。例えば、"失業率が減少傾向で変動幅が対前月比大幅に増加。"のとき、圧力レベルとしては表1より"ややアップ"となるが、"5.6%(前月を5.4%と考えて)ならば極めて低い水準にある。"という固有の知識があるとき、失業の状態のレベル操作は行わない。固有の知識が特に規定されていない時は圧力レベルと同様にレベル操作を行う。

3.2.2 テキストデータに基づく状態更新

要人の発言などのテキストデータについても数値データの扱いと同様に考える。この場合、レベルメータの操作はトレンドとしての市場の観測(状態変数) とテキストデータの判断結果により行う。テキストデータの判断結果を3レベル、例えば金融政策に関する発言であれば(引き締め、現状維持、緩和) とし、金融政策に対する市場の観測が(かなり引き締め、やや引き締め、不変、やや緩和、かなり緩和)で状態表現される時、市場の観測に逆行またはアクセレレートするような発言を圧力と考え、金融政策の状態の圧力レベルを操作する。操作のための制御用知識は表1と同じである。

3.2.3 変数間の因果関係に基づく他状態の更新

ミクロ変数の状態は、専門家から得られた因果ネットワークをもとに推論順序を決定し状態値を更新する。更新された状態による他の状態変数への影響は、それぞれの状態変数固有の知識により重み付けを決定する構造とする。このため知識は"状態変数Aから状態変数Bへの影響"、"状態変数Aから状態変数Cへの影響"というようにルールを記述する。

推論順序はミクロ変数の状態が変化したブロックを起点としてその内部のミクロ変数の状態を更新し、全ての状態を更新後、他のブロックへの推論に移る。

表2に米国経済からみた各ブロック間の直接的な影響関係を示す。この影響関係がブロック間での推論順序に相当する。

例として、米国雇用ブロックの内のミクロ変数の状態が変化したとき、経済モデル上で直接結合されている物価、最終需要ブロックの推論が指示される。次に、物価ブロックにより生産、FRBのスタンスのブロックが指示される。最終需要ブロックにより金融市場、バランスのブロックが指示される。以下同様に為替レートブロックまで順序付けされる。また、日本経済モデルは米国経済モデルの推論指示終了後、物価ブロックより指示される。そして米国経済と同様にブロック単位での推論順序が決定される。

表2　米経済関連動向変化による影響

動向変化＼影響	雇用	生産	物価	最終需要	金融市場	バランス	FRBのスタンス	為替レート	日本経済
雇用			○	○					
生産	○		○	○	○				
物価		○		○			○		○
最終需要		○	○		○	○			
金融市場						○			○
バランス					○			○	○
FRBのスタンス					○				
為替レート			○			○	○		○

ブロック単位での推論順序に基づき各ブロック内のミクロ変数の状態を決定する。

ブロック内の推論順序は因果関係により構成される。例として、雇用ブロック内のミクロ変数である雇用者数の状態値が変化した場合、表3のように推論順序を決定する。

表3　ミクロ変数の推論順序

優先順位 → ／ 状態変化／ブロック							
雇用	1 雇用者数	2 賃金					
生産	15 生産性	16 企業収益					
物価	3 国内卸売物価	4 輸入価格	5 輸出価格	6 総合卸売物価	7 消費者物価		
最終需要	8 家計所得	9 個人消費	10 設備投資	11 政府支出	12 国内総需要	13 輸入	14 輸出
金融市場	18 資金供給	19 資金需要	20 金利	21 株価			
バランス	22 資本流出	23 資本流入	24 貿易収支				
FRBのスタンス	17 金融政策						
為替レート	25 ドルの評価						

この推論順序にしたがって、ミクロ変数の状態を更新する。ここで状態変数間に因果関係があったとき、例えば賃金と消費者物価の状態変数が因果関係で結ばれているとすると、消費者物価の状態は賃金の状態レベルと因果関係の重み付けに関する固有の知識により消費者物価の状態のレベルと消費者物価の圧力レベルを操作する。

3.2.4　マクロ変数の更新

推論が一巡した段階で各ブロック内のミクロ変数の状態からマクロ変数の状態と圧力レベルを更新する。

4.　状態変数の表現

本モデルで扱うファジィ情報は、状態変数の状態と圧力レベル及び数値データの傾向と変動幅である。これらの定性的な表現の変換はメンバーシップ関数、アルゴリズム的知識、経験的な知識をもとに行う。これらの情報を図4にしめすように状態変数とその属性という形で構造化する。この情報と因果関係に基づく推論順序により動的な推論が実行され、推論結果がシナリオ評価に受け継がれる。

5.　おわりに

経済モデルを状態変数のネットワークとしてとらえ、各状態はレベルメータを操作することにより更新することを示した。また、数値データとテキストデータについて同じ枠組みで取り扱えることを提案した。

レベルメータ操作の具体的なアルゴリズムは今後の検討課題である。

謝辞

本研究全般に渡りご指導ご教示くださいました山一証券（株）金子文司課長、LIFE　寺野寿郎所長に感謝いたします。また、本研究を進めるにあたりご協力頂いた三菱総合研究所の栗原　潤研究員、波多野　稜研究員　（株）QUICKの濱田和博主任に感謝いたします。

参考文献

[1] 経済企画庁経済研究所:経済分析「世界経済モデルにおける日本経済モデル」、pp.516-517(1986)

[2] 大海　宏:実戦　為替レート予測、日本経済新聞社(1983)

[3] 三菱総合研究所:人工知能革命、三菱総合研究所、(1985)

問い合わせ先:　〒231　横浜市中区山下町89番地1
シーベルヘグナービル3階
技術研究組合　国際ファジィ工学研究所
柳生　辰夫
TEL　045-212-8231
FAX　045-212-8255

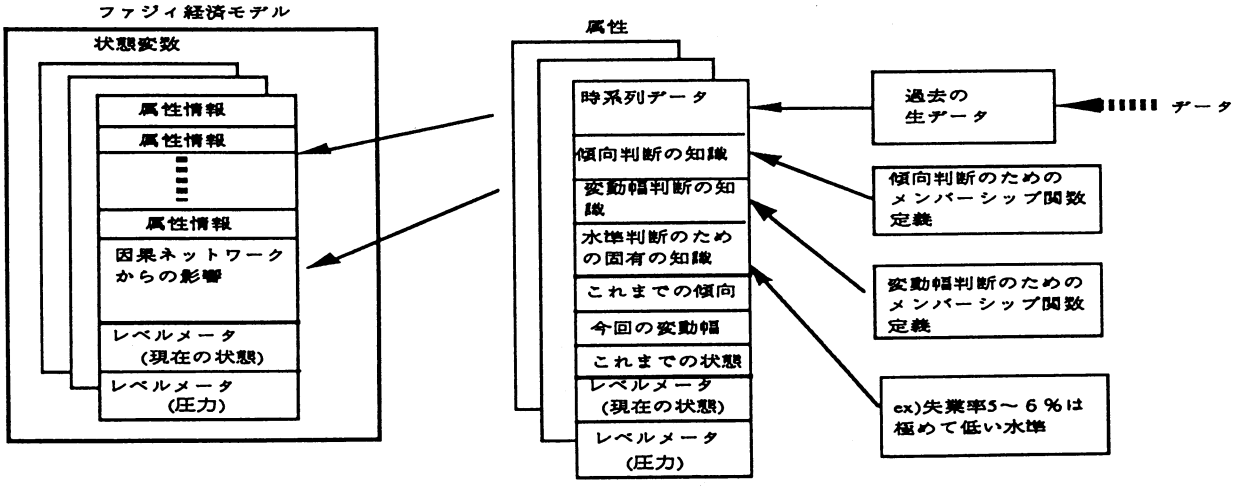


図4　状態変数の表現

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SB5-4

縫製工場における工程編成支援システム構築に関する研究

Development of Fuzzy Knowledge-Based System for Supporting a Linebalancing Task in a Sewing Shop

荒木　攻　　田部　勉　　安瀬　美知子
Ko Araki,　Tsutomu Tabe　and　Michiko Anse
青山学院大学大学院　理工学研究科　経営工学専攻
Graduate School of Industrial & Systems Engineering
College of Science & Engineering
Aoyama Gakuin University

Abstract : This paper presents preliminary information concerning a methodology for applying Fuzzy Sets to a knowledge-based systems for a linebalancing task in a sewing shop in the apparel industry. When foremen in a sewing shop perform a linebalancing task for each released order/each production lot, they assign some operations to some workstations while considering the skill of the workers concerned. Usually, information about each worker's skill and the required skill of each workstation is ambiguous(not explicit). Then, in this research, fuzzy sets are introduced in order to develop a knowledge-based system for the reduction of labor concerning the linebalancing task, under considering both of the worker's skill and the required skill of each work station.

1．はじめに

近年、アパレル産業では消費者ニーズの多様化、個性化に伴い、ロット切り替え生産によって短納期、高品質、かつ低コストの製品を生産し、市場の要求に対応している。その結果、工場では１製造ロット当たりラインの稼働期間は２、３日であり、ロットの切り替えごとに行う工程編成業務は現場監督者の大きな負担となっている。

一方、縫製工場における各工程では、取り扱う材質およびその加工方法から一部を除いて自動化が困難な状況にあり、作業者の手作業による加工が大部分を占めている。このような状況のなかで、作業特性や作業者特性を考慮した工程編成を行うことが必要である。

しかしながら、現在までに研究されてきた工程編成問題解決のための各手法は、前述した各要因を考慮しておらず縫製工場へそのまま適用することはできない。

そこで、本研究は工程編成上重要である作業特性および作業者特性を考慮し、中でも境界領域の曖昧な要因をファジィ理論を用いて取り扱った新しい方法論を確立し、現場監督者の工程編成業務を支援するシステムの構築法を明らかにする。

2．工程編成

工程編成とは、一作業者を加工対象物の流れに沿って配置し、作業者に均等な量の作業を割り当てるなどして、作業者の手待ちをなくすとともに、加工対象物がよどみなく工場内を流れるようにする技術一であり、従来から提案されている方法を大別すると次のものがある。

(1)最適解法を用いるもの
(2)部分的に最適解法を用いるもの
(3)発見的方策(heuristics)を用いるもの

2.1 工程編成上考慮する要因

工程編成上考慮しなければならない基本的な要因を以下に述べる。

(1)サイクルタイム
　サイクルタイムは製品が完成して組み立てラインから送り出される時間間隔である。
(2)作業時間と遊び時間
　それぞれの作業ステーションに割り当てられた作業の総時間を作業時間と呼び、サイクルタイムから作業時間を差し引いた時間を遊び時間と呼ぶ。
(3)作業の先行関係
　製品を生産する上で技術的制約から生じる作業の着手順序の関係。

2.2 縫製工場における工程編成問題

縫製工場における工程編成は、様々な要因を考慮しながら行わねばならない。表１は工程編成上考慮しなければならない主な要因をまとめたものである。

縫製工場の現場監督者は表１に示した要因を考慮しながらラインの稼働上問題が生じないようにうまく編成を行っている。そこで本研究では、工程編成を行っている現場監督者（専門家）のノウハウ（知識）を利用したＡＩ的な手法を用い、表１で示した各種要因を考慮できるシステムの構築法を明らかにしていくものであり、本報告では、各種要因の中で作業の難易水準および作業者の技能水準を考慮した作業ステーションへの作業者割当法について述べる。

3．本システムの基本的枠組み

本システムの基本的な枠組みは、現場監督者（専門家）のノウハウ（知識）を利用したＡＩシステムとして位置づけられる。

表１　縫製工場において工程編成上考慮すべき要因

作業要因	作業者要因	素材の要因
各作業の先行関係 サイクルタイム 作業の難易水準	作業者の技能水準 作業者のモチベーション 作業者の性格 経験作業、未経験作業 未経験作業の訓練（ＯＪＴ）	生地の扱い易さ

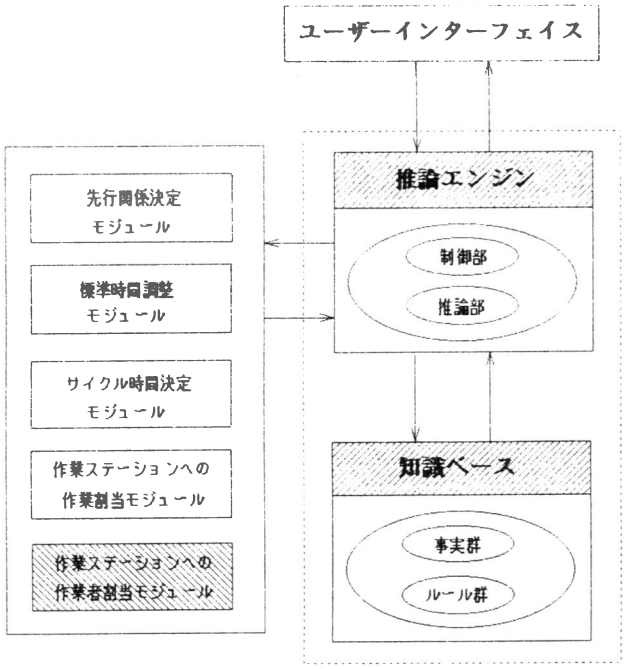


図１　本システムの基本的な枠組み

本システムは図１に示すように知識ベース内の事実とルールに従い、推論エンジンによって各モジュールをそれぞれ実行するものである。

先行関係決定モジュールでは、各作業の直前にある作業、直後にある作業をそれぞれ決定する。各作業の先行関係は製品の仕様によって変わってくるので、工程分析表および製品の特徴データを用い、この特徴のある製品ならばこの作業の直後にこの作業がくる、といった現場監督者の知識を利用し全体の先行関係を決定する。

標準時間調整・サイクルタイム決定モジュールでは、生地の取扱い易さによって標準時間が異なってくるのでその調整を行い、サイクルタイムを決定する。

作業ステーションへの作業割当モジュールでは、先行関係、サイクルタイムの制約に従い、作業割当に関する現場監督者の知識を利用しながら各作業ステーションに各作業の割当を行う。

作業ステーションへの作業者割当モジュールでは、割当済みの作業の難易水準と作業者の技能水準を考慮し各作業ステーションに各作業者を割り当てる。なお、編成効率および製品の品質上、難易水準が高い作業に技能水準が高い作業者を、難易水準が低い作業に技能水準が低い作業者を割り当てるのが最も理想的な割当としている。

４．作業ステーションへの作業者割当法

作業の難易水準および作業者の技能水準はいずれも境界領域が曖昧なものであり、クリスプな形で取り扱うことが不自然な性質を持っている。そこで、ファジィ理論の基本概念であるファジィ集合によって難易水準および技能水準を表現して割当を行う。

4.1 作業の難易水準および作業者の技能水準

現場監督者の持っている工程編成に関する知識の抽出と作業の難易水準および作業者の技能水準についてデータを得るために、某縫製工場で調査を行った。

作業の難易水準および作業者の技能水準は、作業内容、作業者の状態を最も把握している現場監督者にアンケート形式で解答して頂いた。なお作業者の技能水準に関しては、生産性と製品の品質の双方を考慮するため、作業速度と作業の正確さの２つのファクターに分類した。

アンケート調査の方法を以下に示す（図２を参照）。作業の難易水準は、全体の作業を考慮しながら当該作業の難易水準に当たると思われる点を座標上にプロットしてもらった。作業者の技能水準は、作業速度および作業の正確さについて、各作業者を客観的かつ相対的に評価して該当すると思われる点を座標上にプロットしてもらった。

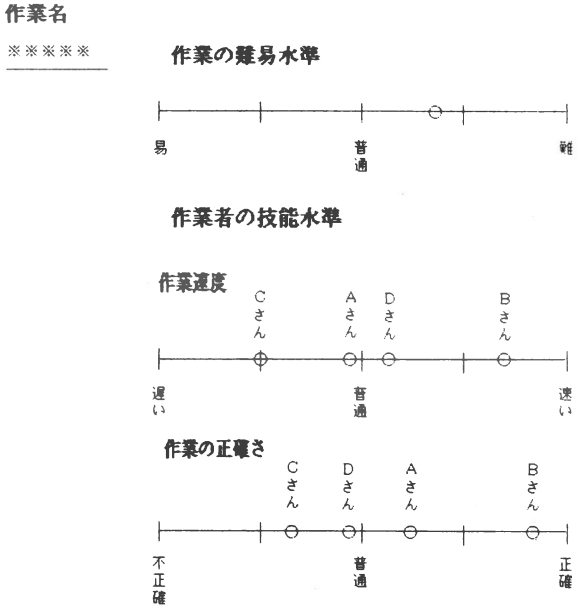


図２　難易水準、技能水準に関するアンケート

4.2 ファジィ集合の形成

作業の難易水準および作業者の技能水準はそれぞれ境界領域が曖昧であり、クリスプな形で取り扱うことが不自然な性質を持っている。そこで、これらをファジィ理論の基本概念であるファジィ集合によって表現する。

図３は、ファジィ集合をメンバーシップ関数によっ

て定義したものであり、横軸は対象となる水準（作業の難易水準、作業者の技能水準）の度合いを[0,1]で表し、縦軸はその曖昧性の度合いを[0,1]で表している。アンケート調査でプロットされた点を[0,1]に変換した値をmとすると、メンバーシップ関数の広がりの下限m_Lおよび上限m_Hは、ある範囲dによって、

$$m_L = m - d \quad (1)$$

$$m_H = m + d \quad (2)$$

と定義される。

メンバーシップ関数は、ファジィ論理関数の論理和（∨）、論理積（∧）の演算を用いて、

$$\mu(x) = \left(\frac{x - m_L}{m - m_L} \wedge \frac{m_H - x}{m_H - m} \right) \vee 0 \quad (3)$$

と表される。

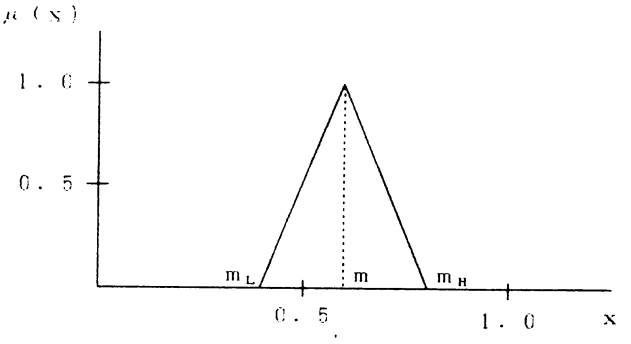


図３　ファジィ集合の定義

4.3 技能水準照合領域の導入

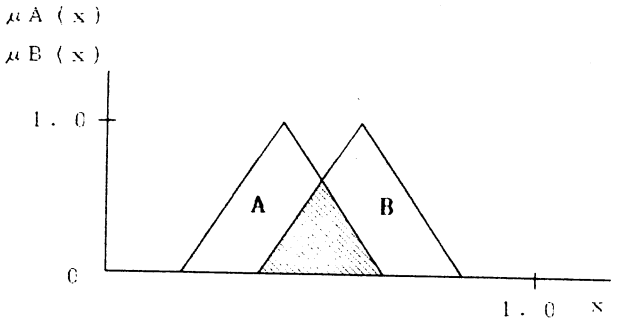
作業と作業者との組み合わせは、難易水準の高い作業に技能水準の高い作業者を、難易水準の低い作業に技能水準の低い作業者を割り当てるのが最も理想的である。そこで、4.2で定義した作業の難易水準を表すファジィ集合と作業者の技能水準を表すファジィ集合を同じ座標平面上で表現し、両者の照合領域が大きいほど組み合わせの適合性が高いものと考えた（図４）。

しかしながら、図５に示すようにある作業の難易水準が低い場合、その作業に最も適合性のある作業者は技能水準の低い作業者であり、その作業に関して技能水準の高い作業者は、その作業を行うのに充分な技能を持ち合わせているのにもかかわらず全く適合性の無いものとして無視されてしまう。つまり、全体としての組み合わせの要求が、各作業レベルでみたときに必ずしも適当ではないことが分かる。

そこで、当該作業の難易水準よりも作業者の技能水準が上回る場合も照合可能にするために、作業の難易水準を表すファジィ集合を拡張した技能水準照合領域の概念を新しく導入した（図６を参照）。技能水準照合領域は、次式で示すメンバーシップ関数で定義される。

$$\mu(x) = \left(\frac{x - m_L}{m - m_L} \wedge \left(\frac{m_H - x}{m_H - m} \vee 1 \right) \right) \vee 0$$

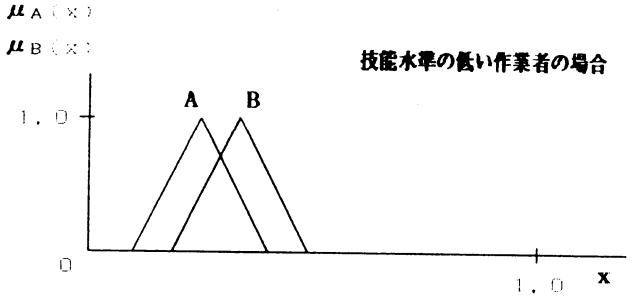
$$= \left(\frac{x - m_L}{m - m_L} \wedge 1 \right) \vee 0 \quad (4)$$

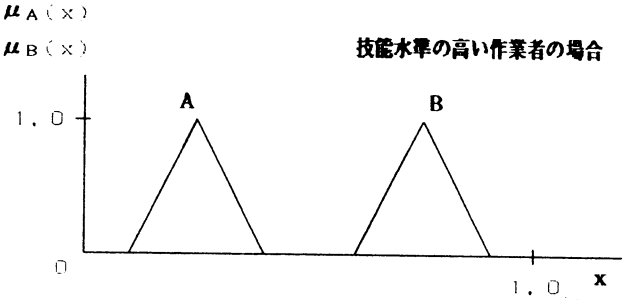


A：作業者の技能水準を表すファジィ集合

B：作業の難易水準を表すファジィ集合

図４　作業の技能水準と作業者の難易水準との照合





A：作業の難易水準を表すファジィ集合

B：作業者の技能水準を表すファジィ集合

図５　難易水準と技能水準の矛盾した照合例

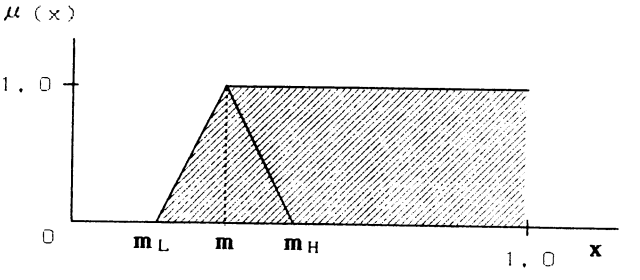


図６　技能水準照合領域を表すファジィ集合

4.4 作業者の技能水準と技能水準照合領域の照合法

ある作業を行う作業者の技能水準が、その作業にどれだけ適合性を持っているかを表す評価尺度として照合度を導入する。

作業者の技能水準を表すファジィ集合をA（実際には生産性を考慮するための作業を行う速さと品質を考慮するための作業を行う正確さの2つのファクターが存在する）、技能水準照合領域を表すファジィ集合をB、それぞれのメンバーシップ関数をμ_A、μ_Bとし、両者を同じ座標平面上で表現する（図7を参照）。

作業者の技能水準を表すファジィ集合Aが技能度照合領域を表すファジィ集合Bと交わる部分をファジィ集合Cとする。ファジィ集合Cをメンバーシップ関数で表現すると、

$$\mu_C = \mu_A \wedge \mu_B \qquad (5)$$

となる。ファジィ集合Cは、ある作業を行う作業者の技能水準が技能水準照合領域とどれだけ一致しているかを意味している。よって、照合度は作業者の技能水準を表すファジィ集合Aの中でファジィ集合Cの領域がどの程度あるかを評価した尺度として考えることができる。

作業者の技能水準を表すファジィ集合Aの面積をS_A、ファジィ集合Cの面積をS_Cとすると、照合度m_{AC}は次式によって与えられる。

$$m_{AC} = S_C / S_A \qquad (6)$$

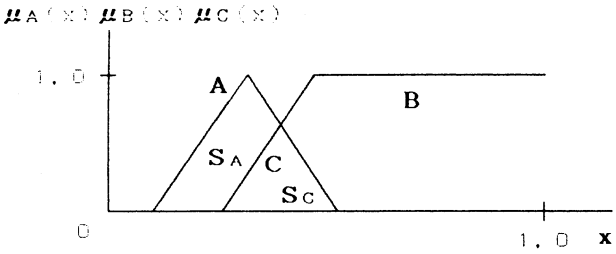


図7　技能水準照合領域と技能水準との照合

4.5 作業ステーションへの作業者割当

作業が割り当てられた各作業ステーションに作業者を割り当てる。

4.4で得られた照合度m_{AC}は、作業者の作業を行う速さおよび作業者の作業を行う際の正確さの2つのファクターについて求めている。そこで、それぞれの照合度を$m1_{ijk}$、$m2_{ijk}$と表す。m1は作業の速さについて、m2は作業の正確さについての照合度である。iは作業ステーション($i = 1,2,\cdots,l$)、jは作業者($j = 1,2,\cdots,m$)（但し、1人の作業者が作業ステーション1台を担当するので$l = m$）、kは各作業ステーション内に存在する作業($k = 1,2,\cdots,n$)を表している。

各作業の中では、正確さを重要視するものや速さを重要視するものが存在する。そこでそれぞれの照合度に重み付けを行う必要がある。作業を行う際の速さの重要性を表す重み付け係数をp_{ik}、正確さの重要性を表す重み付け係数をq_{ik}とする。

各作業者と各作業ステーションとの適合性を作業ステーション内の照合度の和で評価し、これをw_{ij}とすると、

$$w_{ij} = \sum_{k=1}^{n} p_{ik} m1_{ijk} + q_{ik} m2_{ijk} \qquad (7)$$

と表せる。

作業者数と作業ステーション数が同じことから、作業者と作業ステーションとの組み合わせは作業者数（作業ステーション数）の階乗通り存在する（表2を参照）。よって、作業者と作業ステーションとの最適な組み合わせは、各組合わせの中でw_{ij}の和が最大のものとする。

表2　作業ステーションと作業者の組み合わせ

作業者 作業ステーション	1	2	3	・・・	j
1	w11	w12	w13	・・・	w1j
2	w21	w22	w23	・・・	w2j
3	w31	w32	w33	・・・	w3j
・ ・ ・					
i	wi1	wi2	wi3	・・・	wij

5．結論

本研究では、工程編成上重要である作業者割当について、考慮すべき要因である作業者の技能水準および作業の難易水準の曖昧性をファジィ集合によって定義し、難易水準が高い作業には技能水準が高い作業者を割り当て、難易水準が低い作業には技能水準が低い作業者を割り当てる方法を明らかにした。

本研究を進めるにあたって、ＪＵＫＩ（株）および、イトキンファッションソーイング（株）のスタッフの協力を得た。ここに謝意を表する。

参考文献

(1) 村松 林太郎：生産管理の基礎、国元書房、(1979)
(2) 黒田　充：ラインバランシングとその応用、日刊工業新聞社、(1986)
(3) 水本　雅晴：ファジィ理論とその応用、(1988)
(4) 廣田　薫、渡辺　彰彦：フレーム型ファジィ推論エキスパートシステム、法政大学工学部研究集報（第２３号）、P.123/133、(1987)

[問い合わせ先]
〒１５７　東京都世田谷区千歳台６－１６－１
青山学院大学理工学部経営工学科
ＴＥＬ：０３－５３８４－１１１１
（内）３５０８
ＦＡＸ：０３－５３８４－６５００

SC1-1

嗜好を考慮したファジィ色彩調和

COLOR HARMONY BY FUZZY SET THEORY TAKING INTO ACCOUNTO OF USER'S PERSONAL LIKING

稲村聡　　高木敏幸　　中西祥八郎
Satoshi INAMURA, Tosiyuki TAKAGI and Shohachiro NAKANISHI

東海大学　工学部
Fuculty of Engineering, TOKAI University

Abstract

In this paper, the authors propose a system to harmonize colors taking into account of user's personal taste. The system consists of three main processes: a detarminaton process of similar colors, a calculation process of emotional factors, and a determination process of harmony colors. In the first process, the system choses three similar colors from the taste colors for user's personal taste. The estimation values of three emotional factors such as a conspicuous, splender, and pleasantness are calculated in the second process. The resaltant harmony colors taking into acconut of user's personal taste are determined at the final process, and are shown on CRT display.

1．はじめに

色彩調和は、配色から受ける人間感覚が快いものを表すものである。また、色彩調和において感情の概念はとても重要な役割を果たす。しかし、実際人間が配色の調和を判断する時、色彩の持つ属性や色彩学における感情だけで判断するのではなく、個人の嗜好や経験などから判断している。このように、配色における調和問題では人間の嗜好を考慮する必要がある。しかしながら、色彩学では個人の嗜好を考慮した調和論は論じられていない。色彩学で調和色や感情の因子の推定値は、確率論的に明確に表現されているものであるが、これらと確率的に取り扱うことはできない。そこで、ファジィ理論を導入することにより、被験者の嗜好を考慮した対象色における調和色を決定するシステムを構築する。

2．色彩調和論[1]

1．ムーン・スペンサーの色彩調和論

ムーン・スペンサー（ＭＳ）の色彩調和論は、色彩学における色彩調和の代表的な理論である。ＭＳが、色の三属性（色相･明度･彩度）について知覚的に等歩度性をもたせようとした独自な色空間ω空間（第１図参照）を設定し、それによって色調和の定量的表現を試みている。ω空間はマンセル色空間と対応がついている。配色には快いものとそうでないものがあり、快い配色は美的な価値が高く、それを調和という。ＭＳの色彩調和論では快い色の組み合せは、次のときに得られるとした。

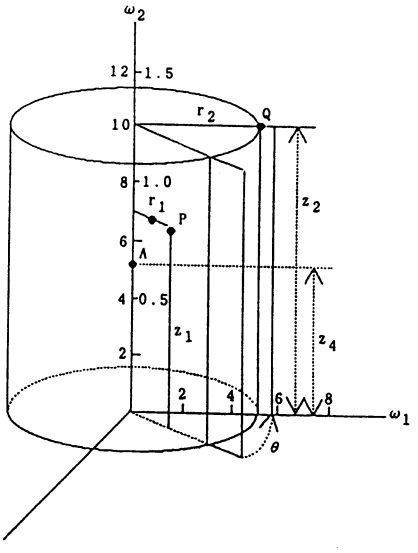
（１）　２色間の差があいまいでないこと。
（２）　ω空間の上で、簡単な幾何学的関係に位置するように選ぶこと。

全ての色はこの色彩調和論で仮定された上で調和色、または、不調和色に分類された。なお、第２図において調和色は次の３つの部門に分類される。

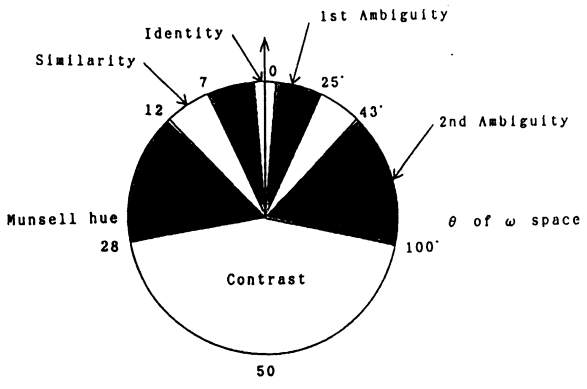
（１）　同一（identity）
（２）　類似（similarity）
（３）　対比（contrast）

不調和色もまた、次の３つ部門に分類される。

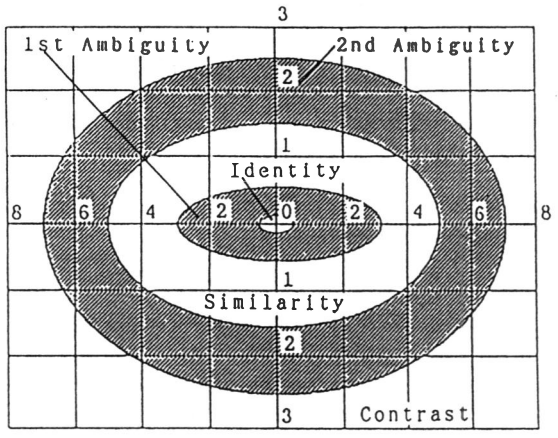
（１）　第１のあいまいな関係（first ambiguity）
（２）　第２のあいまいな関係（second ambiguity）
（３）　眩輝（glare）



第１図　　ω空間



第２図（１）　明度一定平面の調和・不調和領域の範囲



第２図（２）　色相一定平面の調和・不調和領域の範囲

２．感情因子

色彩学における感情の概念は、色彩調和においてとても重要な役割を果たす。そして普通色彩学における感情因子として使われている、こころよさ、目立ち、はなやかさは、推定値を計算することができる。こころよさの推定値は次の式によって表現される。

$$\alpha_i = b_0 + \Sigma b_j \cdot x_{j,i} \qquad (1)$$

表１　（１）式のb_0、b_jの値

b_j	Values
b_0	-0.741028
b_1	$0.106610 \cdot 10^{-1}$
b_2	$-0.251222 \cdot 10^{-2}$
b_3	$0.194627 \cdot 10^{-3}$
b_4	$0.212212 \cdot 10^{-2}$
b_5	$0.369588 \cdot 10^{-2}$
b_6	$0.596614 \cdot 10^{-2}$
b_7	$0.190872 \cdot 10^{-5}$
b_8	$-0.213873 \cdot 10^{-3}$
b_9	$-0.378737 \cdot 10^{-5}$
b_{10}	$-0.585471 \cdot 10^{-5}$
b_{11}	$-0.301059 \cdot 10^{-1}$

ただしb_0そしてb_jは表１に示す。また記号$x_{j,i}$は２色配色iの物理量に対応するものであって、x_jの構造は表２で与えられる。ただし、Z_1, Z_2, Z_3などは次の式によって表現される。

$$z_1 = C\cos\theta, \quad z_2 = C\sin\theta, \quad z_3 = 8.33V \qquad (2)$$

ここで、Cはマンセル彩度、Vはマンセル明度、θは色相に対応している。

目立ちの推定値については、構成色間のコントラスト、および構成色中の最高彩度が寄与することを確認し、２色配色の目立ちの推定値は次の式のように表現される。

$$x_{ci} = 2\Delta E_i + 3C_{max,i} \qquad (3)$$

ここで、ΔE_iは配色iの構成２色間の色差であり、次の式により表現される。

$$\Delta E = [\,(\Delta C)^2 + (4\Delta V)^2 + 2C\,(C+\Delta C)\,\{1-\cos(3.6^\circ \Delta H)\}\,]^{1/2} \qquad (4)$$

表２　（１）式の$x_{j,i}$の構造

x_j	Forms of x_j
x_1	$z_{1A}^2 + z_{1B}^2$
x_2	$z_{2A}^2 + z_{2B}^2$
x_3	$z_{3A}^2 + z_{2B}^2$
x_4	$z_{1A}^2 \cdot z_{2A}^2 + z_{1B}^2 \cdot z_{2B}^2$
x_5	$z_{1A} \cdot z_{1B}$
x_6	$z_{2A} \cdot z_{2B}$
x_7	$z_{3A}^3 + z_{3B}^3$
x_8	$z_{1A}^2 \cdot z_{3A} + z_{1B}^2 \cdot z_{3B}$
x_9	$z_{3A}^2 \cdot z_{1B} + z_{1A} \cdot z_{3B}^2$
x_{10}	$z_{3A}^2 \cdot z_{2B} + z_{2A} \cdot z_{3B}^2$
x_{11}	$z_{3A}^2 \cdot z_{3B} + z_{3A} \cdot z_{3B}^2$

なお$C_{max,i}$は配色の構成色中の最高彩度に対応する。

はなやかさの推定値は単色の推定値の総和で表される。単色のはなやかさの推定値は

$$x_{f,ij} = f(H_{ij}) + 0.2\,(V_{ij} + 0.5C_{ij})^2 \qquad (5)$$

のように表され、$f(H_{ij})$は表３に与えられる。２色配色iにおけるはなやかさの推定値は次式のように求める。

$$x_{f,i} = \Sigma x_{f,ij} \qquad (6)$$

表３　色相によるはなやかさの評点f(H)

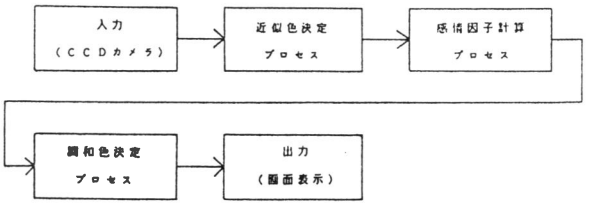
Hue H	PR	R	YR	Y	GY	G	BG	B	PB	P	Achromatic color
f(H)	10	10	10	8	4	2	0	0	2	6	0

３．システム構成

１．システムの概略

本論文で提案する嗜好を考慮したファジィ色彩調和システムは、被験者個人の嗜好を考慮して対象色に関して最も調和する色彩を決定するものである。このシステムは次の主な３つの過程から組み立てられている。概略は第３図に示す。

１）近似色決定プロセス
２）感情因子計算プロセス
３）調和色決定プロセス



第３図　嗜好を考慮したファジィ色彩調和システム

第１の過程では、対象色をＣＣＤカメラから読み込みむ。そして、その対象色に近似する色彩を見つける。色彩学おけ

る感情の概念は、色彩調和においてとても重要な役割を果たしている。本システムでは感情の因子として、「目立ち」、「はなやかさ」、「こころよさ」の3因子を使用する。この3つの感情因子について推定値を計算するのが第2の過程である。この推定値は調和色を決定する際に使用する。第3の過程では前述の推定値と被験者の好み、そして、ムーン・スペンサーの色彩調和論によって調和色を決定する。この結果として得られる色彩はＣＲＴディスプレイに入力色と共に表現される。

2．システムデータ

2－1．被験者個人の嗜好データ

このシステムの目的は、被験者個人の嗜好を考慮して調和色を決定することである。この目的のためには、被験者個人の2色配色における嗜好を調べなくてはならない。そこで、被験者個人の嗜好傾向を調査するに当たり、任意に複数個の色彩を選出した。この色彩を「嗜好度チェック色」と呼び、2色配色における被験者の嗜好度を調査するものである。

これを用いて、個人の嗜好の度合を5段階で表示した。

（1）わずかに好き
（2）少し好き
（3）ほどよく好き
（4）かなり好き
（5）とても好き

本システムでは、これを基本データとして使用する。

2－2．参考候補色

対象色に対して感情因子の推定値を求める際に、データとして用いる。また、対象色に調和する色彩を決定するときに調和候補色として用いる。そして、これもシステムの基本データとして使用する。さらに参考候補色をRC_kで示す。

3．調和色決定手順

（Ｐ1）手順1

はじめにＣＣＤカメラより対象色を読み込み、その色彩のマンセル表色系での値をＣＬ（H_0, V_0, C_0）とする。さらに、この色彩のH_0, V_0, C_0を各々ノーマル点とする3つのメンバーシップ関数μ_{H0}, μ_{V0}, μ_{C0}でファジィ化する。

（Ｐ2）手順2

嗜好度チェック色も、マンセル表色系のＣL_{ti}（H_{ti}, V_{ti}, C_{ti}）で表示する。これらの値H_{ti}、V_{ti}、C_{ti}と（Ｐ1）で述べた3つのメンバーシップ関数を使い、次の値L_iを計算し、そのL$_i$に対応する色彩を嗜好度チェック色より見つける。

$$L_i = \{\mu_{H0} \times (H_{ti}) + \mu_{V0} (V_{ti}) + \mu_{C0} (C_{ti})\} \quad (7)$$

L_iの大きい順に嗜好度チェック色からL_iに対応する色彩を3色選ぶ、これら3色は対象色に対しての近似色と呼ばれる。この3つの近似色をＳC_jで表す。L_iは近似色を決定するに当たり用いる値である。

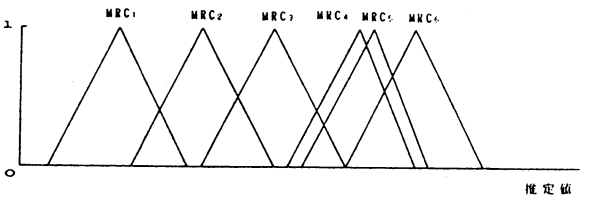
注：（Ｐ1），（Ｐ2）は近似色プロセスに当たる。

（Ｐ3）手順3

色彩学において人間が2色配色の調和を決定する際、調和に寄与する割合の高い感情の3因子の推定値は次のように表せる。

1．目立ちの推定値：α_i
2．はなやかさの推定値：X_{ci}
3．こころよさの推定値：$X_{f,i}$

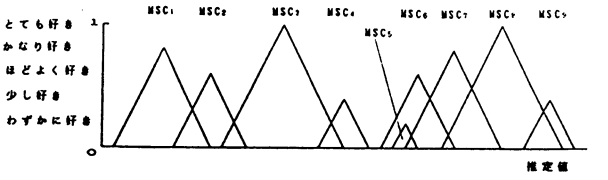
参考候補色中の各色彩と対象色の間のこれらの推定値を計算する。対象色と参考候補色RC_kとの間の3感情因子各々の推定値を第4図のようなメンバーシップ関数MRC_k(con)、MRC_k(spl)、MRC_k(ple)でファジィ化する。この場合、メンバーシップ関数において被験者個人の嗜好は考慮されていないので、メンバーシップ関数各々の高さは、第4図に見られるようにユニット（＝1）になる。



第4図　メンバーシップ関数MRC_k

（Ｐ4）手順4

近似色と嗜好度チェック色の各色彩間の3感情因子の推定値を計算する。そして、近似色と嗜好度チェック色との間の3感情因子の推定値を第5図に見られる様なメンバーシップ関数、MSC_j(con)、MSC_j(spl)、MSC_j(ple)でファジィ化する。3つの近似色は、嗜好度チェック色より選ばれ、近似色と嗜好度チェック色の配色の被試験者の嗜好度は、2章の第1節で記載されているようにすでに知られているので、この嗜好度をメンバーシップ関数の高さに対応させる。



第5図　メンバーシップ関数MSC_j

（Ｐ5）手順5

メンバーシップ関数MRC_k(con)とMSC_k(con)の間の重なる部分、いわゆる適合の度合$D_{j\cdot k}$(con)を計算する。$D_{j\cdot k}$(spl)と$D_{j\cdot k}$(ple)の適合の度合の計算も$D_{j\cdot k}$(con)と同様に行う。これら3つの値より次の値$D_{j\cdot k}$を計算する。

$$D_{j\cdot k} = D_{j\cdot k}(con) + D_{j\cdot k}(spl) + D_{j\cdot k}(ple) \quad (8)$$

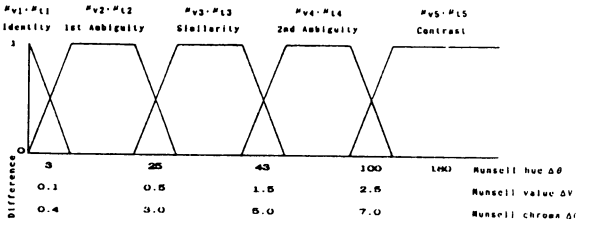
$D_{j\cdot k}$に対応する参考候補色中の色彩において、この最大値が大きいものより上から順にならべる。そのとき、調和色のための候補色として参考候補色から$D_{j\cdot k}$の大きい順に10～20色選出する。

$D_{j\cdot k}$に対応する色彩は、調和に寄与する割合の高い感情における色彩で、これを感情色と呼びＣＣ$_S$で示す。

注：（Ｐ3）から（Ｐ5）までの手順が、感情因子計算プロセスに当たる。

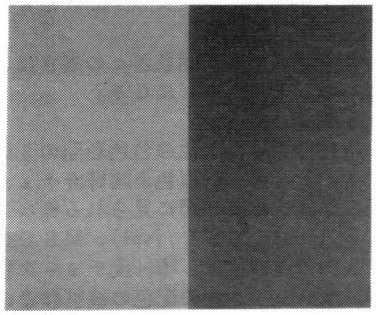
（Ｐ6）手順6

いまでの手順で求められた色彩は、嗜好を考慮した感情色であり調和色であるとは限らない。よって、この感情色が調和色であるか不調和色であるかを判断しなければならない。

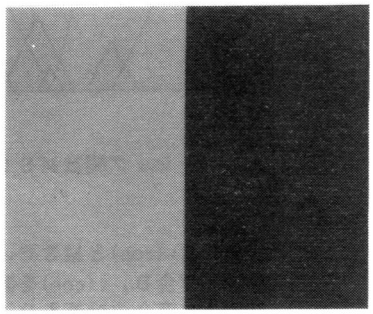


第6図　調和・不調和領域をファジィ化したメンバーシップ関数

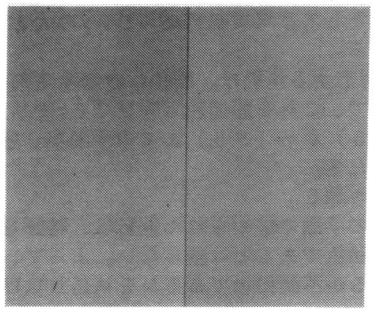
調和判断をするに当たり、我々はムーン・スペンサーの色彩調和論を使用する。しかし、この色彩調和論は調和色、不調和色を明確に分類しているが、人間の感覚ではこのように明確に区別できない。このため、第６図で見られるようなメンバーシップ関数μ_{vi}とμ_{tj}で調和領域と不調和領域をファジィ化する。ただし、μ_{vi}とμ_{tj}は各々明度一定、そして色相一定平面のメンバーシップ関数を表す。



第６図（ａ）　対象色「あざやかな黄」に対する調和色「明るい青紫」



第６図（ｂ）　対象色「あざやかな黄」に対する調和色「明るい赤紫」



第６図（ｃ）　対象色「あざやかな黄」に対する調和色「あざやかな青緑」

第６図　　実験結果

ファジィ化したＭＳの色彩調和論で感情色の調和判断を次式によって行う。

１）メンバーシップ関数μ_{tj}, μ_{vi}において、ラベルi, jそれぞれが奇数に対応するとき

$$HCN_u = D_{j,k} \times \mu_{tj}(CC_s) \vee D_{j,k} \times \mu_{vi}(CC_s) \quad (9)$$

２）メンバーシップ関数μ_{tj}, μ_{vi}において、ラベルi, jそれぞれが偶数に対応するとき

$$HCN_v = D_{j,k} \times \beta(1 - \mu_{tj}(CC_s)) \vee D_{j,k} \times \beta(1 - \mu_{vi}(CC_s)) \quad (10)$$

（βは個人の好みを反映する係数である）。それらの大きい順に並べたHCN_uとHCN_vの値に対応する色彩を見つける。

（Ｐ７）手順７

３つの近似色の対象色との最大距離を規格化する。そして、その規格化されたスケールで、対象色と近似色よりの距離ND_pを測定する。そして、（Ｐ６）で求めたHCN_u、HCN_vと規格化した距離の逆数ND_p^{-1}から次の値を求める。

$$HCq = HCN_u \times ND_p^{-1} \text{ or } HCN_v \times ND_p^{-1} \quad (11)$$

HC_qの最大値に対応する色彩はこのシステムにおいて最高の調和色として選ばれ、そして、調和色と対象色はモニタ画面に表示される。もし、この調和色を好まないとき、次の調和色をモニタ画面に表示する。

注：（Ｐ６），（Ｐ７）は最後のプロセス、調和色決定プロセスに当たる。

４．実験

本システムを用いて実験した結果を第６図に示す。ここで入力した対象色は「あざやかな黄」であり図の左側の色彩がこれに当たる。また、対象色に対しての調和色は右側に示す。

第６図（ａ）に示したものは、対象色に対して最も調和する色彩で「明るい青紫」である。対象色「あざやかな黄」に対しての調和色「明るい青紫」の２色配色は、ムーン・スペンサーの色彩調和の区分である、明度一定平面では「対比」に分類され、色相一定平面では「類似」に分類される。

第６図（ｂ）に示した結果は、対象色に対しての２番目に調和する色彩で「明るい赤紫」である。この２色配色は、ムーン・スペンサーの色彩調和の明度一定平面での区分では「対比」に分類され、色相一定平面での区分では「類似」に分類される。

第６図（ｃ）に表示されているものは、３番目に調和する色彩である。この色彩は「あざやかな青緑」である。対象色「あざやかな黄」に対しての調和色「あざやかな青緑」の２色配色は、ムーン・スペンサーの色彩調和の区分では、明度一定平面においては「対比」に属し、色相一定平面においては「類似」に属する。

このシステムにおいて、嗜好を考慮した調和色を選出した。この実験に基づく結果は、対象色に対して被験者の嗜好に基づいて調和しているものである。

５．まとめ

本論文ではファジィ集合論を用いて被試験者個人の嗜好を考慮した調和色を決定するシステムを提案した。システムで用いた嗜好データは被験者個人のものである。その結果、対象色に対して被験者の嗜好に適する色彩が得られる様になっている。このとき、色彩調和において結果の色彩が最も調和している色彩とは限らない。しかしながら、結果として表示された色彩は嗜好が高いものとして被験者に満足して受け入れられる。

参考文献

［１］日本色彩学会編：「新編　色彩科学ハンドブック」東京大学出版会，1980

問い合わせ先：〒257-12 平塚市北金目１１１７
東海大学工学部電気工学科
中 西 祥 八 郎
TEL 0463-58-1211 EXT 4025
FAX 0463-58-1812

SC1-2

面積効果を考慮したファジィ色彩調和

COLOR HARMONY BY FUZZY SET THEORY TAKING INTO ACCOUNT OF AREA EFFECT

稲村聡　　高木敏幸　　中西祥八郎
Satoshi INAMURA , Tosiyuki TAKAGI and Shohachiro NAKANISHI

東海大学　工学部
Fuculty of Engineering, TOKAI University

Abstract

In this paper, the authors propose a system to harmonize colors taking into account of area effect and user's personal liking. The proposed system consist of following processes : a estimation process of liking, color harmony process by Moon-Spencer, calculation process of area effect, and matching process. In the first process, the system estimate the dgree of user's personal liking for the reference harmony colors. In the second process, the reference colors are classified into harmony or inharmony colors by Moon-Spencer's theory. In process of caluthe third process, harmony colors are calculated by area effect. In the last process of matching, harmony color is, best harmony color taking into account of user's personal tast is determined fromthe muching operations betweenthe results of the first and second processes.

1，はじめに

色彩学において、色彩調和の判断する際の１つの手段として面積効果が挙げられる。面積効果の主たる要因として、配色の面積比とバランス性が挙げられる。バランス性を重視した面積比による効果は、人の心理作用によるところが大きくあいまいなものである。このため、本システムでは、あいまいな部分をファジィ的に取り扱い、さらに嗜好を考慮することにより、より良い面積効果を考慮した色彩調和判断システムを構成する。

2，色彩調和論

1．面積効果

面積効果を考える場合、面積比を考慮した２色配色の色彩調和を実験的に分析した結果、調和する明度と彩度の値を実験的に求めることができる[1]。いいかえると、対象色と求める調和色間の面積比から適量の明度と彩度を実験的に求めることができる。この求められた適量な明度と彩度を持つ色彩が調和色である。色相に関しては、面積比の効果は同じものとして扱っている。

1－1．面積と彩度

彩度は、色彩の強弱を支配する要素で、大きい面積を占めるものは彩度を小さく、小さい面積のものは彩度を大きくする。このような操作により、配色のバランス性を保つことができる。この関係を定量的に求めると表１のような結果になる。

表１　　面積効果による彩度差

面積比		～2	4	8	16	32	64～
標準彩度差	弱	1	1.5	2	3	4	4.5
	中	2	3	4	6	8	9
	強	4	6	8	10	10	10

1－2．面積と明度

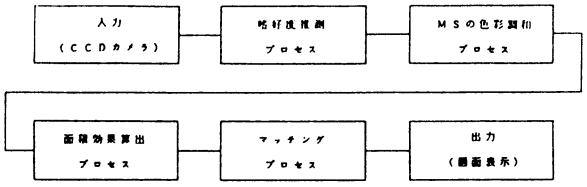
明度は、色彩調和を考える場合になくてはならない因子である。２色配色において対象色の明度に対して、調和する色彩の明度を求める場合、２色間の色相差、彩度差と２色間の面積比によって適切な明度差は異なってくる。この明度差を求めるために色相係数ρ_H、明度係数ρ_V、彩度係数ρ_C、面積比係数ρ_A、対比係数ρを用いる。

3，面積効果を考慮したファジィ色彩調和判断システム

1．システムの概要

本システムは、人の嗜好、ムーン・スペンサー（ＭＳ）の色彩調和論[2]、面積効果を総合的に評価して調和色を決定するものであり、次の４つの過程から成り立つ。概略を第１図に示す。

１）嗜好度推測プロセス
２）ＭＳの色彩調和プロセス
３）面積効果算出プロセス
４）マッチングプロセス



第１図　面積効果を考慮したファジィ色彩調和システム

嗜好度推測プロセスでは、対象色をＣＣＤカメラより読み込み、調和させたい面積比を入力する。そしてあらかじめ被験者の嗜好を調査した嗜好データを用いて、対象色の色彩、面積比から対象色に対して２色配色の嗜好度を推測する。ＭＳの色彩調和導入プロセスでは、先に推測した入力色に対する配色の各々にＭＳの色彩調和判断を行う。次の面積効果算出プロセスでは、調和論の面積効果によって入力色に対して調和する色彩を算出する。最後のマッチングプロセスでは推測した嗜好度の色彩と面積効果より算出した色彩とのマッチングをとり調和色が決定される。そして、結果として得られる調和色はＣＲＴディスプレイ上に入力色と共に表現される。

2．システム構成

2－1．嗜好度推測プロセス

２色配色において嗜好度は、面積、形、色彩などによって異なるあいまいなものである。本システムでは、対象色を背景色、調和色を図形色として背景色と図形色の２色配色の面積効果を考慮した色彩調和を行う。このため被験者個人の２色配色の嗜好傾向を背景色と図形色と面積比を任意に決めその組み合せに対して５段階評価する。この任意に決めた背景色と図形色を嗜好度チェック色と呼ぶ（チェック色と言う）。この２色配色の評価を基本嗜好データとする。この基本嗜好

データを基にして対象色に対して任意の色彩の配色の嗜好度をファジィ的に推論するのに用いるプロセスである。

1）入力面積からの嗜好度推測

面積比自体をファジィ的に扱うため、任意に決めた面積比をノーマル点とするメンバーシップ関数μ_mでこれをファジィ化する。

$SD_N(X_1)$をデータで用いた面積の嗜好度（X_1は任意の色彩各々の組み合せ）とし、入力面積比(W_{IN})に対する嗜好度をSD(X_1)として、次式のように嗜好度を推測する。

$$SD(X_1)= SD_4(X_1)\times\mu_4(W_{IN})+SD_{16}(X_1)\times\mu_{16}(W_{IN}) +SD_{64}(X_1)\times\mu_{64}(W_{IN})+SD_{256}(X_1)\times\mu_{256}(W_{IN}) \quad (1)$$

2）対象色からの嗜好度推測

対象色の明度と彩度（トーンと言う）は、チェック色のトーンや色彩に近似しているか。

a）トーンについて嗜好度推測

チェック色の色相一定平面の色彩について、対象色のトーンに近い色彩（近似色）３つを選び出し、その３つの色彩に対して対象色がどのくらい近似しているかで嗜好度を次のように推測する。

$$BD(X_2)=\{BD_1(X_2)\times(R_2+R_3)+BD_2(X_2)\times(R_1+R_3) +BD_3(X_2)\times(R_1+R_2)\}/(R_1+R_2+R_3) \quad (2)$$

$BD(X_2)$とBD_iはそれぞれ求めたい嗜好度と近似色の嗜好度であり、また、R_1, R_2, R_3は対象色からの距離である。この計算でチェック色の色相について求める。

b）色相について嗜好度推測

チェック色の色相を表す点をノーマル点とするメンバーシップ関数μ_{HH}を構成し、この色と対象色との近似度を次のように求める。

$$BD(X_2)=\sum_{HH=1}^{10}\{BD(HH,X_2)\times\mu_{HH}(H_{IN})\} \quad (3)$$

3）対象色に対して任意の図形色の嗜好度推測

a）任意の図形色のトーンについて嗜好度推測

嗜好度は、（２）式で使用した$BD_i, X_2, BD(X_2)$をVD_N, HH, VD(HH)に置き換えて求める。VD_NとHHはそれぞれ近似色３つの嗜好度とチェック色の色相であり、VD(HH)は評価を求めたい明度と彩度の嗜好度である。また、R_1, R_2, R_3は評価を求めたい色彩の明度と彩度からの距離とする。これを、明度、彩度を各々0.5きざみで分割し、この分割した各々の明度、彩度の組み合せについて行う。この求めた嗜好度をVCD(HH, V, C)で表す。

b）任意の図形色の色相について嗜好度推測

チェック色の色相は大まかに区切っているため調和する色彩を選出するとき信頼性に欠ける。そこで、信頼性を出すために色相を８０分割にして嗜好度DAT(H, V, C)を推測する。２）－ｂで求めたメンバーシップ関数μ_{HH}を用いて、８０分割した各々の色相(H)とチェック色の色相(HH)との近似度で次の式により８０分割にした各々の色相の嗜好度(HHD(VC))を推測する。

$$HHD(V,C)=\sum_{HH=1}^{10}\{VCD(HH,V,C)\times\mu_{HH}(H)\} \quad (4)$$

2－2．ＭＳの色彩調和プロセス

ＭＳの色彩調和論では、全ての色彩は調和と不調和で明確に区別している、しかし、人間は色彩をこのように調和と不調和に明確に区別できない。そこで、第２図の様なメンバーシップ関数μ_{vj}とμ_{ti}を用いて、これらの調和、不調和の区分をファジィ化する。ここでμ_{vj}とμ_{ti}は各々、明度一定、そして色相一定平面でのメンバーシップ関数である。

嗜好度推測プロセスで嗜好度を推測した２色配色は、あいまいにしたＭＳの色彩調和区分で調和領域、不調和領域のどちらに属するか次のように求める。

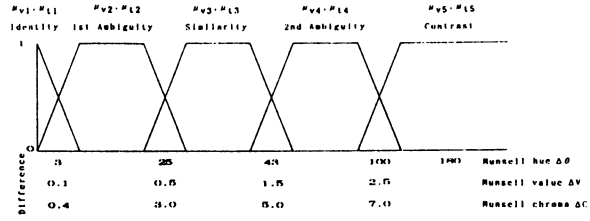
（１）メンバーシップ関数μ_{vj}とμ_{ti}においてラベルi, jが奇数に対応するとき

$$DAT(H,V,C)\times\mu_{vj}(NZ_3)\vee DAT(H,V,C)\times\mu_{ti}(NZ_3) \quad (5)$$

（２）メンバーシップ関数μ_{vj}とμ_{ti}においてラベルi, jが偶数に対応するとき

$$DAT(H,V,C)\times\beta(1-\mu_{vj}(NZ_3))\vee DAT(H,V,C)\times\beta(1-\mu_{ti}(NZ_3)) \quad (6)$$

嗜好度DAT(H, V, C)の各要素をNZ_3で示す。（βは個人の好みを反映する係数である）。このように、求めた嗜好度をDAT_H(H, V, C)とする。

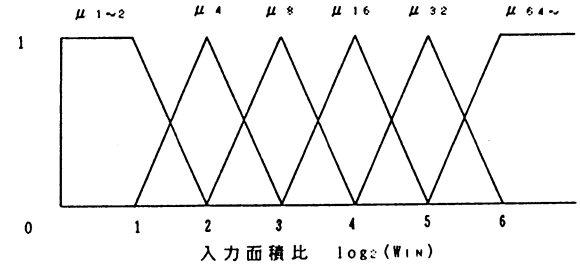


第２図　　調和・不調和領域のメンバーシップ関数

2－3．面積効果算出プロセス

A）適切な彩度

対象となる入力された色彩と面積比に対する適切な彩度を求める。面積比と彩度差には表１のような関係があり、その関係を第３図のようなメンバーシップ関数によってファジィ



第３図　面積比に関するメンバーシップ関数μ_k

化する、これを用いて入力された面積比に対する適切な彩度差をつぎの（７）式より求め、その適切な彩度差を対象色の彩度から加算、減算することにより適切な調和色の彩度を求める。

$$\Delta GC_L=\sum\{\Delta GC_{NL}\times\mu_k(W_{IN})\}$$
$$\Delta GC_M=\sum\{\Delta GC_{NM}\times\mu_k(W_{IN})\} \quad (7)$$
$$\Delta GC_S=\sum\{\Delta GC_{NS}\times\mu_k(W_{IN})\}$$

表１と上で求めた値から次式より本システムで使用した彩度差、強(ΔGC_{NL})、中(ΔGC_{NM})、弱(ΔGC_{NS})の場合のそれぞれの適切な標準彩度差($\Delta GC_L, \Delta GC_M, \Delta GC_S$)を求める（その色相の最高彩度も１０とした場合の彩度差）。この適切な彩度差は対象の対象色の彩度より大きい(+)、または、小さい(-)差があり、適切な彩度(C_1～C_6)は次式より求められる。〔C_B：H_{IN}のときの最高彩度〕

$$C_{1,2}=C_{IN}\pm(\Delta GC_L\times C_B/10)$$
$$C_{3,4}=C_{IN}\pm(\Delta GC_M\times C_B/10) \quad (8)$$
$$C_{5,6}=C_{IN}\pm(\Delta GC_S\times C_B/10)$$

B）適切な明度

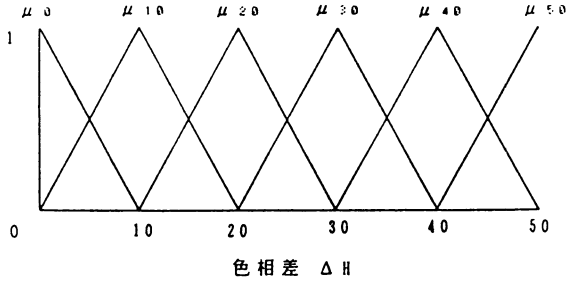
適切な明度を求めるために対比係数を使用する。対比係数は色相係数、明度係数、彩度係数そして面積比係数に分けられ、その各係数の積として表せる。

1）色相係数

色相差と色相係数との間には、表２の様な関係がある。まず第４図のような色相差に関するメンバーシップ関数μ_nを

表2　色相差、入力色彩度による色相係数

色相差		0	10 90	20 80	30 70	40 60	50
色相係数 ρ_H	入力色彩度 1	1.0	0.98	0.92	0.85	0.79	0.76
	2	1.0	0.97	0.89	0.81	0.73	0.70
	3	1.0	0.97	0.87	0.77	0.68	0.64
	4	1.0	0.96	0.86	0.75	0.64	0.60
	5	1.0	0.96	0.84	0.73	0.60	0.57
	6	1.0	0.95	0.83	0.71	0.58	0.54
	8～	1.0	0.95	0.82	0.68	0.55	0.50

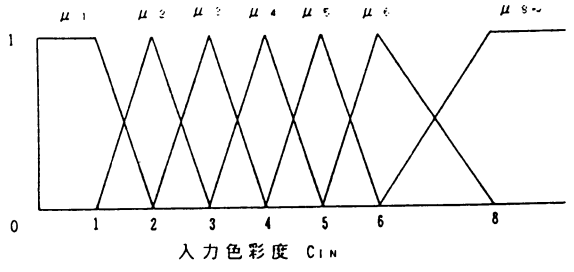


第4図　色相差に関するメンバーシップ関数μ_n

作り、対象色の彩度に対する各色相の色相係数を次式から求める。

$$\rho H'(N)=\sum\{\rho H'_{NC}(N)\times\mu_n(C_{IN})\} \quad (9)$$

次に上式で求められた$\rho H'$から、調和する色の色相についての色相係数を求める。さらに、第5図のような入力色彩度に



第5図　入力色彩度に関するメンバーシップ関数μ_s

関するメンバーシップ関数μ_sを構成し、入力背景色と調和する色との色相差ΔHに対する色相係数を次式から出す。

$$\rho H=\sum\{\rho H'(N)\times\mu_s(\Delta H)\} \quad (10)$$

2）明度係数

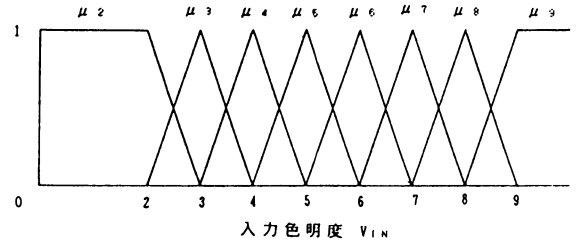
対象色の明度と明度係数には、表3のような関係がある。

表3　　入力色明度による明度係数

入力色明度	2	3	4	5	6	7	8	9
明度係数 ρ_V (+)	1.7	1.4	1.2	1.0	0.8	0.7	0.6	0.5
(-)	–	–	2.7	2.0	1.5	1.0	0.75	0.6

このことにより第6図のような入力色明度に関するメンバーシップ関数μ_vを構成し入力された明度に対する明度係数を次式から求める。

$$\rho V_+=\sum\{\rho V_{N+}\times\mu_v(V_{IN})\}$$
$$\rho V_-=\sum\{\rho V_{N-}\times\mu_v(V_{IN})\} \quad (11)$$



第6図　入力色明度に関するメンバーシップ関数μ_v

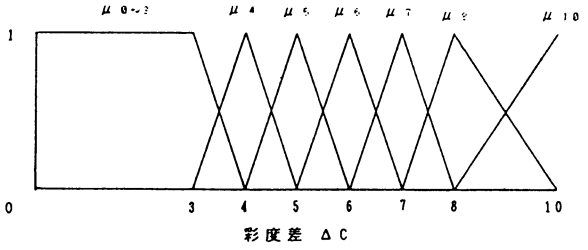
3）彩度係数

対象色の彩度と6つの適切な彩度との彩度差ΔCから、それぞれの彩度差に対する各彩度係数を求める。

彩度差と彩度係数の間には表4のような関係がり、これら

表4　彩度差による彩度係数

彩度差	0～3	4	5	6	7	8	10
彩度係数 ρ_C	1.0	0.95	0.9	0.85	0.8	0.7	0.5



第7図　彩度差に関するメンバーシップ関数μ_c

をファジィ化するために第7図のような彩度差に関するメンバーシップ関数μ_cを構成し適切な各彩度に対する彩度係数を次式から求める。

$$\rho C=\sum\{\rho CC_N\times\mu_c(\Delta C)\} \quad (12)$$

これをそれぞれの適切な彩度に対して行い、それぞれの彩度係数ρC_1～ρC_6を求める。

4）面積比係数

面積比と適切な明度差を求める係数との間には表5のような関係がある。表5の面積比をノーマル点とするメンバーシ

表5　　面積比による面積比係数

面積比	1	2	4	8	16	32	64	128	256
面積比係数 ρ_a	0.7	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	2.3	2.8

ップ関数μ_aを作り入力された面積比に対する面積比係数を次式より求める。

$$\rho A=\sum\{\rho A_N\times\mu_a(W_{IN})\} \quad (13)$$

5）対比係数

各係数を総合した対比係数の計算は次式による。

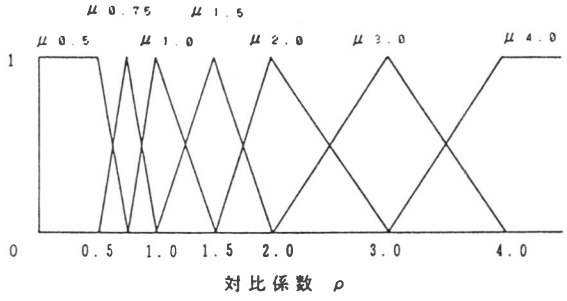
$$\rho=\rho H\rho V\rho C\sqrt{\rho A} \quad (14)$$

対比係数と適切な明度差との間には表6の様な関係がある。第8図のような対比係数に関するメンバーシップ関数μ_tを作り求めた対比係数に対する適切な明度差を次式より求める。

$$\Delta GV=\sum\{\Delta GV_N\times\mu_t(\rho)\} \quad (15)$$

表６　対比係数による適量明度差

対比係数 ρ	適量明度差		
	小対比	中対比	大対比
4.0	5.6	8.0	−
3.0	4.2	6.0	9.0
2.0	2.8	4.0	6.0
1.5	2.1	3.0	4.5
1.0	1.4	2.0	3.0
0.75	1.0	1.5	2.25
0.5	0.7	1.0	1.5



第８図　対比係数に関するメンバーシップ関数μ_t

この明度差より適切な明度は、

$$GV = V_{IN} + \Delta GV \qquad (16)$$

となる。

これを適切な彩度ρC_1～ρC_6に対して、またρV_+、ρV_-に対して求める（ρV_+のときは明度差を加える、ρV_-のときは引く）。これにより、適切な各彩度に対応する適切な明度GV_{1+}～GV_{6+}、GV_{1-}～GV_{6-}が求まる。

ここで求められたGV_{1+}～GV_{6+}、GV_{1-}～GV_{6-}とC_1～C_6の同じラベルナンバーの組み合せにより、面積効果においての調和色の適切な明度と彩度が求まる。これを８０色相に対して行い、各色相における面積効果においての調和色の適切な明度と彩度が求められる。面積効果によって算出した調和する色彩は、$DAT_R(H,V,C)$で表す。

２－４．マッチングプロセス

嗜好度推論プロセスによって求めた被験者の嗜好度にＭＳの色彩調和を行った色彩と面積効果によって求められた対象色に対して調和する色彩をファジィ化したメンバーシップ関数の適合度を見ることにより対象色に対して最も調和している色彩を見つける。

推論によって求めた被験者の嗜好度にＭＳの色彩調和判断を行った色彩をファジィ化したメンバーシップ関数を$\mu_M(H,V,C)$とし、面積効果によって求められた対象色に対して調和する色彩をファジィ化したメンバーシップ関数を$\mu_R(H,V,C)$とする。この時次式を満たす色彩が調和色となる。

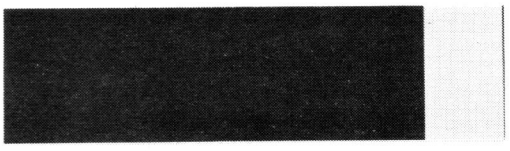
$$VOL(H,V,C)=MAX[\mu_M(H,V,C) \wedge \mu_R(H,V,C)] \qquad (17)$$

４，実験

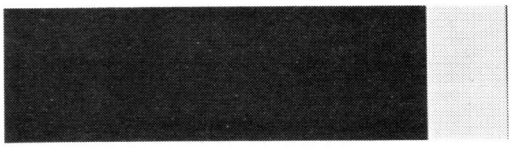
本システムを用いて実験した結果を第９図に示す。ここで、入力した色彩は「あざやかな赤」で、入力面積比は「５」であり、左側に示す。入力した色彩に対して面積効果を考慮した調和色を右側に示す。

第９図（ａ）に示したものは、対象色に対して面積効果を考慮した最も調和する色彩で「くすんだ黄緑」である。対象色「あざやかな赤」に対しての調和色「くすんだ黄緑」の２色配色は、ムーン・スペンサーの調和区分である明度一定平面では「対比」に分類され、色相一定平面でも「対比」に分類される。

第９図（ａ）　対象色に対して最も調和する色彩



第９図（ｂ）　対象色に対して２番目に調和する色彩



第９図（ｃ）　対象色に対して３番目に調和する色彩

第９図　　実験結果

第９図（ｂ）に示したものは、対象色に対して面積効果を考慮した２番目に調和する色彩で「うすい黄赤」である。この２色配色は、ムーン・スペンサーの調和区分である明度一定平面では「類似」に、色相一定平面では「対比」に分類される。

第９図（ｃ）に示す、対象色に対して面積効果を考慮した３番目に調和する色彩で「うすい黄みの緑」である。対象色「あざやかな赤」に対する調和色「うすい黄みの緑」の２色配色は、ムーン・スペンサーの調和区分である明度一定、色相一定平面共に「対比」に区分される。

５，まとめ

本論文では、面積効果を考慮した調和色を決定するシステムをファジィ集合論を用いて提案した。本システムの基本データは被験者個人のものである。このシステムにおける結果は、被験者の判定によれば良い結果として受け入れられる。

参考文献

［１］星野昌一：色彩調和と配色，丸善（株），1957

［２］S.Nakanishi,T.takagi and S.Inamura : COLOR HARMONY BY FUZZY SET THEORY, Proceedings of International Conferecnce on Fuzzy Logic & Neural Networks (IIZUKA '90)

問い合わせ先：〒257-12 平塚市北金目１１１７
東海大学工学部電気工学科
中 西 祥 八 郎
TEL 0463-58-1211 EXT 4025
FAX 0463-58-1812

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SC2-1

オブジェクト指向パラダイムによるファジィ推論の表現

Object-Oriented Representation of Fuzzy Inference

山本 創造　井上 由文　安信 誠二
Sozo YAMAMOTO　Yoshifumi INOUE　Seiji YASUNOBU

国際ファジィ工学研究所
Laboratory for International Fuzzy Engineering Research (LIFE)

Abstract: We are developing a Fuzzy Computer system, aiming at realizing an computer environment for fuzzy information processing. As a basis of fuzzy information processing, it is important to represent elementary fuzzy set manipulation. In this report, an attempt to represent fuzzy sets as objects is described, and an example of implementation of fuzzy inference is shown. The object-oriented paradigm proved to be very effective for fuzzy information processing.

1. はじめに

人間の言葉に含まれる主観的なあいまいさ(ファジィネス)を表現する手段として、ファジィ理論が注目されている。ファジィ推論を利用したものを中心として、実システムへの応用も進んでいる。今後は、人間の持つあいまいな知識の表現手段として、知識工学的な手法と結び付いて発展することが期待される。

我々は、記述の柔軟さと処理の高速性を兼ね備えたファジィ情報処理のプラットフォームを指向した、ファジィコンピュータシステムの開発を進めている。ファジィコンピュータにおいては、多様な形態を持つファジィ集合・ファジィ集合演算の表現と、ファジィ情報の処理と記号処理との融合が課題である。これらの課題に対応するため、我々は、オブジェクト指向パラダイムに基づいてシステムを記述することにより、システム中の様々な要素の統合的な表現を実現しようとしている。

本稿では、ファジィ情報処理における知識表現手法の1つとして、ファジィ推論を取り上げ、ファジィ推論の記述に必要なオブジェクトの構造を具体例を用いて示す。そしてこの例を通じて、オブジェクト指向パラダイムのファジィ情報処理に対する有効性を示す。

2. ファジィ推論

ファジィ推論は、ファジィ理論を用いたルールベースの知識表現の手法であり、ファジィ制御などの実システムにも広く用いられている。また、ファジィプロダクションシステムなどの試みもあり、ファジィ情報処理の1つの基礎を形成している。ファジィ推論には様々な種類があるが、それらの基本となるのは、Zadeh による近似的推論 (approximate reasoning) の考え方である。この近似的推論は、次に示すように、命題論理における modus ponens を拡張した形になっている。

前提1　if A then B
前提2　A'

結論　B'

ここで、A, B, A', B' は、ファジィ命題であり、前提1は、ファジィ条件文である。この形式のファジィ推論の実行は、ファジィ集合とファジィ関係の演算に置き換えることができる(表1)。

表1: ファジィ推論とファジィ集合演算の対応

ルールレベル	演算レベル
ファジィ命題	ファジィ集合
ファジィ条件文	ファジィ関係
推論の実行	ファジィ集合とファジィ関係の合成

従って、ファジィ推論を記述するためには、ファジィ集合とファジィ関係、およびそれらの間の演算を、どのように表現するかが重要である。

3. オブジェクト指向パラダイム

オブジェクト指向パラダイムでは、オブジェクトを、データ群と処理手続きをひとまとめにしたモジュールと考え、システムをオブジェクトの集まりとして表現する[2]。全てをオブジェクトによって表現することにより、対象世界の自然なモデル化と、様々な要素の統一的な取り扱いが可能になる。

ファジィ理論では、ファジィ集合やファジィ関係などを取り扱うが、これらは複雑な構造を持っている。さらに、それぞれの間の演算には様々な形態のものが定義されており、一様な形で取り扱うことが難しい。

これらをオブジェクトとしてモデル化することにより、内部表現と操作手続きを密接に結び付けることができ、システムの記述が容易になると考えられる。また、オブジェクトによる表現により、ファジィ理論に基づく処理と記号処理などとが、容易に融合できることが期待される。

4. ファジィ集合・ファジィ関係

4.1 ファジィ集合

ファジィ集合Aは全体集合をUとするとき、メンバーシップ関数

$$\mu A : U \rightarrow [0, 1]$$

によって、特徴付けられる。従って、全体集合の要素の数が有限個である時には、ファジィ集合は全体集合の要素と、それに対応するグレードの組を列挙したものとして表現できる。即ち、式で表すと、

$$A = \sum_i \mu_A(i)/u_i$$

の形となる。

ファジィ集合に対する演算は大きく次の3つに分類できる [1]。

1) 通常の集合演算の拡張
   ファジィ集合の和集合・共通集合・補集合など。
2) 要素に対する演算の拡張
   拡張原理を用いて要素に対する演算をファジィ集合に適用するように拡張したもの。ファジィ数の計算など。
3) グレードに対する演算
   全てのグレードに対して、何らかの操作を行なう。言語的ヘッジ、正規化など。

4.2 多次元空間上のファジィ集合

複数の集合の直積を全体集合とするファジィ集合を考える。即ち、$X_1, X_2, \cdots, X_N$ のN個の集合がある時、

$$\mu A : X_1 \times X_2 \times \cdots X_N \rightarrow [0, 1]$$

のように定義される多次元空間上のファジィ集合である(以下、多次元ファジィ集合と呼ぶ)。この多次元ファジィ集合は、ファジィ命題の合成やファジィ関係の表現の基礎となる。これは、各次元の要素数が有限である時には、各次元の要素の全ての組合せに対してメンバーシップ値を与えることにより、表現できる。

4.3 ファジィ関係

ファジィ関係は、一般にはn項ファジィ関係が定義される [3]。このn項ファジィ関係は、n次元空間上のファジィ集合として捉えることができる。n次元ファジィ集合の場合と同一のデータ構造で表現することが可能であるが、提供すべきインタフェースは異なる。ファジィ関係の合成や、逆関係の定義など、ファジィ関係に固有の演算がある。

5. オブジェクトによる表現

ファジィ集合処理を、オブジェクト指向パラダイムに基づいて表現した例を示す。ここでは、試験的なインプリメントに用いたSmalltalk-80システムの記法にしたがって示す。

5.1 ファジィ集合

ファジィ関係を含めたファジィ集合の利用においては、n次元空間上のファジィ集合を一般に扱えることが望ましい。従って、前節の多次元ファジィ集合を表現するオブジェクトを基本とし、全体集合が1次元の場合は、この特別な場合とする。

前節に挙げたファジィ集合に対する演算については、要素に対する処理は、マッチング処理がほとんどである。全体集合を1つのオブジェクトと考え、全体でマッチングをとることにより、処理の高速化が期待できる。

内部表現

上記の考察から、ファジィ集合を表すオブジェクトは、全体集合の並びとメンバーシップ関数を表す配列(グレードアレイ)をそれぞれ内部状態として持つ形式とした。

全体集合を表すオブジェクトは、全体集合中の要素とグレードアレイのインデックスとのマッピングを与える。グレードのとり得る値の集合をG (= [0,1]) とするとき、全体集合中の要素とグレードとの対応 (U → G) を、グレードアレイのインデックス空間Iを介してU → I → Gとして表現していることになる。

ファジィ集合に対する操作は、全てメッセージ式によって表現する。図1にファジィ集合の定義、論理演算の記述例を示す。

```
age ←Universe from: 0 to: 100 by: 1.
  " 全体集合の定義 "
middleAged ←FuzzySet on: age.
  " ファジィ集合オブジェクトの生成 "
middleAged gradeIsTriangeAt: 40 width: 20.
  " メンバーシップ関数の定義 "
        ⋮
↑middleAged union: young.
  " ファジィ集合の論理演算 "
```

図 1: ファジィ集合演算の記述例

オブジェクトの意味に従った演算

ファジィ集合オブジェクトは、全体集合に関する情報を含んでおり、演算に際して、どの全体集合の上のファジィ集合であるかを確認することができるので、無意味な演算をする危険がなくなる。

例えば、2つのファジィ集合の間の演算 A op: B が入力されたとき、$A \in U, B \in U$ であれば、結果はU上でのAとBの演算結果が与えられるが、$A \in U, B \in V$ であれば、式に意味が認められないことを検出するので、場合に応じて適切な処理を行なうことができる。

統一的インタフェース

メッセージの解釈はそれぞれのオブジェクトに任されているため、操作を行なう時に内部表現を気にする必要がない。従って、異なった内部表現を、場合に応じて使い分けることができ、これらの表現は、統一的なインタフェースで扱うことができる。

例えば、n次元のグレードアレイの内部表現としては、次の2通りの表現方法がある。

1) n次元の配列による表現

2) n個のベクタの直積としての表現

1) の方法は、表現能力が 2) に比べて高い。2) の方法は、ファジィ集合の直積しか表現できないが、データ量が少ない。これら2つの内部データ形式を、場合に応じて使い分けることにより、記述の柔軟さと、効率の良さとを同時に満たすことができる。

演算の結果がファジィ集合である場合には、適切な表現が選択される。例えば前の例で、結果が多次元ファジィ集合となる場合、intersection: の演算であれば、結果はAとBの直積であるので、2) の形式が用いられ、それ以外の場合 (union: など) には、1) の形式が選択される。

5.2 ファジィ関係

ファジィ関係は、一般にはn項関係が規定でき、それはn次元のファジィ集合と等価である。しかし、一般のn項のファジィ関係に対する操作は意味づけが明確でなく、演算の妥当性が問題になる場合がある。例えば、

rule R: if x is A and y is B then z is C

というファジィ推論ルールを表現するファジィ関係は、本来は3項の関係であるが、命題 (x is A') とルールRの合成には意味が認められない。

そこで、ファジィ関係を2項関係を基本に表現する。2項のそれぞれを多次元ファジィ集合とすることにより、3項以上の関係を記述することができる。例えば、上の例では、(A and: B) とCの間の2項の関係として記述することになる。また、ファジィ関係自体の持つ意味がより明確になり、ファジィ関係に対する無意味な演算を排除できる。

内部表現

ファジィ関係は、前述のように、n次元ファジィ集合とデータ構造が類似しているが、入力次元と出力次元の区別と、関係の合成、逆関係などのファジィ関係に固有のインタフェースを持っている。従って、ファジィ関係オブジェクトは、ファジィ集合オブジェクトの持つ情報を継承し、ファジィ関係に固有の機能を追加したものとして定義できる。

内部データ形式としては、多次元ファジィ集合の内部表現に対応して、2通りの表現形式が存在し、推論方式に応じて適切な形式が選択される。

ファジィ関係の記述例を図2に示す。

```
aRelation ← young imply: smallIncome.
  " ファジィ関係 (aRelation) が生成される "
↑ anAge compose: aRelation.
  " ファジィ関係の合成 "
```

図 2: ファジィ関係演算の記述例

6. ファジィ推論の記述

以上のようにファジィ集合とファジィ関係のオブジェクトによる表現を行なった時、ファジィ推論は次のように記述できる。ここでは、推論ルールを1つのオブジェクトと見て、推論ルール自身が入力を解釈して、推論結果を出力するというモデル化を行なう。推論ルールは、ファジィ関係に対応付けられるので、ファジィ関係オブジェクトの機能を継承し、これに推論用のインタフェースを追加したものとして定義する。

例えば、次の3つの前提からの推論を考える。

if x is A and y is B then z is C
x is A'
y is B'

x、 y、 z に関する全体集合をそれぞれ univX、univY、univZ とし、ファジィ集合オブジェクト fsetA (∈ X), fsetB (∈ Y), fsetC (∈ Z) を定義する。この推論ルールは、

aRule ←FuzzyInferenceRule if: (fsetA and: fsetB) then: fsetC.

によって生成され、そのファジィ関係としての表現は、(fsetA and: fsetB) imply: fsetC となる。ここで、fsetA and: fsetB は unibX × univY 上のファジィ集合であり、全体としては、(fsetA and: fsetB) と fsetC の2項の関係と解釈されている。

推論の実行は、このルール aRule に対して入力を与えることによって、次のように実行される。

aRule inferWith: (fsetA1 and: fsetB1).

これによって、ファジィ関係のレベルで、

(fsetA1 and: fsetB1) compose: aRule.

が実行され、推論結果である Z 上のファジィ集合が得られる。

入力が不足している場合、例えば上記の例で fsetB1 が与えられなかった場合には、推論ルールオブジェクトが、入力情報が不足していることをチェックし、これを補って推論を行なう。即ち、aRule inferWith: fsetA1 を実行すると、不足している次元の入力を全体集合によって補ったのち、(fsetA1 and: univY asFuzzySet) compose: aRule のようにファジィ関係のレベルにおける演算を行なう。

このように、ファジィ集合演算、ファジィ関係、ファジィ推論ルールの各レベルでの意味に従ったインタフェースを、各オブジェクトが実現していることがわかる。

7. おわりに

オブジェクト指向パラダイムに基づいて、ファジィ推論に必要なファジィ集合処理の基本要素の、オブジェクトによるモデル化を行なった。この例から、オブジェクト指向パラダイムに基づいた記述が、

1) オブジェクトの意味に従ったファジィ演算
2) 内部表現によらない統一的インタフェース
3) ファジィ集合・ファジィ関係の容易な記述

の利点を持っており、ファジィ情報処理の実現に適していることが明らかになった。

なお、現在は Smalltalk-80 システム上でのインプリメントを行なっており、開発中の MoNo[4] への移植を検討している。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、有益な助言を頂いた LIFE 第3研究室の徳永、勝亦主任研究員に感謝致します。また、本研究の機会を頂いた LIFE の寺野所長ならびに松下電器産業(株)、花王(株)、(株)日立製作所を始めとする組合員各社に深く感謝します。

参考文献

[1] 馬野 元秀: ファジィ集合論とソフトウェア, 情報処理, Vol.30 No.8, pp. 922 – 930 (1989).

[2] 米澤 明憲: オブジェクト指向計算の現状と展望, 情報処理, Vol.29 No.4, pp. 290 – 294 (1988).

[3] Dobois and Prade:Fuzzy Sets and Systems: Theory and applications, Chapter 3, Academic Press (1980).

[4] 井上 由文, 安信 誠二: ファジィ情報処理の機能を持つ オブジェクト指向プログラミングシステム MoNo の概念について, 1990 年度人工知能学会全国大会論文集,(1990) (投稿中).

問い合わせ先

〒 231 横浜市 中区 山下町 89-1
シイベルヘグナービル 4 階
国際ファジィ工学研究所 第 3 研究室
山本 創造
Tel: 045-212-8242, Fax: 045-212-8255
E-mail: sozo@lab3.fuzzy.or.jp

SC2-2

オブジェクトによるファジィ集合の表現

Fuzzy sets representation based on object-oriented paradigm

井上由文 Yoshifumi INOUE
山本創造 Sozo YAMAMOTO
安信誠二 Seiji YASUNOBU

国際ファジィ工学研究所
Laboratory for Internationl Fuzzy Engineering Research(LIFE)

In programming languages, fuzzy sets are represented by complex data-structures and corresponding procedures. These representations have variety ways, and depend on a feature of universe of discourse's element and subjective operations. In many programming languages, data-structures and corresponding procedures are described separately. By this reason, it is difficult to program with fuzzy sets representation on various data-structures. In this paper, a way of representing fuzzy sets by object on object-oriented paradigm is proposed. This representation makes it easy to program with fuzzy sets.

1. はじめに

近年, 人間の言葉に含まれる主観的なあいまいさ(ファジィネス)に基づくファジィ情報(= ファジィ知識)[1, 2] の実システムへの応用が盛んであり, ファジィ情報処理の有効性が実証されつつある [3]. そのため, ファジィ情報の基本であるファジィ集合の表現や処理が重要になってきている.

コンピュータ上でファジィ集合を処理する為には, プログラミング言語により, ファジィ集合のデータ構造や処理手続きを記述する必要がある [4]. このデータ構造には, リスト構造や配列等の方式を用いることができる. どの表現を用いるかは, ファジィ集合が土台とする全体集合の要素が持つ性質の違いや, 重要視する処理に依存する. また, t-norm/s-norm により定義される多様なファジィ集合演算処理の実現は困難である.

ファジィ集合はファジィ情報処理における, 情報の基本単位であり, その表現モードは重要である. そのため, この方式は, 多様なファジィ集合 / ファジィ集合演算を表現すると共に, ファジィ集合と従来の記号による知識表現とを融合する必要がある.

我々は, ファジィ情報の高速処理を指向したファジィコンピュータの基本的なソフトウェアシステムとして, オブジェクト指向プログラミングシステム (Object-Oriented Programming System = OOPS) MoNo[1] の開発を進めている.

本報告では, オブジェクトによるファジィ集合(ファジィ集合オブジェクト)の表現方式を提案し, MoNo での記述例を示す.

2. ファジィ集合について

2.1 ファジィ集合の定義

ファジィ集合 A は 全体集合を U とすると, メンバーシップ関数

$$\mu_A : U \rightarrow [0, 1]$$

によって特徴づけられる集合のことである [1]. $\mu_A(u)$ の値は要素 $u \in U$ のファジィ集合 A への所属度と呼ばれ, この値が大きいほど要素 u がファジィ集合 A に属する度合いが大きい.

ファジィ集合 A の数式による表現では, 全体集合 U の要素が連続値の場合と, 離散値の場合では, 以下のように異なる.

1) 要素 u が連続値の場合[2]

$$U = \{u | a \leq u \leq b\}$$

$$\mathbf{A} = \int_U \mu_A(u)/u$$

2) 要素 u が離散値の場合

$$U = \{u_0, u_1, \cdots, u_n\}$$

$$\mathbf{A} = \mu_A(u_0)/u_0 + \mu_A(u_1)/u_1 + \cdots + \mu_A(u_n)/u_n = \sum_{i=0}^{n} \mu_A(u_i)/u_i$$

[1] MoNo = Meta Object Names Object

[2] 実数区間は無限集合である.

また, ファジィ集合に対しては, 通常の集合と同様に和・積・補集合等を定義されている [1]. 和, 積を求めるには max, min の演算モードを用いることが多い. しかし, 一般的な t-norm, s-norm を考えるとユーザが定義する演算モードは無限に定義可能である [2]. これらの演算モードは応用により最適なモードが利用されるが, 論理和 / 積 (logical), 代数和 / 積 (algebraic), 限界和 / 積 (bounded), 激烈和 / 積 (drastic) と言った, 演算モードが代表的である.

2.2 ファジィ集合のデータ構造と処理手続き

ファジィ集合のデータ構造とその処理手続きは, 応用によって異なる. 例えば, ファジィ制御においては, ファジィ集合が,

1) 全体集合の要素 u が連続値
2) 離散化幅を適当に設定することが可能

等の性質を持つことから, ベクタを使った表現を用いることが多い. ここではベクタの要素がファジィ集合への所属度 $\mu_A(u)$ を表し, 添字 i と全体集合の要素 u が対応付けられている (全体集合からベクタの添字の集合への写像が行なわれている). そのため, ファジィ推論の高速処理が可能になる.

また, 知識処理においては,

1) 全体集合の要素 u が連続値では無い記号
2) 全体集合の要素 u が離散化幅を適当に設定できない連続値

であることが多い為, 全体集合の要素 u と所属度 $\mu_A(u)$ を組にしたリスト構造[3]が用いられる. リストを用いた表現では, 一般にファジィ集合に対する全ての処理は, ベクタによって表現したファジィ集合よりも低速になる. ファジィ集合演算処理を高速に処理する場合は, データの順序関係を用いた順序リスト [5] により表現する等の工夫が必要である.

このように, ファジィ集合を表現するには, 複雑なデータ構造と処理手続きが必要である. データ構造とその処理手続きを別々に記述する, Pascal[6], C[7], Ada[8], Lisp[9] 等のプログラミング言語では, 異なるデータ構造に対して, 別に対応した処理手続きを記述する必要がある.

そのため, データ構造の変更に伴う処理手続きの変更の記述が分散化される為, 記述の一貫性を保つことや, ライブラリとして蓄積することが困難である.

[3]ここで言うリスト構造は線形リストである.

3. オブジェクト指向プログラミングシステム MoNo

3.1 MoNo のオブジェクト指向パラダイム

オブジェクト指向パラダイム (Object-Oriented Paradigm) では, オブジェクトを, 「内部状態を持ち, メッセージにより活性化される実体」と考え, データと処理手続きの組により表現する [10]. このことは, オブジェクトを抽象データ型 [11, 12] を持つデータと見なし, 内部のデータ構造とは無関係に, メッセージ伝達 (message passing) により, データを操作することを可能にする. また, メッセージ伝達は同時に多相手続き (polymolphic procedure) も実現している.

そのため, ファジィ集合をオブジェクトにより表現することで, 多様なデータ構造の使用が可能になる. また, これらのデータ構造に対する処理手続きをオブジェクト単位で隠蔽できるため, プログラムの部品化が容易になる.

3.2 MoNo のオブジェクト

MoNo ではオブジェクトの生成を, 複製段階 (clonig step) と変更段階 (mutation step) の 2 つの段階で行なう. 複製段階では, 既に存在するオブジェクト (original) を雛型 (prototype) として, それの複製 (replica) を作成する. 変更段階では, 内部状態の変更 (mutation) を行なう. ユーザ定義オブジェクトが存在しない時は, original として MoNo が提供するオブジェクトを用いる.

3.3 メッセージ式の記述

MoNo では SmallTalk-80[10] と同様に, 全てをオブジェクトにより表現し, メッセージ伝達により全ての計算を行なう. メッセージ伝達は, レシーバ (receiver) にメッセージを送ることにより実現される. MoNo ではこのことを, 次に示すメッセージ式により記述する.

$$receiver\ selector_1\ selector_2 \cdots selector_n$$

ここで, $selector_k (1 \leq k \leq n)$ は, 記号定数または, メッセージ引数である.

4. ファジィ集合オブジェクト

4.1 全体集合が有限集合の場合

全体集合が有限集合の時, MoNo では, ファジィ集合を次の 4 個の内部状態 (state) を持つオブジェクトとして表現し, これをファジィ集合オブジェクト

[13] と呼ぶ (図 1). ここでは, I はグレード・ベクタの添字の集合を表す.

- **universe-of-discourse**: 全体集合 U.
  1) 3 つ組 (a, b, s): 実数区間 $[a, b]$ と離散化幅 s
  2) ベクタ: u を要素とし, ベクタの添字 j とグレード・ベクタの添字 i を一致させたベクタ
  3) ハッシュテーブル: u をキーとし, 対応する値としてグレード・ベクタの添字 i を持つハッシュテーブル
- **grade-vector**: メンバーシップ関数
  ベクタの要素で所属度を表す.
- **map-u-to-i**: $U \rightarrow I$ の写像.
- **map-i-to-u**: $I \rightarrow U$ の写像.

全体集合の表現は, 空間使用量と写像の計算時間により, 1), 2), 3) を動的に選択・変更し, 効率的な実現を行なえるようにした. また, 1) は, 無限集合を離散化幅 s により離散化することで, 無限集合を有限集合として扱っている.

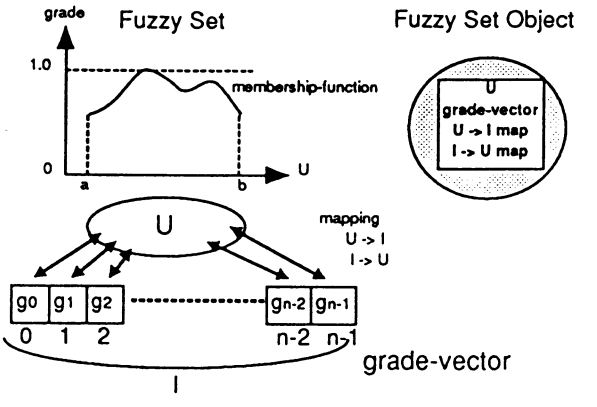


図 1: ファジィ集合オブジェクト

4.2 全体集合が無限集合の場合

実数全体を表す集合 R や, 離散化されていない実数区間 $\{x|a \leq x \leq b\}$ 等のように, 全体集合が無限集合の場合は, メンバーシップ関数だけで表現する. また, ファジィ集合演算は数式処理により行なう.

4.3 ファジィ集合オブジェクトの生成

MoNo におけるファジィ集合オブジェクトの生成は, 3.2節で述べたように, 既に存在するファジィ集合オブジェクトを複製することにより行なう. 最初に、ファジィ集合オブジェクトを生成する場合や, それまでとは異なる全体集合によるファジィ集合オブジェクトを生成する場合は, MoNo が提供する **virgin-fuzzy-set** オブジェクトを複製することにより行なう. 以下に, MoNo での記述例を示す.

```
define a is (virgin-fuzzy-set clone).
```

変更段階は, 次に示す 3 通りの方法のいずれかにより行なう.

1) "UM" 方式
   全体集合とメンバーシップ関数を与える方式.
2) "UG" 方式
   全体集合と所属度を別々に与える方式.
3) "PAIR" 方式
   所属度 $\mu_A(u)$ と要素 u の組を与える方式.

この時, ファジィ集合オブジェクトの状態変数 **map-u-to-i** や **map-i-to-u** は, ファジィ集合オブジェクト自身が設定する.

以下に, ファジィ集合オブジェクト a を生成する時の, 記述例を示す.

1) "UM" 方式

```
a u is (range 0 100 step 1).
a membership-function is (triangle 50 30).
```

2) "UG" 方式

```
a is [ keiko kyoko midori ].
a grade keiko is 0.8.
a grade kyoko is 0.5.
a grade midori is 0.6.
```

3) "PAIR" 方式

```
a is [ 0.8 keiko 0.5 kyoko 0.7 midori ].
```

4.4 メッセージ伝達によるファジィ集合演算

MoNo では, ファジィ集合オブジェクトにおけるファジィ集合演算 (2 項演算) を, メッセージ式を使って, 表 1 のように記述する.

表 1: ファジィ集合演算の記述例

	メッセージ式	
ファジィ集合演算	短形式	長形式
和集合演算	a + b	a union b
積集合演算	a * b	a intersection b
差集合演算	a - b	a difference b

4.5 多様なファジィ集合演算モードへの対応

前述のようにファジィ集合の演算モードは多様である. MoNo では, 各演算モードに対して, それぞれメタオブジェクトを定義することで, 対応している. 演算モードの切替は, ファジィ集合オブジェクトに表 2 に示すメッセージを送り, メタオブジェクトの

切替えにより行う.

表 2: 演算モードを変更する為のメッセージ式

演算モード	メッセージ式
論理和 / 積	*F* `operation mode is logical.`
代数和 / 積	*F* `operation mode is algebraic.`
限界和 / 積	*F* `operation mode is bounded.`
激烈和 / 積	*F* `operation mode is drastic.`
ユーザ定義	*F* `metaobject is` *M*.

†*F* はファジィ集合オブジェクト
‡*M* はユーザ定義の演算モードを行なうメタオブジェクトを表す.

また, ユーザ定義の演算モードもメタオブジェクトとして実現し, オブジェクト (インスタンス) 生成後の演算モードの追加に容易に対応可能である (図 2).

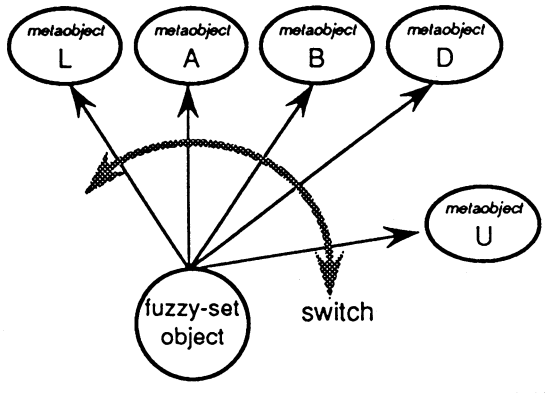


図 2: メタオブジェクトによるファジィ集合演算

5. おわりに

本報告では, MoNo に組み込まれているファジィ集合オブジェクトの表現モードについて述べた. ファジィ集合オブジェクトは, 次の機能を備えている.

1) 柔軟なファジィ集合記述
2) メッセージによる統一的な操作
3) 動的なデータ構造の切替

このことから, 本モードでは, 多様なファジィ集合・ファジィ集合演算を柔軟に表現し, 従来の記号処理による知識表現との融合が可能になる.

また, 本方式を実現している MoNo は, ファジィ知識を扱う為の知識プログラミング環境の核となる基本ソフトウェアシステムとして, ファジィ情報処理を含むアプリケーションの開発を容易にする.

謝辞

本稿をまとめるにあたり, 有益な助言を頂いた LIFE 第 3 研究室の徳永秀和, 勝亦敦主任研究員に感謝致します. また, 本研究の機会を頂いた LIFE の寺野所長ならびに花王 (株), 松下電器産業 (株), (株) 日立製作所を始めとする組合員各社に深く感謝します.

参考文献

[1] L. A. Zadeh: Fuzzy sets, *Information and Control*, pp. 338–353, 1965.

[2] 寺野寿郎, 浅居喜代治, 菅野道夫 (編): ファジィシステム入門, オーム社, 1987.

[3] 安信誠二: ファジィ推論を利用した列車自動運転, 情報処理, pp. 970 –975, 8 1989.

[4] 井上 由文, 山本 創造: 計算機言語におけるファジィ集合の取り扱いについて, 第 *40* 回全国大会予稿集, pp. 47–48. 情報処理学会, 1989.

[5] D.E.Knuth: *The Art of Computer Programming*, volume 2, Addison-Wesley Publishing Company, 1981.

[6] 石畑清, 筧克彦, 安村通晃 (編): *Pascal* の標準化, 共立出版, 1984.

[7] B.W.Kernighan and D.M.Ritchie: *The C Programming Language*, Addison-Wesley Publishing Company, 1982.

[8] 情報処理振興事業協会 (編): 最新 *Ada* 基準文法書, 共立出版, 1984.

[9] 井田昌之 (編): *Common Lisp*, 共立出版, 1985.

[10] I.P Goldberg and D.Robinson: *SmallTalk80: The Language and Its Implementation*, Addison-Wesley Publishing Company, 1983.

[11] S.Danforth and C.Tomlinson: Types theories and object-oriented programming, *ACM Computing Surveys*, 1988.

[12] J.C.Cleaveland: *An Introduction to Data Types*, Addison-Wesley Publishing Company, 1986.

[13] 井上 由文, 安信誠二: ファジィ情報処理の機能を持つオブジェクト指向プログラミングシステム MoNo の概念について. 第 *4* 回人工知能学会全国大会予稿集. 人工知能学会, 1990.

問い合わせ先

〒 231 横浜市 中区 山下町 89-1
シイベルヘグナービル 4 階
国際ファジィ工学研究所 第 3 研究室
井上由文
Tel: 045-212-8235
Fax: 045-212-8255
E-Mail: `yosi@lab3.fuzzy.or.jp`

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SC2-3

信頼性解析のための ファジィ情報に関する二，三の考察

A Few Remarks on Fuzzy Information for Reliability Analysis

鬼沢武久
Takehisa ONISAWA

熊本大学 工学部
Faculty of Engineering, Kumamoto University

Abstract : Qualitative information is useful when numerical information is not available. This paper discusses the transformation of fuzzy information about reliability into a fuzzy set, and also discusses to what extent the modification of the definition of fuzzy information influences the result of the fuzzy reliability analysis. Robustness of the definition is expected if the result of the fuzzy reliability analysis is also represented qualitatively.

1．はじめに

信頼性解析で重要な情報の一つは，故障率，過誤率などの確率的な数値情報である。しかし，このような確率的な数値を推定するのに十分なデータがないのが実情で，正確に得ることはむずかしい。そこで，このあいまいな数値情報をファジィ数で表すことが考えられる。ファジィ確率を用いた信頼性解析はこれに相当する[1]。一方鬼沢らは，信頼性解析の問題には多くのファジィ概念が入り込んでいる[2]との観点から，信頼度の主観的尺度を表すファジィ集合（failure possibility と呼ぶ）を使って信頼性解析する方法を提案している[3]。このfailure possibility は，故障率，過誤率が情報として与えられているものとして，それらの数値情報などを主観的に評価して求められている。

本稿では，信頼性の分野では数値情報として表現するには確たるデータがない場合が多い，数値になりにくい情報を利用することも多いとの観点にたって，信頼性に関した定性的な情報をもとに解析していくことについて述べる。つまり，そのファジィ情報をfailure possibility などのファジィ集合で表現し，このファジィ集合を使って信頼性解析し，その結果をも言葉で表そうとするものである。また定性的な情報をファジィ集合で表現するとき，その定義のロバスト性についても考察する。

2．Failure Possibility

鬼沢らは（1）式で表されるファジィ集合（failure possibilityと呼ぶ）を使って信頼性解析をする方法を提案している[3]。

$$F(x) = \frac{1}{1 + 20 \times |x - x_0|^m} \qquad (1)$$

ただし，x_0，m はパラメータである。
そこでは，故障率，過誤率が情報として与えられているものとして，故障率，過誤率の主観的評価をもとにfailure possibilityを求めている（実際には，信頼性に影響を与える要因の主観的評価をも考慮している）。普通，故障率，過誤率は［P_L, P_M, P_U］ の三項組として与えられる。ただし，P_M は，故障率，過誤率の最良の推定値，P_L はその下限値，P_U はその上限値である。

パラメータx_0は，P_M を（2）式で評価することによって求められている。

$$x_0 = \frac{1}{1 + (K \times \log(1/P_M))^3} \qquad (2)$$

ここで，Kは主観的な安全基準である。

一方パラメータmは，P_M/P_L，P_U/P_Mの比をもとにして決めている。いまこれらの比をkで表すと，このkは不確定性の範囲を表していると言える。情報として与えられた故障率，過誤率が，$k \leqq 3$，$3 < k \leqq 5$，$5 < k \leqq 10$，$10 < k$のどの不確定性の範囲に入るかによってmを決めている。

しかし実際，信頼性の問題では数値情報として表現するには確たるデータがないことも多く，また後述するように数値になりにくい情報も利用する。このとき無理に数値として表すよりは定性的な言葉で表現した方が有効である。

本稿では，「この機器の故障は非常に起こりそうにない」「その評価のあいまいさは小さい」というように，信頼性の評価とその評価のあいまいさという形で機器や人間の信頼性に関する情報を表現するものとする。まず，信頼性の評価のあいまいさに関する表現を表1に示すように4段階に分けて，表1に示す値をそのクラスの代表値として（1）式のパラメータmの値とする。次に信頼性評価については，その定性的な表現を表2に示すように10段階に分けて，表2のカッコ内の値（x_0 の範囲の中間値）をそのクラスの代表値として（1）式のパラメータx_0 の値とする。

表1 パラメータ m

クラス	m	定性的表現
1	2．0	Low
2	2．5	Medium
3	3．0	Rather High
4	3．5	High

表2 パラメータ x_0

クラス	x_0の範囲（代表値）	定性的表現
C_1	1.0 (-)	Certain
C_2	0.9-1.0 (0.95)	Most Probable
C_3	0.7-0.9 (0.8)	Quite Probable
C_4	0.5-0.7 (0.6)	Probable
C_5	0.3-0.5 (0.4)	Rather Improbable
C_6	0.2-0.3 (0.25)	Improbable
C_7	0.1-0.2 (0.15)	Highly Improbable
C_8	0.05-0.1 (0.075)	Extremely Improbable
C_9	0.0-0.05 (0.025)	Next to Impossible
C_{10}	0.0 (-)	Impossible

ただし，表2のクラスC_1，C_{10}のfailure possibility は次のように定義されるものとする。

クラス C_1

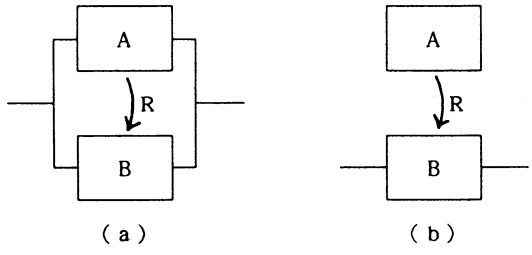
$$F(x) = \begin{cases} 1, & x = 1 \\ 0, & x \neq 1 \end{cases} \qquad (3)$$

クラス C_{10}

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0 \end{cases} \qquad (4)$$

3．従属性と事故につながる可能性

従属性には2通りある。まず第一に，図1（a）に示すように並列に接続されたシステムについて，サブシステムAの不都合がサブシシステムBに影響してシステム全体として事故となる場合である。この場合従属性を考慮しないとシステムの信頼性は非常に楽観的なものになってしまう。次に，図1（b）に示すようにサブシステムAの不都合はシステム全体の事故に直接影響しないが，サブシステムBに影響することによってシステム全体の事故に影響する場合である。この場合，サブシステムBはサブシステムAの影響を受けずに単独で不都合を生じることもある。例えば，オペレータがある機器を使用して作業す場合，その機器に故障が起こってもシステム全体の事故に直接影響しないが，その機器を使いながら作業しているためオペレータはエラーしやすくなる。そのオペレータのエラーがシステム全体の事故に結びつく場合である。



（a） （b）

図1 従属性

次に事故につながる可能性についてであるが，ここでいう可能性とは，ある機器の故障やオペレータのエラーが（サブ）システムの事故や故障につながる可能性のことである。例えば，経験のあるオペレータなら自分が犯したミスに気がつき，修正する可能性が大きいことが考えられるから，このオペレータのエラーが事故につながる可能性は低いと評価されよう。

信頼性解析ではこれら従属性や可能性についての情報も必要である。しかし従属性や可能性の情報は，信頼性評価の情報以上に数値情報として得るのはむずかしく，定性的な情報として表現するほうが適している。本稿では，従属性や可能性の意味を表すファジィ集合はfailure possibility のファジィ集合のメンバーシップ関数（1）式と同じ形を持つものとし，従属性や可能性についての定性的な情報としては，従属性や可能性のレベルの評価およびその評価のあいまいさという形をとるものとする。それらの評価とパラメータx_0，mの関係は表3のようにする。

表3 従属性と可能性

従属性，可能性のレベル（クラス）		あいまいさ（クラス）	
x_0	定性的表現	m	定性的表現
-	Complete Dependence* (1) (Complete)	2.0	Low (1)
1.0	Very High Dependence (2) (Very High Possibility)	2.5	Medium (2)
0.95	High Dependence (3) (High Possibility	3.0	Rather High (3)
0.75	Medium Dependence (4) (Medium Possibility)	3.5	High (4)
0.5	Low Dependence (5) (Low Possibility)		

* この場合のメンバーシップ関数は（3）式と同じものとする。

4．信頼性解析結果の定性的表現

2，3節で述べたように信頼性に関する定性的な情報をファジィ集合に変換して，そのファジィ集合を使って信頼性解析を行う。解析方法は文献3）によるが，この方法には，failure possibility などのファジィ集合のＡＮＤ演算，ＯＲ演算，従属性に関する演算，事故につながる可能性についての演算がある。ここではこの解析によって得られた結果を定性的に表現することについて述べる。

解析の結果得られたfailure possibility をF_R，あらかじめ準備された信頼性に関しての定性的な表現の意味を表したfailure possibility をF_Sとする。x_{0R}，x_{0S}をそれぞれF_R，F_Sの最大グレードを与えるx_0の値，$F_{R\alpha} = (x_{1R}(\alpha), x_{2R}(\alpha))$，$F_{S\alpha} = (x_{1S}(\alpha), x_{2S}(\alpha))$をそれぞれ$F_R$，$F_S$の$\alpha$－カットとする。

以下の評価を考える。

（1）

$$SJ_1 = x_{0R} / x_{0S} \qquad (5)$$

（2）

$$SJ_2 = \frac{\int_0^{\beta} (x_{2R}(\alpha) - 0.5)\, \alpha\, d\alpha}{\int_0^{\beta'} (x_{2S}(\alpha) - 0.5)\, \alpha\, d\alpha} \qquad (6)$$

ただし，$x_{2R}(\beta) = 0.5$，$X_{2S}(\beta') = 0.5$。

この分子，分母は，failure possibility の$x_{2R} \geqq 0.5$，$x_{2S} \geqq 0.5$の部分，つまり信頼性評価の低い部分を評価していることになり，故障，事故の潜在性を評価していると言える。

（3）

$$SJ_3 = \frac{\int_0^1 (x_{2R}(\alpha) - x_{1R}(\alpha))\,\alpha\,d\alpha}{\int_0^1 (x_{2S}(\alpha) - x_{1S}(\alpha))\,\alpha\,d\alpha} \qquad (7)$$

この分子，分母はfailure possibility の広がりを評価していることになり，failure possibility のあいまいさを評価していると言える。

SJ_1，SJ_2，SJ_3はそれぞれfailure possibility の最大グレードを与えるx_θの値の比，故障，事故の潜在性の評価値についての比，failure possibility のあいまいさの評価値についての比をとったものである。

$$SJ = \frac{SJ_1 + SJ_2 + SJ_3}{3} \qquad (8)$$

として，

$$0.9 \leqq SJ \leqq 1.1 \qquad (9)$$

の範囲に入って

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{3} (SJ - SJ_i)^2}{3}} \qquad (10)$$

が最小になるF_Sを解析の結果得られた信頼性に関する定性的表現とする。（9）（10）式の意味は，あらかじめ準備された信頼性についての定性的表現の意味を表したfailure possibility の中から，（9）式の意味で（5）～（7）式の各評価が近く，また，（10）式の意味で（5）～（7）式の各評価が分散してないものが選ばれることを意味している。なおあらかじめ準備されている信頼性についての定性的表現の意味を表すfailure possibility のパラメータx_θの値を表4に示す。この表では，表2に示したx_θの範囲が広いので，x_θの範囲の中間値のほかに上，下限値をも含めている。なおパラメータmについては表1に示した値を使うものとする。

表4　あらかじめ準備されたfailure possibility のパラメータx_θ

クラス	x_θ のとり得る値	定性的表現
C_2	0.9, 0.95, 1.0	Most Probable
C_3	0.7, 0.8, 0.9	Quite Probable
C_4	0.5, 0.6, 0.7	Probable
C_5	0.3, 0.4, 0.5	Rather Improbable
C_6	0.2, 0.25, 0.3	Improbable
C_7	0.1, 0.15, 0.2	Highly Improbable
C_8	0.05, 0.075, 0.1	Extremely Improbable
C_9	0.0, 0.025, 0.05	Next to Impossible

*C_1，C_{10}については考えないことにする。

5．例

図2に示したファジィ・フォールト・ツリーについて解析した結果のfailure possibility を図3に示す。各フォールト・ツリーの各基本事象についての信頼性評価に対するx_θの値は表2のカッコ内の値を使い，mの値は表1に従っている。また従属性，可能性については表3の値を使っている。表5に解析結果の定性的表現を示す。

表5　解析結果の定性的表現

	信頼性評価	あいまいさ
（a）	improbable	high
（b）	rather improbable	high
（c）	highly improbable	rather high

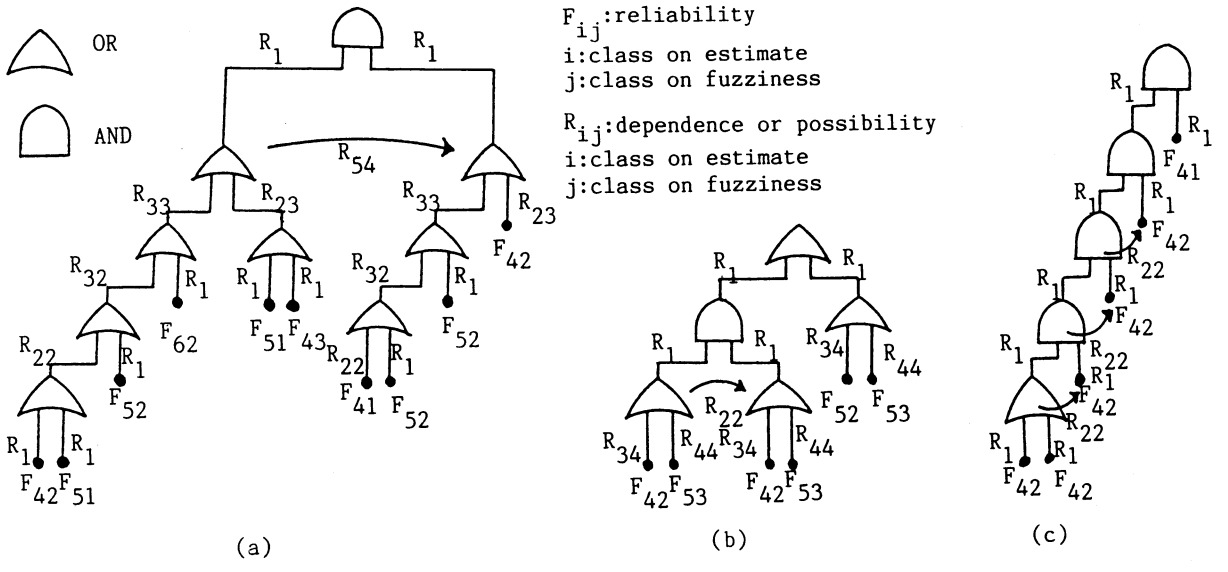


Fig. 2　Fuzzy Fault Trees

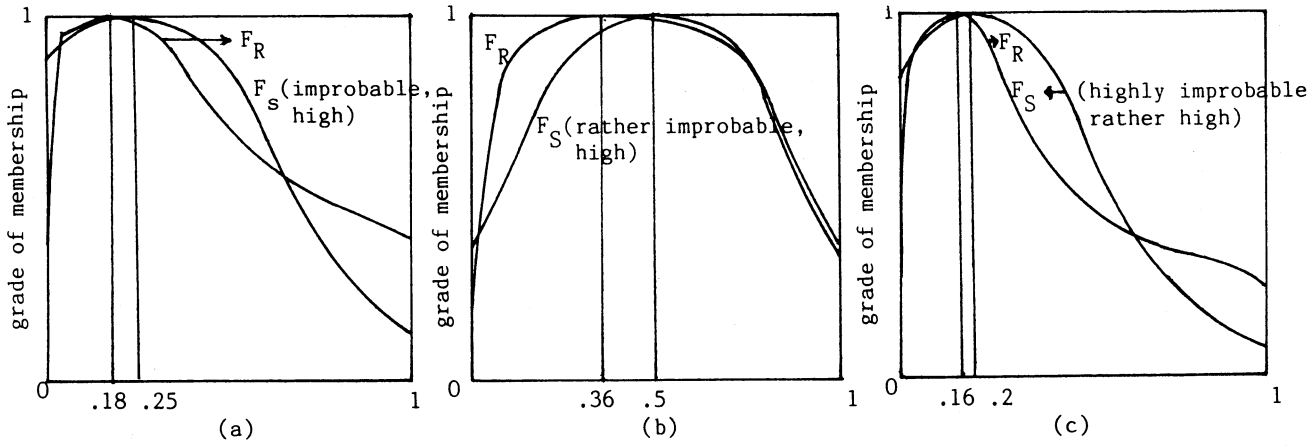


Fig. 3 Failure Possibilities Obtained by Fuzzy Reliability Analysis

6．信頼性評価の定義のロバスト性について

ロバスト性について一般的に考察することはむずかしいので，ここでは前節の例をもとに考察を加える。

前節では各基本事象の信頼性に関する定性的表現を表すfailure possibility のパラメータx_θは表２に示したカッコ内の値を用い，パラメータmは表１に従った。ここでは各基本事象のfailure possibility のパラメータx_θの値をそれぞれのクラスの上限値，下限値，パラメータmについては，low→1.5，medium→2.0，rather high→2.5，high→3.0と対応させたときに，解析結果がどの程度変化するかについて調べた。その結果を表６に示す。表５，６を比較すると，

表６　パラメータx_θ，mの定義の違いによる解析結果への影響

	x_θ の定義の違いによる影響	
	下限値	上限値
(a)	(improbable, rather high)	(rather improbable, high)
(b)	(rather improbable, high)	(rather improbable, high)
(c)	(highly improbable, rather high)	(improbable, high)

	mの定義の違いによる影響
(a)	(improbable, high)
(b)	(rather improbable, high)
(c)	(highly improbable, rather high)

(a) x_θ の値が上限値をとったとき以外は，信頼性の評価はimprobableで，評価のあいまいさはhighかrather highになっている。

(b) x_θ，mの変化に対してはどの場合も信頼性の評価はrather improbabale，評価のあいまいさはhighとなっている。

(c) x_θ の値が上限値をとったとき以外は，信頼性の評価はhighly improbable で，評価のあいまいさはrather highになっている。

x_θ の値を小さく見積る定義の方が，x_θ の値を大きく見積る定義と比べて，解析結果への影響が小さいことがわかる。つまり，個々の機器や人間の信頼性を少し高く評価しても全体の信頼性の評価には影響しないが，低く評価すると全体の信頼性の評価に影響がでる。一方，mの定義の違いによる結果への影響は小さいことがわかる。

信頼性評価の定義のロバスト性について一般的なことは言えないが，これらの例題からみると，解析結果も定性的に表現すると，個々の信頼性の評価が良くなるような定義に対しては，ロバスト性が保たれることが予測される。ロバスト性が保たれない場合については，信頼性評価の定義の違いによる解析結果の違いが重要視すべきかどうか考察する必要があろう。重要視されるなら解析対象システムは信頼性評価に対して感度があるということになり，慎重な評価が必要である。

7．おわりに

信頼性解析では，故障率，過誤率などの数値情報を正確に得ることがむずかしい場合が多い。また数値として表しにくい情報も使う。このとき無理に数値情報で表現せずに定性的な情報として表現する方が有効である。本稿ではその定性的情報として，

①信頼性評価とそのあいまいさ
②従属レベルの評価とそのあいまいさ
③事故に結びつく可能性レベルの評価とそのあいまいさ

という形で表現されたとき，その情報をfailure possibilityを用いた信頼性解析に取り入れて解析することについて述べた。解析結果についても信頼性についての評価とそのあいまいさという形で定性的に表現することによって，信頼性評価の定義のロバスト性が保たれることが予測される。

参考文献

1）H.Tanaka, L.T.Fan, F.S.Lai and K.Toguchi:Fault Tree Analysis by Fuzzy Probability, IEEE Trans. on Reliability, Vol.R-32, No.5, 453-357, 1983.

2）鬼沢武久：信頼性解析におけるファジィ概念について，第20回安全工学シンポジウム講演予稿集，193-196，1990.

3）鬼沢武久：システムの事故の定性的表現とその信頼性解析，日本ファジィ学会誌，Vol. 2, No. 2, 231-245, 1990.

問い合わせ先：〒860 熊本市黒髪 2-39-1
熊本大学工学部共通講座数学教室
鬼沢　武久
TEL 096-344-2111, EXT 3582
FAX 096-345-6423

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SC3-1

日常的コミュニケーション場面における あいまい表現に関する考察

ON UNCERTAIN REPRESENTATION IN EVERYDAY COMMUNICATION

中村和男
Kazuo Nakamura

製品科学研究所
Industrial Products Research Institute

Abstract: In our everyday communication we frequently confront with various types of uncertain messages. Basic elements in human communication process are the triplet of a sender, messages, and a receiver. The uncertain messages are sent mainly in the following situations. (a) the case where the original information is essentially uncertain in the sender's mind. (b) the case where a sender cannot find the adequate clear expression in his linguistic sysytems even if his information source is clearly cognized. (c) the case where the messages are intentionally edited so as to be uncertain. These uncertain messages and their operations are understood in the fuzzy theoretical framework.

1. はじめに

ファジィ論は言語的あいまいさを数理的に処理する手段を提供できるといわれる. Zadeh[1] 自身も言語的変数や形容詞の"very"や"sort of" などによる修飾概念（装定語 hedge）の扱いについて言及している. こうした問題意識は, 言語や心理の分野の研究者にも刺激を与え, 1970年頃から1980年代の初期にかけて言語カテゴリーやhedge についてかなりの研究[2)3)4)5)]がなされた. その後この分野の研究は下火であったが, 近年ファジィ論の人文・社会科学分野への適用の可能性が注目されはじめ, ファジィ論と言語や記号論との関係の吟味が再び重要視されるようになってきた. わが国においても藪内[6)7)]がそうした問題意識を展開し, 菅野[8)]も「不確かさ」自体を表す形容詞の構造化を行ったが, ようやく研究が開始されたところである.

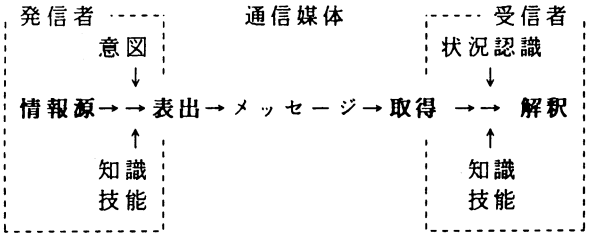
本稿では, 日常的な会話や文書によるコミュニケーションの場面における言語表現のあいまいさの諸相を探るとともに, あいまい表現の実生活の中での活用性を考察し, ファジィ論的な理解を試みる.

2. コミュニケーションにおけるあいまいさ

コミュニケーションの基本構造をFig.1 に示すように考え, 受信者と発信者の間でなんらかのメッセージが通信媒体を通して伝達されるものとする. 発信者は内的に有している情報源をその意図に沿ってどのように伝えようか考えた上で, 知識や技能を動員して表出する. 受信者は媒体を経て取得したメッセージをその場の状況認識と持っている知識, 技能によって解釈する. このとき, 受信者に最終的にあいまいに解釈されるようなコミュニケーションの形式的なタイプは大まかには同図中のA～Dとなる. (A)はあいまいな情報があいまいなままで表出され, あいまいに解釈される場合を表している. (B)はあいまいな情報が明瞭な言語等で表出されるが状況判断等からあいまいに理解される場合である. (C)は明瞭な情報が明瞭な言語等で表出されても受信者の知識不足などからあいまいに理解されてしまう場合である. (D)は明瞭な情報があいまいに表現され, 結局あいまいに理解される場合であるが, さらに発信者の意図を考えると, (a) 明瞭に表現したくてもあいまいな表現にならざるをえない場合と, (b) 明瞭な表現を故意に避ける場合とがあろう.

以下に, それらの例文を示す.

(A) 天気予報で「あすの天気は曇り時々晴れ」.
(B) 〆切の伝言で「あす10時までに提出」といわれても状況から「10時頃まで」と解釈する.
(C) 「この荷物は2.35ポンドです」といわれても1ポンドに対する知識がなければわからない.
(D-a)目の前の色合いを電話の相手に言葉で伝える.
(D-b)政治家の答弁「前向きに検討致します」.



(A)	uncertain	uncertain	uncertain
(B)	uncertain	clear	uncertain
(C)	clear	clear	uncertain
(D)	clear	uncertain	uncertain

Fig.1 コミュニケーション構造とあいまいさ

3. あいまいことばの諸相

ここではことばの意味のあいまいさの諸相を言語心理関連の諸文献[2)4)10)11)12)] を参照しつつ語のレベルと文のレベルでTable 1 のように整理してみた.

(1) 同音異義性

本来異なる語（文）なのに表音が同じでどちらの解釈も可能な場合である. 単語や熟語レベルでは日本語ワープロがそうした選択支の中からの選択作業が主たるものとなるくらい多数の例がある. 実際問題になるのは類似のコンテクストで同じように用いられ意味が大きく異なる場合である. 表中の語レベルにあげたのはそうしたものである. 文レベルは語の区切り方を含めて解釈の自由度がある.

(2) 多義性

一つの語（文）であるが, 幾通りかの解釈ができるもので, ここに挙げた単語は根本的には共通の意味を持ちながら実用的な意味合いがかなり異なるものであ

Table 1 あいまいことばの諸相

あいまいさの相	語レベル	文レベル
同音異義性 音形が同じだが本来は異なる語（文）であり別な意味をもつ	シアン{私案/試案}，シリツ{私立/市立} カガク{科学/化学}，フジン{婦人/夫人} ソウゾウ{創造/想像}，ミル{見る/看る} アツイ{暑い/熱い/厚い}，ミチ{道/路} アケル{明ける/開ける/空ける}	「ココデハキモノヲヌイデクダサイ」 {着物／履物} 「ヤマノアナタニウスガスミ」 {薄霞／臼が住み} 「カエッテミレバコワイカニ」 {こは如何に／怖い蟹}
多義性 一つの語（文）が二つ以上の異なる意味をもつ	先生{教師/医者/議員} 謝意{お礼/お詫び}，いいよ{Yes/No} 自決{自殺/自らの投票で決める} 参る{行く/来る}，おかしい{滑稽/変な} きれい{美しい/清潔}，朝{早朝/午前中}	「空気が重い」 {雰囲気／物理的な話} 「どうぞおかまいなく」 {受け入れ／拒否} 「私の娘は男だ」 {孫は男／女装していた息子}
典型性 概念を代表するモノやコト，状態はあるが，その語の適用範囲がどこまでか不明瞭	モノの概念：　動物　鳥　ペット　花 日用品　野菜　くだもの　カバン コトの概念：　仕事　祭り　食事　運転 掃除　読書　旅行　家事　見物 状態・性質：　優れる　似ている　喜ぶ 疲れる　困る　太る　走る　暑い きれい　古い　硬い　長い　赤い おもしろい　元気な　好きな　粋な 正確な　気の毒な　すてきな ゆっくり　たっぷり　のんびり	「前向きに取り組みます」 「善処いたします」 「地球の温暖化が急速に進んでいる」 「ＧＮＰの1%を大幅に越えない範囲」
ぼかし修飾 基本となる語（文）に付随させて表現をよりあいまい／明瞭にする作用をもつ語．単独では意味をもたない	程度：　やや　まあまあ　なかなか 相当に　とても　大変　非常に 広がり：　など　ころ　くらい　みたい ほど　ほとんど　はっきり　厳密に 強調：　特に　まさしく　実際　本質的	・・・かもしれない たぶん・・・だろう たしか・・・と思う ・・・と思われる　・・・らしい ・・・のはずだ　・・・であろう ・・・と言われている
隣接性，表裏性 表出された語（文）によって，それと隣接性や表裏性のあることを暗に表現しようとする	いい体格（→太っている） 活発（→うるさい） 頭がいい（→ずる賢い） 健康的な肌（→日焼け）	「優秀な人材を欲しがっている．魚がうまい所だがね」（→転勤の打診） 「君は面倒見がいいそうだね」 （→幹事役の打診） 「ぶぶ漬でも食べてってください」 （→帰るよう促す） 「うちの子は知恵遅れでしょうか」 「まだお子さんは小さい．まだこれから伸びてくる．どうしたら伸びてくるか一緒に考えましょう」 （→病気告知）
葛藤性 一見不自然なように感ぜられる用語の組合わによって造られる対立の緊張感を越えたところに新しい意味を築く		少女が歌う　小鳥が歌う そよ風が歌う　小川が歌う 森が歌う　大地が歌う（音を出す） 煙が歌う　光が歌う　（共感覚的） 電気が歌う　水素が歌う（ナンセンス?） 犬が歩く　犬が走る 蝸が歩く　蝸が走る（ナンセンス?） 車が歩く（ナンセンス?）　車が走る 本が歩く（ナンセンス?）　本が走る（ナンセンス?）

る．「どうぞおかまいなく」は同じ場面で用いられたとき，遠慮していても結局受け入れる意図があるのか，本当に遠慮したいのか受信者は区別がつきにくいものである．また，「私の娘は男だ」は「私の娘に生まれた子供は男です」を省略したものと考えると理解し易いが，コンテクストの中で省略しても誤解されないと思われる状況でしばしば用いられる．

(3) 典型性

ある語の意味する概念に含まれる要素のうち代表的なモノ，コト，状態が意識できるが，その周辺のどの要素までその語が適用できるかが不明瞭な場合である．「鳥」については，こまどりや雀などは代表的であるが，ペンギンやペリカンでは典型性がかなり低下するとみられる[4]．「古い」という概念は｛家／歌／家柄／会社／本｝などの話題によってコンテクストに応じた相対的な意味をもってくる．もちろん数学の”奇数／偶数”，”正三角形”のように明瞭な概念もある．また，「似ている」，「より優れる」などは2者間の関係を述べているが，これらもコンテクストに応じてあいまいに決ってくるものであろう．

(4) ぼかし修飾

いわゆる装定語（hedge）と言われている表現で，上述の典型性の概念を表す語に付随する修飾語と文全体に確信度やぼかしの意図を反映させる形態がある．「very」や「sort of」などの作用はファジィ関連の研究[1)2)3)6)]でもしばしば取り上げられている．

(5) 隣接性，表裏性

明示的に表現された言葉の表面的な意味は受信者の気持ちを考慮するものとし，その背後に発信者の真の意図を暗示するような場合である．単語レベルではかなり慣用的に裏の意味が対応しているが，文のレベルはその場に応じて創作されることが多い．表中の「ぶぶ漬」の話は慣用化されているとのことである[11)]．

(6) 葛藤性

いくつかの語が組合わされた表現になったとき，例えば「彼女は向こう岸に住んでいるが，向こう岸にいたことはなかった」等という表現はまったく意味を持たないことになる．しかし，「森が歌う」は比喩的に木々が音をたてる様，「光が歌う」は視覚と聴覚の間の共感覚的捉え方で光のキラメキとみることも考えられる．このように表面的な不自然さが大きく，矛盾性による緊張感が高まる中でそれを越えた新たな意味を解したとき，新鮮な表現と感じることができるのであろう．

4．あいまいことばの積極的な活用

Fig.1 において概観したように，あいまいな意味を持つことばをメッセージとする場合はAとDのケースがある．もともとあいまいな情報をあいまいに伝えることは自然であるが，明瞭な表現を使った場合（B）には，誤解をまねくこともある．一方，Dの(b)のケースのように例え明瞭な情報をもっていても，積極的に不明瞭な表現を用いる場合がある．以下ではこれらのケースをさらに整理してみた．

(ｲ) 受信者の感情や気持ちへの配慮：　隣接表現や表裏表現を用いて，相手の気持ちをプラス側へ向ける，あるいはマイナス側へ向くことを食い止めようとすること．怒りや反発の態度を示す相手に，拒否の意向を伝える場合などは，「考えておきます」「努力します」といい，「優秀な人材が欲しい」と相手を持ち上げ，重大な病気の告知に当たっては相手が傷つかないような表現を選ぶ．

(ﾛ) 発信者の責任回避：ある事柄の実行の意思を示すが，それがどの程度できそうか，あるいは万一の場合できない可能性もあるという意味をもつことばとして「前向きに取り組みます」「善処します」のような典型性概念表現を用いる．また，文のぼかし修飾として「・・・であろう」「・・・と思われる」「・・・と言われている」などの断定を避け，外部化する表現を用いたりする．

(ﾊ) 玉虫色の妥協：ある事柄について幅のあるとりかたが可能な表現を用い，対立する者がそれぞれの立場で都合のよいように解釈して一応満足するという形態である．これを繰り返しているうちに既成事実が次々と積み重ねられていくことがしばしばである．典型性的表現の「ＧＮＰの１％を大幅に越えない範囲にとどめる」「仮の決定案である」「私人として参拝した」などもこの類であろう．典型的な状態としてたてまえ上は対立者の意にそっているようで典型性の低い状態で本音を包含してしまう．

(ﾆ) 文学的な表現：和歌における掛け言葉は同音異義的文表現の一種で多重の意味を積極的に一つの音列の中に込めたものといえよう．

多義性との関連では，省略表現でその補い方の想定を読み手に悟らせることがなされる．芭蕉の句も

閑かさ（を背景にして）（固い）岩に（ですら）
しみ入る蟬の声

と解釈される[9)]．また，コンテクストの想定の仕方によって多様な解釈が可能な表現も詩ではしばしば用いられる．川本[10)]は次の句を用いて４つの解釈の可能性を示しいずれも感動，情緒をもたらすとしている．

舞曲聴く逃亡の霧森に舞い　　原子公平

葛藤性の表現に関しては，「小鳥が歌う」よりも「光が歌う」の方が詩情を感じさせる．

5．若干のあいまいことばのファジィ論的理解

5．1　多義性

解釈可能な異なる意味を要素とするファジィ部分集合として表される．例えば，一般的に先生＝｛1.0/教師，1.0/医者，1.0/議員，0.8/芸術家，0.5/学者｝と表せるとしても，コンテクストが幼稚園児の会話であれば，先生＝｛1.0/教師，0.9/医者，0.0/議員，0.0/芸術家，0.0/学者｝となるであろう．

5．2　典型性とぼかし修飾

典型性概念とファジィ集合の結び付け方には大きく二つの考え方がある．一つは各対象のメンバーシップ度をその「鳥らしさの度合」「野菜らしさの度合」と考えるもので，他の一つはその対象が「鳥である」「野菜である」という論述の真理度と考えるものである．Fig.2 は「年寄り」という典型性概念を年齢ユニバース（Ｘと呼ぶ）の上で考察したものである．［0，1］に正規化した「年寄りらしさの度合」を年齢上に構成すると人間の年齢として意味をもつユニバースである

１２０才位までの上で５０才辺りから単調に増加するものと考えられる．これをメンバーシップ度と考えるのが前者である．さらに図中に「年寄りらしさの度合」の空間（Ｚと呼ぶ）上にその度合がだいたいあるレベル以上というファジィ区間を設定しこれに「年寄り」というラベルを付けることができる．そこで，Ｚ上の年寄り」というファジィ集合を年齢空間Ｘ上に逆変換してやるとＸ上に「年寄り」のファジィ集合が得られる．すなわち「概念Ｐである度合」があるレベル以上であるならば，「その対象はＰである」と言うことができることになり，後者の考え方に沿うことになろう．

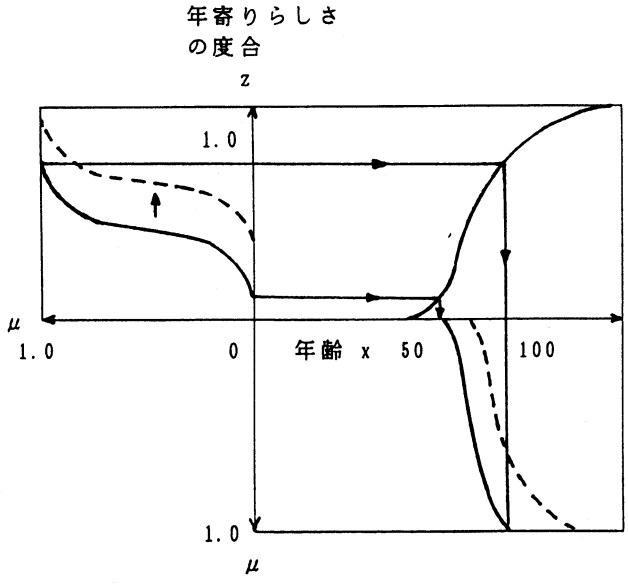


Fig.2 典型性概念のファジィ集合としての表現

ここで，「概念Ｐ（年寄り）らしさの度合」の空間Ｚは心理的尺度空間であり，対象のユニバースＸ（年齢空間）との対応関係はコンテクストによって異なることになる．するとHersh ら[3]が実証的に明らかにしているように"very"などのhedge をＺ上の基本概念Ｐのメンバーシップ関数の上方への基準的シフト操作に帰すことができ，それに基づいてＸ上の"veryＰ"のファジィ集合を得ることができる．

5．3　都合のよい解釈

玉虫色の妥協案に代表されるように，メッセージが幅のあるとりかたが可能な表現になっているとき，受信者はおうおうにして彼／彼女にとって都合のよいように解釈して一応納得してしまうものである．この場合にはメッセージが表現している状態のファジィ集合Ｍと彼／彼女がまあ納得できる状態のファジィ集合Ｄがある程度の重なり合いをもつ場合になんらかのＭのＤへの適合度に応じた納得度で了承することになる．極端な場合ファジィ論の操作としてのheight（Ｍ∩Ｄ）を納得度としてしまうこともありそうである．

5．4　隣接性，表裏表現

我々は日常的な体験や学習の中で，ある事態や物について同時にあるいは引き続いて生起する事柄，従属的ないくつかの属性状態というものの関係を知識として蓄積している．「風が吹けば桶屋が儲る」とはいかなくとも「煙を見ればその下に火がある」と考えるのである．このような知識構造を共有できる者の間のコミュニケーションでは様々な形でこれが活用される．受信者への配慮をしながら言いにくいことを伝えようとする場合にもきわめて有効で，子供の活動性Ｘに関して「活発である（Ａ⊂Ｘ）」という事象と騒がしさＹに関して「うるさい（Ｂ⊂Ｙ）」という事象が隣接性が高いというＲ＝"ほぼＡ×Ｂ"⊂Ｘ×Ｙなるファジィ関係が知識となっていて，Ｘがポジティブな側面，Ｙがネガティブな側面である場合，「お宅のお子さんはなかなか活発ですね（Ａ'⊂Ｘ）」というメッセージを伝え，相手がＢ'＝Ａ'∘Ｒなる関係合成推論をしてくれて「うちの子はかなりうるさい（Ｂ'⊂Ｙ）と見られている」と感じてくれることを期待する．

5．5　葛藤表現

この表現においては，先ず一見不自然にみえることが条件となる．「少女が歌う」のはなんの不自然さも感じさせない．歌うものの集合Ｓと少女の集合Ｇを考えたときほぼＧ⊂Ｓと認識されるからである．「犬が歌う」という表現になると犬の集合Ｄを考えたときＤ⊂Ｓとはいかないであろう．しかしheight（Ｄ∩Ｓ）＝１なる事象を知っている人に取っては不自然とは感じない．では「光が歌う」となるとどうであろうか．光Ｌそのものが歌うことはないが，光がリズミカルにきらめく様を思い，歌うことが視覚的にリズミカルなことと共感覚を引き起こすこともある程度包含するとすれば，height（Ｌ∩Ｓ）≠０となり，何がしかの矛盾性が緊張感をもたらしつつ，新鮮な情緒感も生み出すことになるのであろう．

6．　おわりに

ここでは，日常的なコミュニケーション場面を想定しながらそこに現れる言語的なあいまいさの諸相を探ってきた．限られた心理，言語関係の文献を参照しながらの経験的な考察であり，ほんの一部のあいまいさに言及しただけではあるが，ファジィ論的アプローチが有効となる領域と考えられる．

［参考文献］

1) L.A.Zadeh: The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, Inf. Sci., 8-3, 199/249(1975)
2) G.Lakoff: Hedges:A study in meaning criteria and the logoc of fuzzy concepts, J.Philosophical logic, 2, 458/508(1972)
3) H.M.Hersh, A.Caramazza: A fuzzy set approach to modifiers and vagueness in natural language, J.Exp.Psych.:General, 105-3, 254/276(1976)
4) M.E.McLoskey, S.Glucksberg:Natural categories :Well defined or fuzzy sets?, Memory & Cognition, 6-4, 462/472(1978)
5) D.N.Osherson, E.E.Smith:On the adequacy of prototype theory as a theory of concepts, Cognition, 9, 35-58(1981)
6) 藪内稔：計量的ﾌｧｼﾞｨ意味論－語の曖昧性の表現について，学習院文学部研究年報，24，77/112(1977)
7) 藪内稔：Kay & Mcdanielによる基本色彩語の研究：ﾌｧｼﾞｨ集合論的形式化について，学習院言語共同研究所紀要，8，43/55(1985)
8) 菅野道夫：ビジネスマンのための「ファジィ」読本，サイエンス社(1988)
9) 池上嘉彦：現代言語から視る意味の世界，日本放送出版協会(1978)
10) 川本茂雄：ことばとイメージ－記号学への旅立ち－，岩波書店(1986)
11) 中山治：「ぼかし」の心理，創元社(1989)

＜問い合わせ先＞：〒305 つくば市東1-1-4
製品科学研究所　中村和男
TEL 0298-54-6760　FAX 0298-54-6608

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SC3-2

ファジィ・フェイスチャート

FUZZY FACE CHART

椎塚　久雄　　玉木　博之
Hisao SHIIZUKA　　Hiroyuki TAMAKI
工学院大学電子工学科
Department of Electronic Engineering, Kogakuin University

Abstract

This paper presents a new face chart using the concept of fuzziness for creating flexible data. It is well known that Chernoff asserted that when men see human face, flexibility of their mind is drawn out mostly and proposed to express a lot of data to feature human mind. In Charnoff's face chart, for example, one of the data corresponds to an angle of an eyebrow and other data correspond to angles of eyes and mouth, and so on. However, it has an unfavorable point that when we input comfortable data, the face chart does not provide always good faces or good expressions.

In this paper, we propose a new method for constructing a face chart, by introducing the multiple regression analysis, the cluster analysis and multivariate analysis.

1．まえがき

フェイスチャートは，Chernoff[1]が「人間の心の適応性（フレキシビリティ）は人の顔に接したときに最大限に発揮する」として，多変量のデータを顔の造作で表現することを提案して生まれたものである．これは，成績や計器の針の位置などの正確な値を眉や口の角度などに変換してわざとあいまいにして人間の直感に訴えるようにしているもので，あいまいにすることにより，人間の能力を引き出し，人間の直感を刺激しようとすることをねらっている．

たとえば，あるデータを顔の眉の角度に対応させたとする．さらに，その他のデータもそれぞれ口の角度や目の角度に対応させる．そうすると，フェイスチャートの顔の造作を観ることによって，その造作に対応するデータの内容を判断することができる．さらには顔の全体の特徴から多数のデータの内容を大ざっぱに判断することができる．しかし，この方法は，変量を割り当てた顔のぞれぞれの造作の特徴から，データの内容を判断するものであって，顔の表情としては観にくい欠点がある．

本論文では，多変量の各変量の状態の把握をある程度犠牲にして，フェイスチャートを全体の表情として観ることができるように，多変量解析の重回帰分析，クラスター分析の手法を取り入れることを提案している．また，ファジィ性をより高めるために，入力にもファジィを取り入れて，入力をより柔軟にし，さらに，システムにできる限りファジィの要素を取り入れている．さらに，本手法によって作成したファジィ・フェイスチャート・システムについて紹介し，いくつかの具体例も示す．

2．ファジィ・フェイスチャート・システム

2.1　新システムの意義と目的

ここでは，Chernoffのフェイスチャートとは異なる新しいフェイスチャートを作成する意義と目的について示す．

Chernoffのフェイスチャートでは，多数のデータをそれぞれ顔の造作の位置や大きさに変換して表現している．たとえば，あるデータを顔の眉の角度に対応させたとする．さらに，その他のデータもそれぞれ口の角度や目の角度に対応させると，フェイスチャートの顔のそれぞれの造作を観ることによって，その造作に対応するデータの内容を判断することができる．さらには，顔の全体の特徴から多数のデータの内容を大ざっぱに判断することができる．

しかし，このような方法では入力データの内容が，値の小さいときには状態がよくなく，値の大きいときには状態がよいというような場合（たとえば，成績など），または，所属度が単調増加のファジィ集合で表されるような場合には，入力データの状態がよいときに必ずしもよい顔，よい表情にはならずに，入力が平均的データのときに割合整った顔になり，入力がよいときに極端な顔となる．このように，顔の特徴によって，それぞれの造作に対応させた変数の状態は分かるが，全体の表情としては見にくい．

本論文で開発したシステムは，このような点を改良するために，フェイスチャートを全体の表情として観ることができるようにすることを目的にしている．そこで，顔の造作に各変数を対応させるのではなく，複数の入力データをなんらかの方法で，解析し，全体の状態として，顔の表情を作るようにするということが考えられる．このようにすれば，全体の状態がよいときにはよい表情，普通のときには普通の表情というようにできる．しかし，逆にこの方法では，多変量を扱っても各変量の状態がわからなくなってしまう．そこで，この二つの方法をうまく組み合わせて，できる限り両方の良さを持ち合わせるようにしていくことが問題となる．

この問題の解決を目的として，本論文では，各変数の状態の把握をある程度犠牲にしても，顔の表情を出すために，いくつかの変数をまとめて，顔の造作の一部分に対応させるということを考え，その一つの方法として，多変量解析の重回帰分析，クラスター分析を取り入れている．

重回帰分析は，いくつかのデータからあるものを大まかに推定するという分析である．クラスター分析は，いくつかのデータを似たものどうしに分類するという分析である．

システムの具体的題材は，大学生活の満足度診断システムとし，重回帰分析をするために次に示すような項目について，満足度を0.0～1.0の間の数値でアンケート調査を行

なった：

1．勉強（成績ではなく勉学そのもの）（　）
2．成績（　）
3．就職（　）
4．友人関係（　）
5．趣味（　）
6．サークル等（　）
7．アルバイト（　）

3.2 システムの題材の分析

アンケート結果より重回帰分析を行い，まず勉強系（1～3）の満足度について，勉学，成績，就職の満足度との関係を調べる．説明変数x_1(勉学)，x_2(成績)，x_3(就職)の任意の値に対して，それに対応する目的変数y_a(勉強系の満足度)の予測値を

$$y_a = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 \quad (1)$$

とおき最小2乗法より

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \{ y_i - (a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3) \}^2 \quad (2)$$

を最小にするようにQを$a_0 \cdots a_3$で偏微分して0とおき整理すると

$$\begin{aligned} a_0 &= \bar{y}_a - (a_1 \bar{x}_1 + a_2 \bar{x}_2 + a_3 \bar{x}_3) \\ s_{11} a_1 &+ s_{12} a_2 + s_{13} a_3 = s_{1y} \\ s_{21} a_1 &+ s_{22} a_2 + s_{23} a_3 = s_{2y} \\ s_{31} a_1 &+ s_{32} a_2 + s_{33} a_3 = s_{3y} \end{aligned} \quad (3)$$

（sは，分散，共分散）

が得られる．これらよりa_0, a_1, a_2, a_3を求めると，

$$y_a = 0.99 + 0.44 x_1 + 0.40 x_2 + 0.09 x_3 \quad (4)$$

という回帰式が得られる．

同様に，遊び系（4～7）の満足度について，友人関係，趣味，サークル等との関係を調べる．説明変数x_4(友人関係)，x_5(趣味)，x_6(サークル等)の任意の値に対して，それに対応する目的変数y_b(遊び系の満足度)の予測値を

$$y_b = b_0 + b_1 x_4 + b_2 x_5 + b_3 x_6 \quad (5)$$

とおき計算すると

$$y_b = 2.59 + 0.11 x_4 + 0.48 x_5 - 0.20 x_6 \quad (6)$$

という回帰式が求められる．ここで，b_3の値がマイナスであるが，この回帰式ではx_6(サークル等)の満足度が高い場合に総合の満足度が低くなってしまう．これは，アンケートの(サークル等)の回答が，0多数を含み全体的に低かったためと思われる．そこで，x_6(サークル等)を削除して分析してみると

$$y_c = 2.35 + 0.11 x_4 + 0.49 x_5 \quad (7)$$

という回帰式が求められる．

次に，求められた回帰モデルの適合度を検定してみると

勉強系については　$R^2 = 0.764$
遊び系については　$R^2 = 0.639$

となる．したがって，勉強系の回帰モデルに関してはかなりよく当てはまっているといえる．また，遊び系の回帰モデルに関しても割とよく当てはまっているといえる．

次に，同じアンケート結果を用いて，クラスター分析を行う．変量間の非類似度を測る指標として，ユークリッド平方距離

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^{n} (x_{ki} - x_{kj})^2 \quad (8)$$

を用い表1を作成する．

表1　変量間の非類似度

	1	2	3	5	6	7	9
1 勉学		209	107	77	143	204	197
2 成績			107	114	178	624	242
3 就職				65	101	676	147
4 友人関係					60	451	122
5 趣味						545	124
6 ｻｰｸﾙ							551
7 ｱﾙﾊﾞｲﾄ							

表1のデータに対して，最短距離法によりクラスター分析をしたデンドログラムを図1に示す．

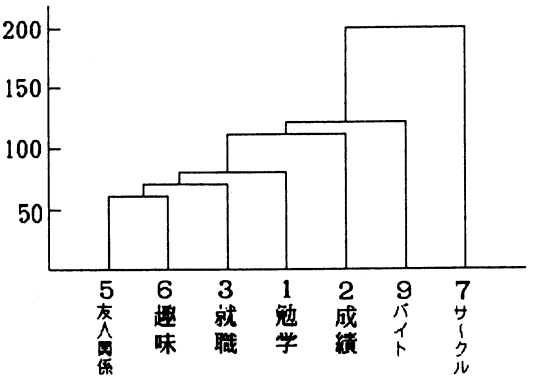


図1　変量のクラスター分析結果

このシステムの題材である大学生活については，変量間のクラス分けがかなりはっきりしていて，アンケートを取る段階でクラス分けをしていたので，あえてこの分析結果を100％使わずに，一つだけかけ離れた結果となったサークル等を遊び系から削除して，システムの作成を行う．しかし，分析結果は，あらかじめ分けたクラスとかなり近い結果（友人関係と就職がペアになった段階で切り放せば，［勉学，成績，就職］［友人関係，就職］［アルバイト］となり，このシステムのクラス分けと同じになる）となり，このシステムの題材ほどにクラス分けのはっきりしない題材にはこのクラスター分析は有効であると思われる．

3.3 システムの構成

ファジィフェイスチャートシステムのフローチャートを図2に示す．各項目は次のような内容を意味している．

〔1〕起動時に設定してあるﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数値を表示する．

〔2〕起動時に設定してあるﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数値を変更することができる．入力データが，ある段階に集中している場合に，満足度のメンバーシップ関数の値を変化させると，入力データの差が小さくても表情に差がでてくる．

〔3〕ファジィアンケートの手法で，0～1間の自由な数値を入力する．

〔4〕回帰モデルを用いて処理する．

〔5〕フェイスチャートをグラフィック表示する．

〔6〕もう一度？…Yesとすると，〔2〕で変更したメンバーシップ関数値のままで繰り返すことができる．

この他の，作成したシステムの補足事項を以下に示す．

*DEFAULTで，各変数の適当と思われる範囲で，最大値，最小値を定めているが，より変化の幅を広げ，特徴をだしやすくするには，その部分を変更すればよい．

この大学生活の満足度診断システムでは，顔の表情をつくりだすのに最も重要であると思われる造作の目もとと口に，多変量解析を用いた分析結果を割り当てているが，変

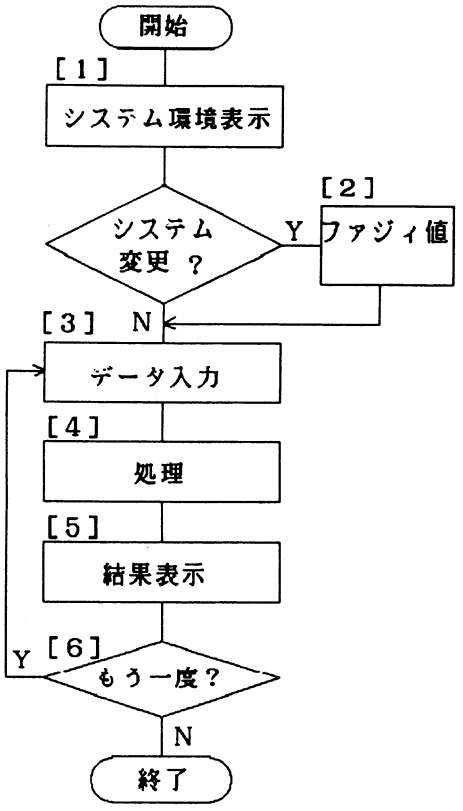


図２　ファジィ・フェイスチャートシステム

量を割り当てていない顔の造作（顔の上下の輪郭，目の上下，左右の位置）にも変量を割り当てることができる．ただし，これらはプログラムの内部であるから，実行中に変更することはできない．

４．システムのグラフィック表現法

ここでは，作成したファジィ・フェイスチャートシステムの顔の各造作の表現法を示す．

4.1画面定義

図３に示すように，SCREENで定義した画面のＸ座標，Ｙ座標の中心をそれぞれX0,Y0とする．

(1)顔の輪郭上下：顔の輪郭の表現を図４に示す．ただし，中心座標を(X0, Y0±40)とし，半径を入力データに対応させる．楕円の偏平率を（88.5／半径）とする．

上下の輪郭を接点をうまく合わせるために上下の半径差を利用して開始角度と終了角度を調整する．

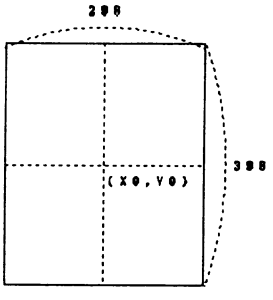


図３　画面定義

FA4=FA3/20*10（FA3は上下輪郭の半径差）

FS1=(333+FA4)*PI/180: FE1=(207-FA4)*PI/180

FS2=(153-FA4)*PI/180: FE2=(27+FA4)*PI/180

(2)目：目の変化を図５(a)～(d)に示す．目の上下（図５(a),(b)），左右（図(c),(d)）の位置を入力データに対応させ変化させる．

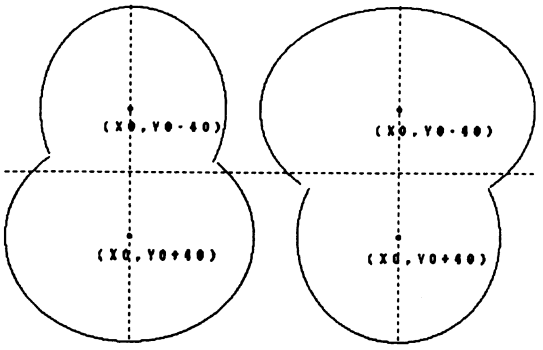


図４　顔の輪郭上下

中心座標（X0±変換値ME1,Y0-変換値ME2)

半径＝30

楕円の偏平率＝1.2

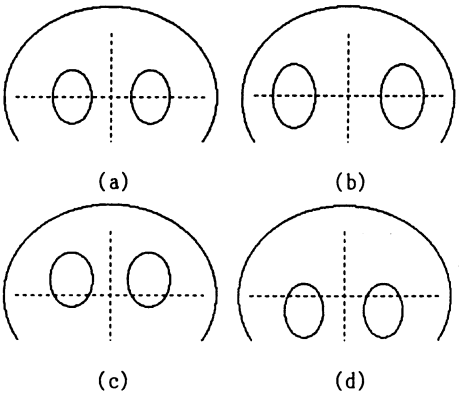


図５　目の変化

(3)瞳，眉：瞳と眉の表現を図６(a)～(d)に示す．

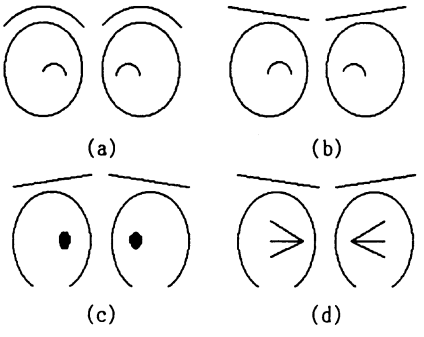


図６　瞳と眉の表現

瞳については，入力データにより次の３種類の型に振り分ける．

①図６(a),(b)の場合：中心Ｘ座標は目の中心のＸ座標から目の半径の１／６内側，中心Ｙ座標は目の中心のＹ座標から目の半径の１／１０下側，半径＝７，楕円の偏平率＝１，開始角度＝０，終了角度＝π．

②図６(c)の場合：中心Ｘ座標は目の中心のＸ座標から目の半径の１／６内側，中心Ｙ座標は目の中心のＹ座標，半径＝５（目の１／６倍），楕円の偏平率＝1.2.

③図６(d)の場合：図６(d)に示すように３本の直線で表す．開始Ｘ座標は目の中心のＸ座標から15内側，開始Ｙ座標は目の中心のＹ座標，終了Ｘ座標は目の中心のＸ座標，終了Ｙ座標は目の中心，目の中心±8の３点．

一方，眉については入力データにより次の２種類の型に

振り分ける．

①図６(a)の場合：中心Ｘ座標は目の中心のＸ座標から目の半径の１／６内側，中心Ｙ座標は目の中心のＹ座標，半径＝40（目の４／３倍），楕円の偏平率＝1.2，開始角度＝π/4，終了角度＝3π/4.

②図６(a),(b),(c)の場合：さらに瞳の形と連動し３段階で変化する．開始Ｘ座標は目の中心から30内側(目の内端)，終了Ｘ座標は開始座標から60外側(目の外端)，開始，終了Ｙ座標は目の中心から35上側±7(瞳の３種の型それぞれに，＋７～－７の間で，cos関数の値により角度が変化する)．

YS=F1-35+MAX(6)*COS(BS)

YE=F1-35-MAX(6)*COS(BS)

BSは入力値により0～180で変化する．

MAX(6)の初期値＝７

(4)口：口の表現を図７に示す．

口は入力データにより次の４種類に振り分ける．

①図７(a)の場合：半径を入力データに対応させる．中心座標は（X0,Y0+50），楕円の偏平率＝0.9，開始角度＝π，終了角度＝２πで，両端を直線で結ぶ．

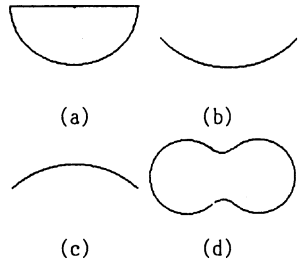


図７　口の表現

②図７(b)の場合：半径を入力データに対応させる．中心座標(X0,Y0+70-0.5×半径)．口の位置が適当となるように，半径の変化にともない，中心を移動させる．半径が大きくなるほど中心は上側に移動する．楕円の偏平率＝0.7，開始角度＝7π/6，終了角度＝11π/6.

③図７(c)の場合：半径を入力データに対応させる．中心座標（X0,Y0+90+0.35×半径）．口の位置が適当となるように，半径の変化にともない，中心を移動させる．半径が大きくなるほど中心は下側に移動する．楕円の偏平率＝0.7，開始角度＝π/4，終了角度＝7π/4.

④図７(d)の場合：半径を入力データに対応させる．４個の楕円弧の組み合せにより描く．

【楕円弧Ａ，Ｂ】中心座標（X0±半径,Y0+65），楕円の偏平率＝1.

【楕円弧Ｃ，Ｄ】中心座標（X0,楕円弧Ａ，Ｂの中心のＹ座標±3，3/30×楕円弧Ａ，Ｂ半径），半径は楕円弧Ａ，Ｂの半径の１／２，楕円の偏平率＝0.9.

以上の４個の円弧をうまく合わせるように，それぞれの開始角度，終了角度を定める．

(5)鼻：鼻の表現を図８に示す．

X0上（開始Ｘ座標X0,終了Ｘ座標X0）に入力データに対応した長さで表す．鼻の位置が適当となるように，目の位置の上下の変化にともない，中心を上下に移動させる．

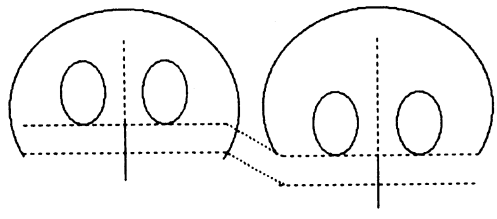


図８　鼻の表現

５．実行例

本システムを用いて実行した例のいくつかを示す．

例１：このシステムのフェイスチャートの変化の様子を見るために試験的に行なった．表２に示すファジィ値に対応するフェイスチャートの表情の変化を12段階（ａ～ℓ）に分けて図９にそれを示す．

例２：図10はアンケート調査を行なって得られた数値（表３）を用いた12とおりの適用例を示した．

６．むすび

本論文では，フェイスチャートによりファジィ性を取り入れ，これまでのフェイスチャートの基本的な考え方を使わずに新たな手法，すなわち，変量をそのまま顔の造作の割り当てずに入力データを解析して，総合的な状態を顔の表情として描き出すことを提案した．さらに，その総合的な状態を導き出すためのデータの解析の手法として，多変量解析の重回帰分析，クラスター分析を取り入れたファジィ・フェイスチャート・システムを構築した．

作成したシステムに関しては，グラフィック表現についての目的，すなわち，表情として観て状態を判断するフェイスチャートを作成するという目的は達成できた．しかし，システム内部の処理については，システムの内部で回帰分析の計算結果が固定されている等の問題点がある．いくつかの問題点はあるにしても，フェイスチャートを顔の特徴ではなく，表情として観るシステムという目的は達した．このことは，人間の顔の認知と情報処理[2]についてさらに深く検討し，人間の顔が訴えている本質を表現するための一つのアプローチとなろう．

しかし，ファジィ理論については，入力により柔軟な回答ができるファジィアンケート調査の手法を用いること，また，複数の説明変数からひとつの目的変数をつくりだし誤差を含む予測値を用いて顔を描く変数に割り当てて，表情をだしていることなど，最も基本的な理論のファジィ集合論に関することの導入にとどまった．

フェイスチャートに表情をだすための方法として，重回帰分析，クラスター分析を用いることを議論してきたが，ここで，この方法の問題点と今後の課題をあげておこう．

まず，重回帰分析については，次のような点が挙げられる．

（１）目的変数の作り方が固定されている．すなわち，アンケート調査から一つの固定された形になっている．

（２）上記(1)のために，システムの中で回帰分析の計算がフレキシブルにできない．これは，入力のデータの種類が変わった場合に対応しにくい．システムの外部で，重回帰分析をしているため，異なった題材，変量にする場合には，その都度データを集めて，分析をしなければならない．

（３）説明変数ｘが目的変数ｙをよく説明しているかを決定係数または寄与率と呼ばれる数値で判定できるが，その数値が低い場合はどうするか．

一方，クラスター分析に関しては，システムの内部に組み込むことはできるが，多数のデータを分析しなければならないので，ある程度の量のデータをあらかじめ読み込まなければならないため，一回一回の入力にダイレクトに対応することはできないということがあげられる．

今後の発展性としては，以上あげた問題点を解決した新

たな分析方法や，ファジィ理論を取り入れたよりよいシステムが考案されることが期待される．すなわち，重回帰分析に関する課題，ファジィ演算，ファジィ推論の応用，さらに，多変量解析へのファジィ理論の応用に関する課題を解決し，よりファジィ理論が生かされたシステムが考案されることが期待される．

表２　表情を見るために12段階に分けたファジィ値

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	ℓ
(1)勉学	1	0.85	0.8	0.7	0.6	0.55	0.5	0.4	0.3	0.25	0.1	0
(2)成績	1	0.85	0.8	0.7	0.6	0.55	0.5	0.4	0.3	0.25	0.1	0
(3)就職	1	0.85	0.8	0.7	0.6	0.55	0.5	0.4	0.3	0.25	0.1	0
(4)友人関係	1	0.85	0.8	0.7	0.6	0.55	0.5	0.4	0.3	0.25	0.1	0
(5)趣味	1	0.85	0.8	0.7	0.6	0.55	0.5	0.4	0.3	0.25	0.1	0
(6)アルバイト	1	0.85	0.8	0.7	0.6	0.55	0.5	0.4	0.3	0.25	0.1	0

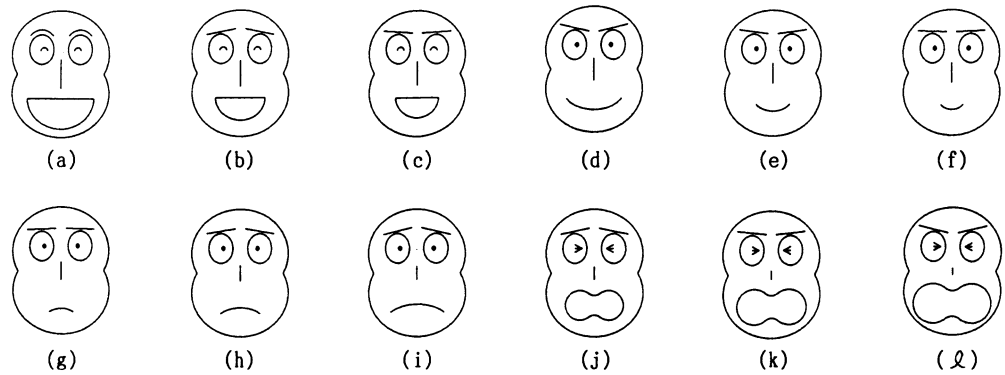


図９　表２のファジィ値に対応するフェイスチャート（ただし，まあ満足＝0.75，やや不満＝0.3）

表３　アンケート調査から得られたファジィ値（１２例）

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	ℓ
(1)勉学	0.3	0.5	0.6	0.3	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5
(2)成績	0.8	0.6	0.3	0.3	1.0	0.8	0.4	0.7	1.0	1.0	0.7	0.4
(3)就職	0.7	0.8	0.9	0.5	0.8	1.0	0.4	0.5	1.0	0.5	0.7	0.8
(4)友人関係	0.6	0.5	0.7	0.7	0.8	0.8	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
(5)趣味	0.6	0.3	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.2	0.7	0.6	0.6	0.9
(6)アルバイト	0.7	0.3	0.8	0.8	0.5	0.9	0.9	0.8	1.0	0.0	0.3	0.7

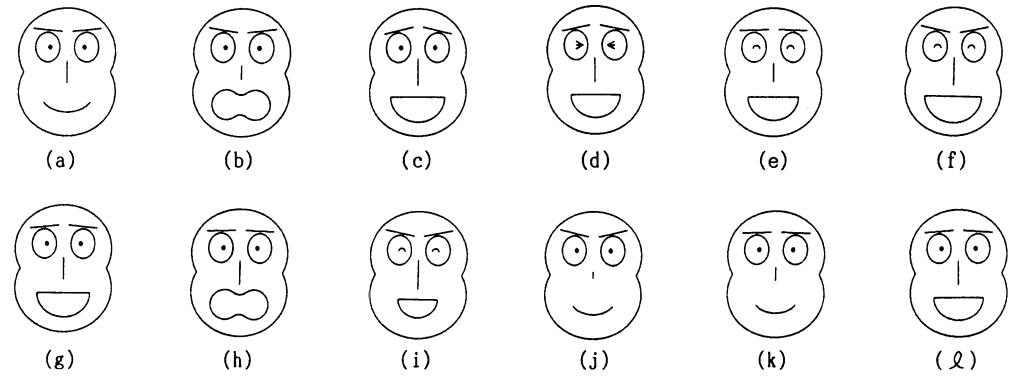


図１０　表３のファジィ値に対応するフェイスチャート（ただし，まあ満足＝0.65，やや不満＝0.4）

文　献

(1)H.Chernoff: "The Use of Faces to Represent Points in k-Dimensional Space Graphically", J. of American Statist. Assoc., pp.361-368, June 1973.
(2)Ｖ.ブルース(吉川左紀子訳)："顔の認知と情報処理"，サイエンス社，1990年４月.

問い合わせ先：〒160　東京都新宿区西新宿１－24－２
工学院大学電子工学科
椎塚久雄
TEL 03-342-1211 EXT 2649
FAX 03-348-3486

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SC3-3

橋梁診断システムにおける主観的あいまいさの取扱い

Engineering Dealing of Subjective Uncertainty in Bridge Rating System

宮本 文穂　　森川 英典　　益成 一郎
Ayaho Miyamoto, Hidenori Morikawa and Ichiro Masunari
神戸大学 工学部
Fuculty of Engineering, Kobe University

Abstract : For the construction of a knowledge-based system including the subjective information related to bridge rating, it is important to investigate the rational dealing method for such subjective uncertainty.

This paper discusses in detail an application of both concepts of the membership function according to the fuzzy set theory and the basic probability according to the Dempster & Shafer's theory to deal with such subjective uncertainty. In order to make a quantitative comparison between results by both methods, a few numerical examples are made.

1．はじめに

既存橋梁の維持管理の核となる「診断ｼｽﾃﾑ」の必要性が社会的要請として高まってきている[1]。橋梁の損傷、劣化に影響を与える要因は非常に多く、かつその関連性はきわめて複雑となるばかりでなく、橋梁をはじめとする土木構造物は一般に単品生産となる場合がほとんどであり、統計的解析が容易でないことなどから、従来より、診断及び補修・補強は経験豊富な専門家の主観的判断に委ねられているのが実状である。したがって、橋梁診断のｼｽﾃﾑ化にｴｷｽﾊﾟｰﾄｼｽﾃﾑなどを適用するためには、診断過程に内在する主観的あいまいさの取扱いが重要となる。

本研究は、橋梁診断ｼｽﾃﾑを構築するにあたり、主観的あいまいさの取扱い手法として、ﾌｧｼﾞｨ集合論とDempster-Shafer理論における基本確率[2]の２つをとりあげ、両者による診断結果を対比するとともに、橋梁診断への適用性について検討を行ったものである。

2．帰属度関数によるあいまいさの取扱い

ﾌｧｼﾞｨ集合論における帰属度関数の考え方及びその演算には種々のものがあるが、本研究では、帰属度のあいまいさをﾍﾞｰｸﾞﾈｽ関数を用いて処理し、帰属度関数の結合にDempsterの結合則を適用する手法を導入した[3]。すなわち、まず、帰属度関数$\mu_A(x)$（見掛けの帰属度関数と呼ぶ）を次式によりあいまい量（ﾍﾞｰｸﾞﾈｽ関数）$V_A(x)$、肯定の確信量$\mu'_A(x)$及び否定の確信量$\mu'_{\bar{A}}(x)$に分割する。図1はこれらの関係を図示したものである。

$$\begin{cases} V_A(x)=\begin{cases} 2\times\{1.0-\mu_A(x)\} & (1.0\geqq \mu_A(x)\geqq 0.5) \\ 2\times \mu_A(x) & (0.5> \mu_A(x)\geqq 0.0) \end{cases} \\ \mu'_A(x)=\mu_A(x)-V_A(x)/2 \quad (1.0\geqq \mu_A(x)\geqq 0.5) \\ \mu'_{\bar{A}}(x)=\mu_{\bar{A}}(x)-V_A(x)/2 \quad (0.5> \mu_A(x)\geqq 0.0) \end{cases} \tag{1}$$

以上のように定義した帰属度関数の結合はﾍﾞｰｸﾞﾈｽ関数を考慮して実行するが、Dempsterの結合則では、積集合が空集合となる場合を考慮して全体を分母で正規化しているのに対し、本研究では、空集合となる部分を矛盾量と考えて、正規化を行わないものとした。すなわち、図2(a)に示す結合概念を基に結合後の肯定の確信量$\mu'_{A,B}(x)$(図中の○印)、否定の確信量$\mu'_{\bar{A},\bar{B}}(x)$(●印)、あいまい量$V_{A,B}(x)$(△印)及び矛盾量$\mu\phi(x)$(★印)は次式より求まる。

$$\begin{cases} \mu'_{A,B}(x)=\mu'_A(x)\cdot\mu'_B(x)+\mu'_A(x)\cdot V_B(x)+\mu'_B(x)\cdot V_A(x) \\ \mu'_{\bar{A},\bar{B}}(x)=\mu'_{\bar{A}}(x)\cdot\mu'_{\bar{B}}(x)+\mu'_{\bar{A}}(x)\cdot V_B(x)+\mu'_{\bar{B}}(x)\cdot V_A(x) \\ V_{A,B}(x)=V_A(x)\cdot V_B(x) \\ \mu\phi(x)=\mu'_{\bar{A}}(x)\cdot\mu'_B(x)+\mu'_A(x)\cdot\mu'_{\bar{B}}(x) \end{cases} \tag{2}$$

したがって、結合後の見掛けの帰属度関数$\mu_{A,B}(x)$、$\mu_{\bar{A},\bar{B}}(x)$は次式で表される。

$$\begin{cases} \mu_{A,B}(x)=\mu'_{A,B}(x)+(V_{A,B}(x)+\mu\phi(x))/2 \\ \mu_{\bar{A},\bar{B}}(x)=\mu'_{\bar{A},\bar{B}}(x)+(V_{A,B}(x)+\mu\phi(x))/2 \end{cases} \tag{3}$$

また、結合する帰属度関数が3個以上の場合は、結合順による影響をなくすために、初めの2つを結合した段階で生じる矛盾量をその段階ではﾍﾞｰｸﾞﾈｽに繰り込まず、

全ての結合が終わってからﾍﾞｰｸﾞﾈｽに繰り入れることとする（図2(b)参照）。

3．基本確率によるあいまいさの取扱い

Dempster-Shafer理論では、基本確率を通じて定義される下界及び上界確率という概念を用いることにより、Bayes確率に適さない主観に関わる不確実性を処理している[2]。ここで、A_0を有限な集合、$A_i(i=1,2,\cdots)$をその部分集合とすると、基本確率$m(A_i)(i=1,2,\cdots)$は値域[0,1]をとり、次の条件を満たす。

$$\begin{cases} m(\phi)=0 \\ \sum_{A_i \in A_0} m(A_i)=1 \end{cases} \tag{4}$$

ここで、$m(A_i)>0$のとき、A_iは焦点要素と呼ばれる。下界確率（$p_*(A_i)$）は、部分集合A_i内に閉じこめられた基本確率の和を表し、上界確率（$p^*(A_i)$）は、少しでもA_i内にはいる可能性のある基本確率の総和を表しており、両者の差があいまいさを表すことになる。両者はそれぞれ、以下のように定義される。

$$p_*(A_i)=\sum_{A_j \in A_i} m(A_j) \tag{5}$$

$$p^*(A_i)=1-p_*(\bar{A}_i)=1-\sum_{A_j \in \bar{A}_i} m(A_j) \tag{6}$$

以上の基本確率の結合にはDempsterの結合則を用いる。すなわち、m_1, m_2を独立な証拠に基づいて得られた基本確率とし、$A_{1i}, A_{2j}(i,j=0,1,2,\cdots)$を各々の焦点要素とすると、結合後の基本確率は次式で求まる。

$$m(A_k)=\frac{\sum_{A_{1i}\cap A_{2j}=A_k} m_1(A_{1i})\cdot m_2(A_{2j})}{1-\sum_{A_{1i}\cap A_{2j}=\phi} m_1(A_{1i})\cdot m_2(A_{2j})} \quad (\text{但し}, A_k \neq \phi) \tag{7}$$

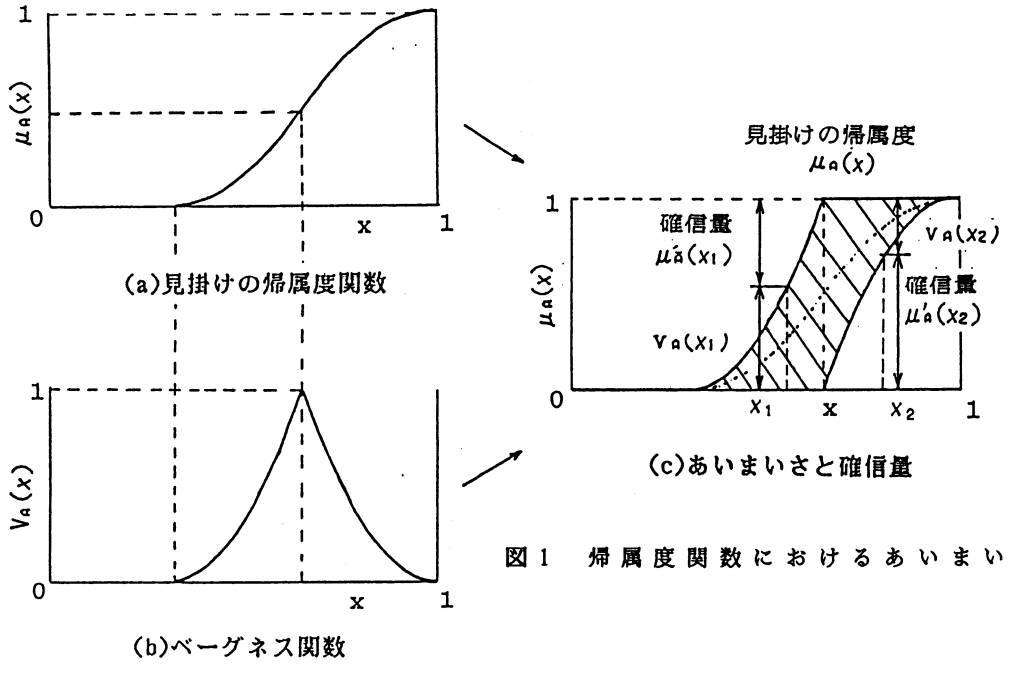


図1　帰属度関数におけるあいまいさと確信量

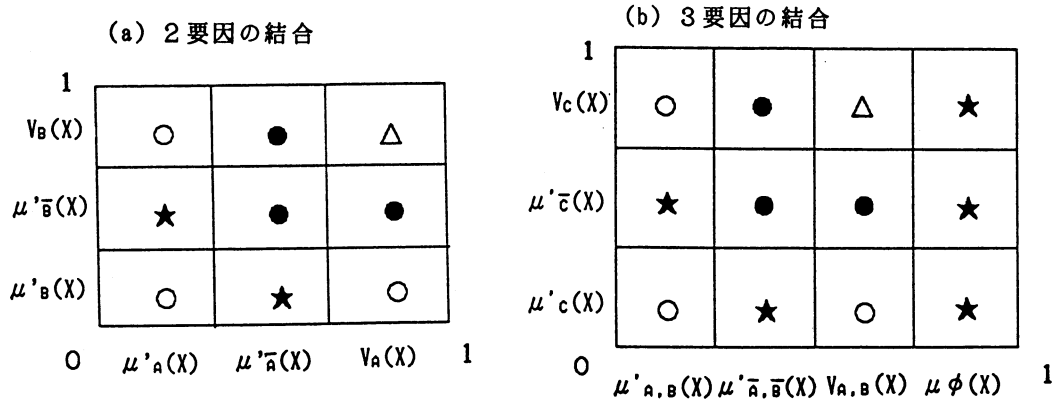


図2　帰属度関数の結合概念

4．帰属度関数と基本確率による演算結果の比較

上述のように定義した見掛けの帰属度関数における帰属度$\mu_A(x_1)$とは、ある要素x_1がﾌｧｼﾞｨ集合Aに属する度合い（あいまい量を含む）を表したものであるから、Dempster-Shafer理論における基本確率の上界確率$p^*(A_{x1})$がこれと対応するものと考えた。すなわち、基本確率の上界値曲線が帰属度関数と対応するということになる。

ここで、簡単な例として、「ほぼsafe(mode.,dang.)である」に対する基本確率の割当てを次式のようにすると、それぞれの上界値曲線（帰属度関数）は図3のようになる。

$$\begin{cases} \text{safe}: m(s)=0.8, m(s,m)=0.1, m(s,m,d)=0.1 \\ \text{mode.}: m(m)=0.7, m(s,m)=0.1, m(m,d)=0.1, \\ \qquad m(s,m,d)=0.1 \\ \text{dang.}: m(d)=0.8, m(m,d)=0.1, m(s,m,d)=0.1 \end{cases} \tag{8}$$

これらを基本的なﾊﾟﾀｰﾝについて演算した場合の結合結果を図4にまとめて示す。ただし、ここでの帰属度関数の演算は離散的に行っている。

図4より、結合数が2つの場合には帰属度関数と基本確率による演算結果の差異は余り見られないが、3つになると両者にかなり差が出てくることがわかる。例えば、図4(c)[safe*dang.]と図4(d)[safe*safe*dang.]の演算結果を比較すると、帰属度関数の場合、両者の間にはほとんど差異はみられないのに対し、基本確率の場合では後者の方がかなり[safe]に支配されており、共通部の優位性がより強く現れているといえる。また、図4(e)の [safe*mode.*dang.]演算では、基本確率は[mode.]をやや高く支持しているのに対し、帰属度関数はすべてを同程度に支持している。このように、一般的に結合数が多くなると、基本確率による手法は帰属度関数による手法に比べて共通部の優位性が強調される傾向（尖度が大きい）がみられるようになる。

5．橋梁診断システムへの適用

本研究で開発する橋梁診断ｼｽﾃﾑでは、構造諸元や属地条件等の下位情報から、順次、耐荷性、耐久性等の上位の項目についての評価を行っていき、最終的に橋梁全体の耐用性を評価する推論ﾌﾟﾛｾｽを設定した[4]。また、知識ﾍﾞｰｽを構築するにあたって、専門家に対するｱﾝｹｰﾄ調査による知識の獲得を行なった。ｱﾝｹｰﾄ調査の質問項目は推論ﾌﾟﾛｾｽと対応させ、各質問項目ごとに0～100点の評価点を記入する形式をとるものとした。ここで、多数の専門家からなる集団を、橋梁を診断する一つの主体と考え、その要素である一人一人の解答のばらつきをその主体が下した診断に対するあいまい度と考える手法と、少数の専門家に対する数回のｱﾝｹｰﾄを一つの主体と考え、その回答結果のばらつきが診断における専門家の有するあいまい度と考える手法の2つがあると考えられるが、ここでは前者の手法を一例として適用してみた。そして、Dempster-Shafer理論及びﾌｧｼﾞｨ集合論を適用してこれを整理した。以下に、それぞれの手法について説明する。

5.1 帰属度関数の決定法

帰属度関数は、後述する式(11)をそのまま適用して決定することができるが、本ｼｽﾃﾑを構築するに当たっては、ｱﾝｹｰﾄ調査結果にΠ関数及びS関数を用いて、帰属度関数を次式で定義することとした。

$$\Pi(u;a,b,c)=\begin{cases} S(u;c-a,c-a/2,c) & (u\le c) \\ 1-S(u;c,c+b/2,c+b) & (u>c) \end{cases} \tag{9}$$

ただし、

$$S(u;x,y,z)=\begin{cases} 0 & (u\le x) \\ 2\left(\dfrac{u-x}{z-x}\right)^2 & (x<u\le y) \\ 1-2\left(\dfrac{u-z}{z-x}\right)^2 & (y<u\le z) \\ 1 & (z<u) \end{cases} \tag{10}$$

Π関数の概念図を図5に示す。ここで、各ﾊﾟﾗﾒｰﾀを、それぞれの性質を考慮し、ｱﾝｹｰﾄ調査結果より以下に示す定義に従って求めることとした。

c：全評価点の平均値

a：cと評価点の最小値との差の2倍

b：cと評価点の最大値との差の2倍

ここで、ﾊﾟﾗﾒｰﾀa,bをこのように定義したのは、評価点の最小値及び最大値がその評価全体の集合に属する程度（帰属度）を0.5（その評価に属するか属さないかは全くわからない）と仮定したためである。

以上のようにして求めたﾊﾟﾗﾒｰﾀ a,b,cをｴｷｽﾊﾟｰﾄｼｽﾃﾑの知識ﾍﾞｰｽ内に蓄積する。

5.2 基本確率の決定法

ｱﾝｹｰﾄ調査結果を各質問項目ごとに集計し、その平均値と標準偏差を得ることによって、各質問項目が示す橋梁の状態を次式のように表現する。

$$\begin{cases} \mu(x)=\exp[-\{(x-x_{ave})/\sigma_L\}^2] & (X\le x_{ave}) \\ \mu(x)=\exp[-\{(x-x_{ave})/\sigma_R\}^2] & (X\ge x_{ave}) \end{cases} \tag{11}$$

ここに、x_{ave}は平均値、σ_L平均値より左側のﾃﾞｰﾀに対する標準偏差、σ_Rは平均値より右側のﾃﾞｰﾀによる標

準偏差である。

基本確率の要素は,danger,moderate,safe,の３要素にこれらの中間値に２要素を加え計５要素を設定した。

ここで、基本確率の要素は、a(danger),b(dangerとmoderateの中間),c(moderate),d(moderateとsafeの中間),e(safe)とし、式(11)と上界確率の対応を正規化し、次のような関係におくものとする。

$$p^*(\{a\})=\mu(25)/\alpha,\ p^*(\{b\})=\mu(37.5)/\alpha,$$
$$p^*(\{c\})=\mu(50)/\alpha,\ p^*(\{d\})=\mu(62.5)/\alpha, \quad (12)$$
$$p^*(\{e\})=\mu(75)/\alpha$$
$$\alpha=\max\{\mu(25),\mu(37.5),\mu(50),\mu(62.5),\mu(75)\}$$

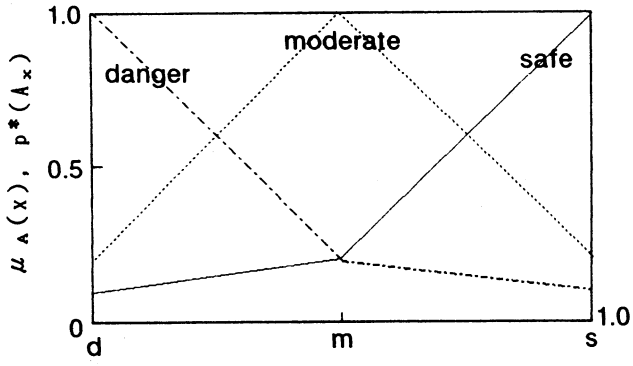
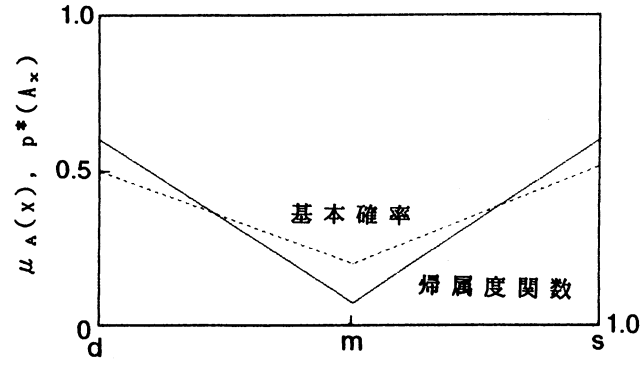


図３　基本確率による３段階評価

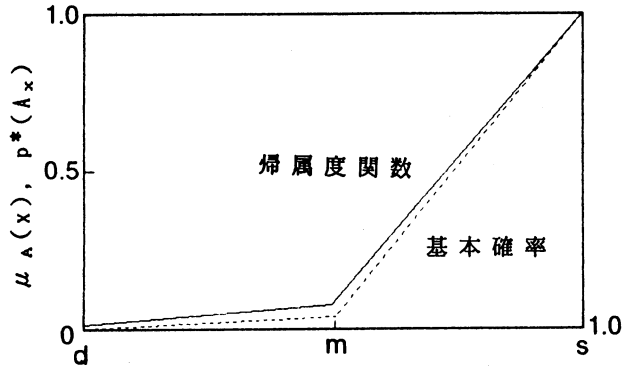
これらの関係を模式的に表したものが図6である。ここで、平均値 x_{ave} が75点より大きい場合は safe に対する上界確率を、25点より小さい場合はdangerに対する上界確率をそれぞれ1.0とする。以下に、簡単のため３要素の場合の基本確率の決定方法を述べる。

基本確率の性質から、次式の関係が得られる。

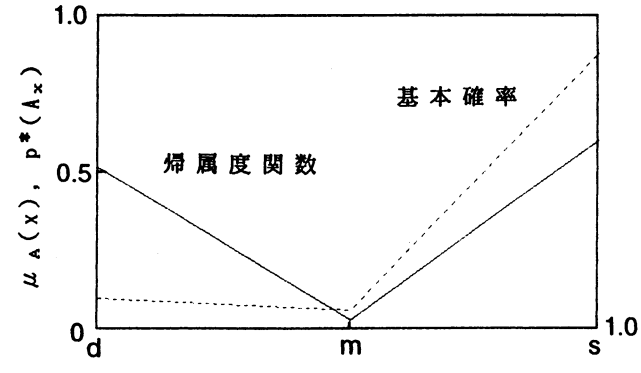
$$m(\{s\})+m(\{s,m\})+m(\{s,m,d\})=p^*(\{s\})$$
$$m(\{m\})+m(\{s,m\})+m(\{m,d\})+m(\{s,m,d\})=p^*(\{m\})$$
$$m(\{d\})+m(\{m,d\})+m(\{s,m,d\})=p^*(\{d\}) \quad (13)$$
$$m(\{s\})+m(\{m\})+m(\{d\})+m(\{s,m\})+m(\{m,d\})$$
$$+m(\{s,m,d\})=1.0$$



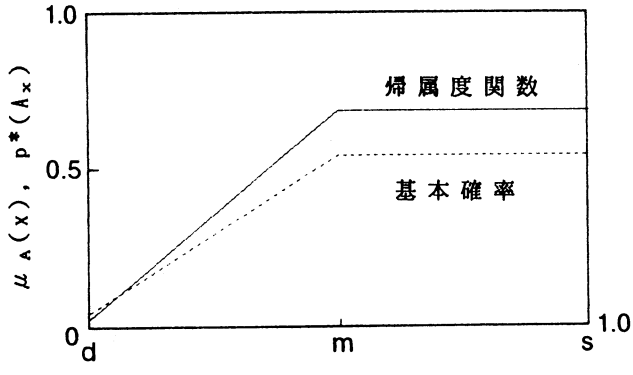
(c) [safe*dang.]



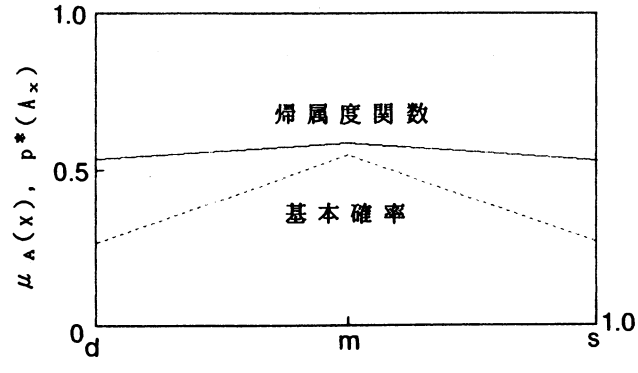
(a) [safe*safe]



(d) [safe*safe*dang.]



(b) [safe*mode.]



(e) [safe*mode.*dang.]

図４　帰属度関数と基本確率による演算結果の比較

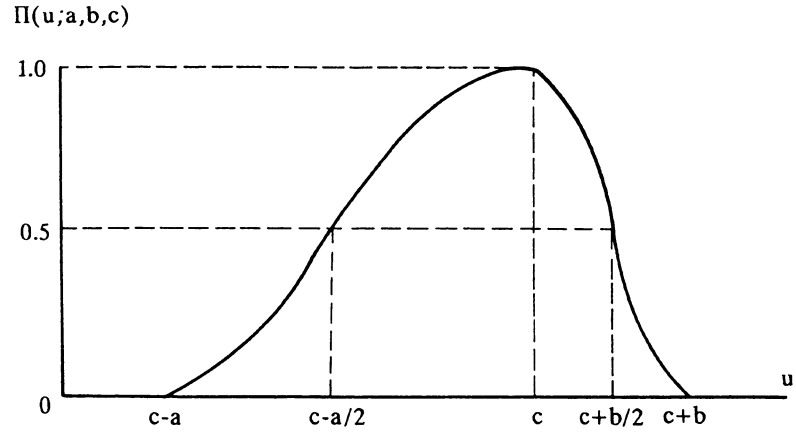


図5　Π関数の概念図

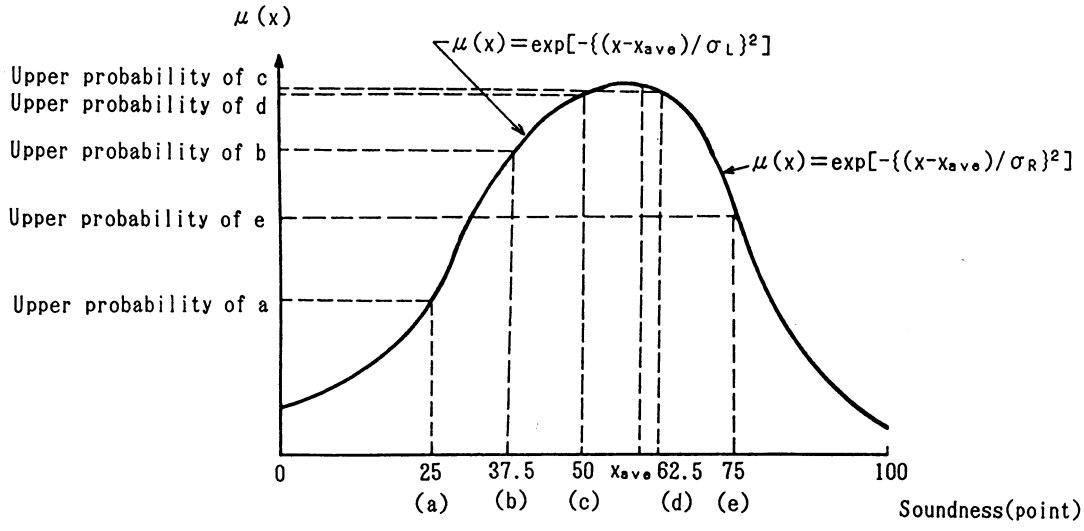


図6　評価結果と上界確率の対応

ここで、各々の基本確率は0～1.0の実数でなければならないので、上式より次の条件が成立する。

$$\max\{0, p^*(\{s\})+p^*(\{d\})-1\} \leqq m(\{s,m,d\}) \leqq \min\{p^*(\{s\}), p^*(\{m\}), p^*(\{d\}), (p^*(\{s\})+p^*(\{m\})+p^*(\{d\})-1)/2\} \quad (14)$$

本研究では、基本確率 $m(\{s,m,d\})$ は、あいまい量が最大になるように式(14)で得られる値の最大値をとるものとする。

$m(\{s,m,d\})$ が求まると、式(13)より次式が得られる。

$$m(\{m\})=1+m(\{s,m,d\})-p^*(\{s\})-p^*(\{d\}) \quad (15)$$

さらに、式(13)より次の条件式が成立する。

$$\begin{aligned}
&\max\{0, p^*(\{m\})-p^*(\{d\})-m(\{m\})\} \leqq m(\{s,m\}) \leqq \min\{p^*(\{s\})-m(\{s,m,d\}), p^*(\{m\})-m(\{m\})-m(\{s,m,d\})\}\\
&\max\{0, p^*(\{m\})-p^*(\{s\})-m(\{m\})\} \leqq m(\{m,d\}) \leqq \min\{p^*(\{d\})-m(\{s,m,d\}), p^*(\{m\})-m(\{m\})-m(\{s,m,d\})\}\\
&\max\{0, 1-p^*(\{m\})-p^*(\{d\})+m(\{s,m,d\})\} \leqq m(\{s\}) \leqq \min\{1-p^*(\{m\}), 1-p^*(\{d\}), p^*(\{s\})-m(\{s,m,d\})\}\\
&\max\{0, 1-p^*(\{s\})-p^*(\{m\})+m(\{s,m,d\})\} \leqq m(\{d\}) \leqq \min\{1-p^*(\{s\}), 1-p^*(\{m\}), p^*(\{d\})-m(\{s,m,d\})\}
\end{aligned} \quad (16)$$

ここで、m({s,m,d}) の場合と同様に m({s,m})、m({m,d}) についても式(16)における最大値をとるように設定すれば、6つの基本確率全てを決定することができる。このようにして求めた基本確率を知識ﾍﾞｰｽ内に蓄積する。

5.3 評価値の算定法

帰属度関数を推論ﾌﾟﾛｾｽに従って、順次結合していくことによって得られる最終的な判定、すなわち評価値を求めるにあたり、safe, slightly safe, moderate, slightly danger, dangerの5種類の状態を、あらかじめ帰属度関数として図7に示すように設定した。そして、評価値は、設定した帰属度関数と最終的な結合結果として得られる帰属度関数との合致度を求めることにより、それぞれの状態に属する確率に準ずる値として出力するものとする。また、評価値に対するあいまい度Fは、前述したﾍﾞｰｸﾞﾈｽ関数$V_A(x)$を基に、次式のように定義した。

$$F = \frac{\sum_x V_A(x)}{21} \quad (x=0,5\cdots100) \qquad (17)$$

ここに、$V_A(x)$は健全度xにおけるﾍﾞｰｸﾞﾈｽ関数、式(17)中の分母21は、最もあいまいさの大きい帰属度関数（全てのxにおいて$\mu_A(x)=0.5$の場合）を想定して、ﾍﾞｰｸﾞﾈｽ関数の最大値（=1.0）を要素Xの数（=21）だけ足し合わせたものである。

次に、基本確率による演算の場合、最終的な判定は、次式により与えられる評価値 $M(a_i)$が最大となるa_iを選ぶことによって実行するものとした。

$$M(a_i) = \sum_{a_i \in A_k} \frac{m(A_k)}{N(A_k)} \quad (i=1,2,\cdots\cdots n) \qquad (18)$$

ここに、$m(A_k)$は、集合A_kに対する基本確率、$N(A_k)$は、集合A_kの要素数。

また、評価値に対するあいまい度Fは、確率質量と移動可能距離の積で表されるﾓｰﾒﾝﾄと考え、次式で与えられるものとした。

$$F = \sum_{A_k} (m(A_k) \cdot s(A_k)) \qquad (19)$$

ここで、$s(A_k)$は、集合A_kに対する基本確率の移動可能距離（$0 \leqq s(A_k) \leqq 1.0$）。

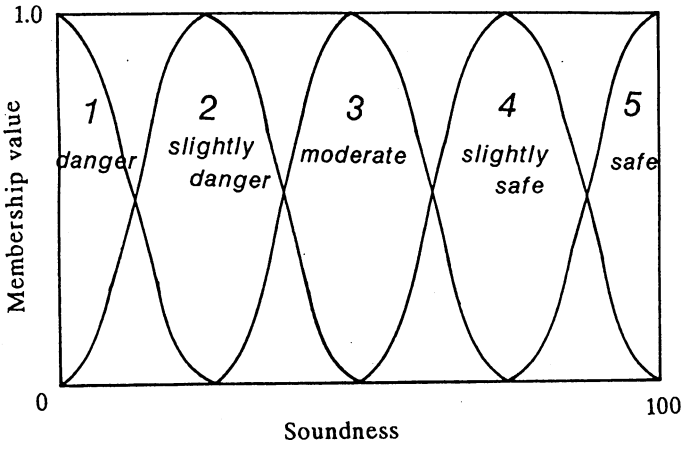


図7　診断用帰属度関数

6．橋梁診断システムの実橋への適用例

ﾌｧｼﾞｨ集合論及び基本確率を用いて開発した診断ｼｽﾃﾑによる実橋[5](RC単純T桁橋)の主桁に対する診断結果の一例を、それぞれ表1，2に示す。これらより、基本確率を用いたｼｽﾃﾑの最終段階での診断結果は、主桁耐荷性、耐久性及び耐用性の評価は、slightly danger=1.0(fuzziness=0.0)という確定値を出力しているのに対し、ﾌｧｼﾞｨ集合論を用いたｼｽﾃﾑではmoderateとslightly dangerをほぼ同程度支持する結果を出力しており、両者の可能性が数値の順に大きいのみならず、他の評価ﾗﾝｸの可能性も考える必要があることがわかる。すなわち、両ｼｽﾃﾑとも、各判定項目に対して割当てられる基本確率あるいは帰属度関数を順次結合して最終診断結果を出力するが、前者のｼｽﾃﾑでは、要因数が増える（上位ｺﾞｰﾙに近づく）に従い、確定した評価値に値が集中していき、そのあいまいさが小さくなるという一見して実用的と考えられる結果が得られるが、あいまいさを含むﾃﾞｰﾀの処理が基本となっているという事実を考慮すると、評価結果が確定値となることに矛盾も感じられる。一方、後者のｼｽﾃﾑの場合、診断結果は複数の可能性があることを示し、ｼｽﾃﾑとして大きな過ちは犯さない傾向があるといえるが、特に、本研究で対象としている橋梁診断のように考慮すべき要因が非常に多い場合は、あいまいさが大きくなりすぎる傾向がみられ、診断結果の信頼性が低くなることも考えられることより、新らたなあいまいさの取扱い法の開発も必要になってくる。

7．あとがき

本研究では、橋梁診断ｼｽﾃﾑ開発において重要となる専門技術者の主観的あいまいさの処理にﾌｧｼﾞｨ集合論及びDempster-Shafer理論を適用し、ほぼ同一の手順に従って構築した診断ｼｽﾃﾑによる最終診断結果を比較することにより、その合理性の検討を行った。その結果、両者の診断結果にはそれぞれの手法に対応した特徴があることがわかった。このように、同じ知識源を用いてもその処理方法により推論結果が異なってくること

表1　帰属度関数を用いた手法による診断結果

	判定項目	平均健全度	danger	slightly danger	moderate	slightly safe	safe	fuzziness
主桁	設計	55.5	0.000	0.180	0.453	0.328	0.039	0.499
	施工	48.0	0.000	0.208	0.663	0.129	0.000	0.154
	供用状態	57.3	0.000	0.026	0.657	0.316	0.000	0.163
	曲げひびわれ	53.4	0.041	0.281	0.299	0.225	0.155	0.655
	せん断ひびわれ	65.1	0.000	0.248	0.233	0.214	0.305	0.373
	鉄筋の腐食ひびわれ	49.7	0.228	0.297	0.000	0.196	0.279	0.423
	主桁の全体的損傷	52.8	0.122	0.258	0.192	0.282	0.146	0.615
	主桁耐荷性	46.1	0.089	0.278	0.378	0.191	0.064	0.499
	主桁耐久性	47.6	0.063	0.325	0.322	0.219	0.070	0.577
	主桁耐用性	47.9	0.042	0.328	0.378	0.194	0.059	0.276
	判定項目	平均余寿命	～10年	10～20年	20～30年	30～40年	40年～	fuzziness
	余寿命	17.5年	0.269	0.357	0.319	0.053	0.002	0.245

表2　基本確率を用いた手法による診断結果

	判定項目	danger	slightly danger	moderate	slightly safe	safe	fuzziness
主桁	設計	0.000	0.026	0.202	0.461	0.312	0.397
	施工	0.004	0.134	0.675	0.175	0.013	0.233
	供用状態	0.000	0.000	0.034	0.455	0.511	0.178
	曲げひびわれ	0.000	0.001	0.147	0.723	0.130	0.083
	せん断ひびわれ	0.000	0.636	0.359	0.004	0.000	0.048
	鉄筋の腐食ひびわれ	0.989	0.011	0.000	0.000	0.000	0.001
	主桁の全体的損傷	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	主桁耐荷性	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	主桁耐久性	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	主桁耐用性	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000

には本質的に問題があると思われるが、今後は、獲得された知識を如何に洗練していくか検討していく必要があると考える。

参考文献

[1]西村 昭、宮本文穂：構造物の損傷度診断の現状、土木学会研究討論会資料、1987.9

[2]石塚 満：Dempster & Shaferの確率理論、電子通信学会誌、Vol.66,No.9、pp.900-903、1983

[3]西村・藤井・宮本・富田：橋梁診断における主観的あいまいさの取扱い、（財）建設工学研究所研究報告、第28号、1986

[4]宮本文穂：疲労・荷重等にかかわる耐久性診断手法、ｺﾝｸﾘｰﾄ工学、Vol.26,No.7、1988

[5]宮本、前田、熊谷、前田：ｺﾝｸﾘｰﾄ橋の安全性評価と補修・補強法の検討、ｺﾝｸﾘｰﾄ工学年次論文報告集、11-2,1989

問い合わせ先：〒657　神戸市灘区六甲台町１－１
神戸大学工学部土木工学教室
宮本　文穂
TEL　(078)881-1212
FAX　(078)861-0779

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SC4-1

ファジィ推論による都市高速道路転換率モデルの作成と検討

Development and Discussion of Diversion Rate Model on Urban Expressway with Fuzzy Reasoning

邵　春福，秋山　孝正，佐佐木　綱
Chunfu SHAO, Takamasa AKIYAMA and Tusna SASAKI
京都大学工学部交通土木工学教室
Department of Transportation Engineering, Kyoto University

Abstract : Fuzzy reasoning is applied to diversion rate model on urban expressway. As the analysis on factors of diversion has been already carried out, its result can be used for construction of the model. First, the basic fuzzy reasoning model is introduced with consideration of reality to actual traffic flow. Second, typical four kinds of implications are investigated comparatively to reveal their features on estimation of diversion rates. Third, min-sum-gravity method and product-sum gravity method are also tried to use as a newly idea to modify the previous methods from the practical point of view.

1．はじめに

ファジィ推論を交通行動の記述に用い、これらを応用的に用いることで交通計画上の問題解決を図ろうとするのが本研究の基本的課題である。特に都市高速道路網計画においては適切な将来交通量の推計が必要不可欠である。このための道路利用者の経路選択行動の解明がひとつの重要な課題である。この問題に対しては従来関数論的かつ統計的なモデル化が用いられてきたが、ここではファジィ推論モデルの導入の可能性を吟味するものである。

まず従来の高速道路の交通現象に関連した調査、分析結果をもとに、経路選択の基本的要因を把握する。つぎに実際の交通量に関する計測データを用いて、転換現象記述のためのファジィ推論モデルを作成する。つぎに推論形式に関して代表的な４種類の演算方法に対して、その記述される判断内容の比較と推論結果の適合性の差異について検討する。この比較結果に加えて、近年提案されている新たなファジィ推論法として、論理積－加算－重心法，代数積－加算－重心法について検討する。最終的には、各方法の有効性と実用性を整理し大規模な道路網を対象とした交通量配分問題への応用を念頭においた考察を行う。

2．都市高速道路転換率モデル

2－1　都市高速道路における交通転換現象

都市高速道路における交通量推計に関して、交通量配分法といわれる道路網交通量の数学的推計モデルが一般的に用いられる。このとき一般道路網と高速道路網といった複数の道路網で全体が構成されるような場合には、各交通量の道路網間分担比率を推計しておく必要がある。これが交通量転換の問題であり、ふつう各ＯＤ交通量（起終点：出発地ゾーン→目的地ゾーンごとの交通量）に対して、全交通量に対する高速道路利用交通量の割合として定義される値を転換率という。

すでに阪神高速道路を対象とした交通現象に関する意識調査を行った研究がある。これは経路選択要因に関する分析をファジィ数量化理論により行い、さらに主要な要因についてファジィ数を用いた意識表現を試みたものである[1)・2)]。こうした研究では、いくつかの行動規定要因を考え、経路選択時の意思決定に関与する主要要因を抽出している。この結果、（ａ）全体的には所要時間、費用、走行性などが重要な要因である。（ｂ）短距離トリップでは費用が重視され、所要時間等がさほど重視されないなどの点が明らかになった。またこれらの要因のうち、経路選択現象の詳細な把握のため、所要時間と費用の関係を考慮しいくつかの変数をファジィ数で表現するための調査を行った。具体的には「時間評価値」「単位距離料金」についてファジィ数表現を行った。以上のような、高速道路の交通転換現象に対する基本的な分析結果はファジィ推論を用いたモデル構築に際して重要な資料となるものである。

2－2　ファジィ推論による転換率推計モデル

ここでは、実際の高速道路転換率モデルの作成についてのべる。基本的な推論モデルとしてはいわゆる「ファジィ制御」のモデル形式を用いている。具体的なモデル作成手順は図－１に示すようである。このような手順により経路選択現象のモデル化に有効な推論方法が得られるものと考えた。したがって、まず従来から一般的に用いられているファジィ推論である Mamdani法を用いることによって、基本的なモデル形式（変数、関数形状、ルール群など）を決定した。以下ではこの際に特に経路選択現象の記述にあたり重要と考えられた諸点を示す。

（１）対象地域

ここでは近畿地区の主要道路網を対象とする。交通量推計のため121 ゾーンに分割し、全ＯＤ交通量と都市高速道

路分担交通量を従来のＯＤ調査に基づいて作成した。さらにこのうちランダムに 100個のＯＤペアを抽出し、実績転換率を求めている。したがって以下の推計モデルではこのデータを基本とする。

（２）説明変数

転換現象記述をモデル化する際の説明変数として、①時間差（一般道路の利用時間t_s と高速道路の利用時間t_h との差［$t_s - t_h$］）、②単位距離料金（料金／高速道路利用距離）、③ＯＤ距離（経路上の算出距離）を考えた。これらはさきに示した従来の調査・分析結果に基づいて、抽出・定義したものである[1),2)]。以下では、これらの変数に基づき構成される。ファジィ推論を用いて、各要因と転換率の相互関係を記述することでモデル化を行う。

（３）メンバシップ関数

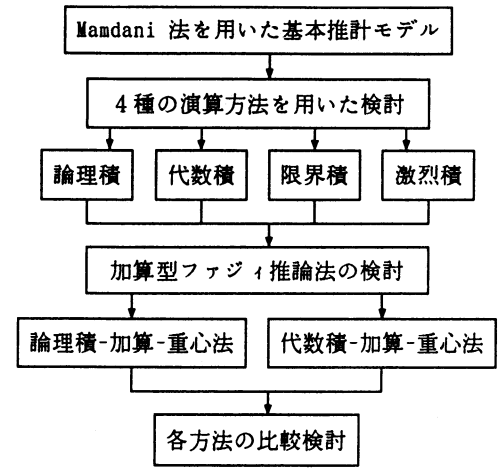
推論における各々のファジィ数を定義した。①「時間差」x_1は図－２に示すような５種類のファジィ数を用いる。②「単位距離料金」はすでに調査結果が報告されているように[1)]、多段階的な判断が難しい要因である。ここでは簡単のため従来の調査結果として得られた図－３の「大」「中」「小」を利用する。③「ＯＤ距離」は短距離の際のルール化を検討するが図－４のように７kmから徐々にＯＤ距離が「短い」と認識されるものとした。さらに推計される量である「転換率」については図－５に示す５種類の標準関数によって表現することにした。

（４）推論ルールの構成

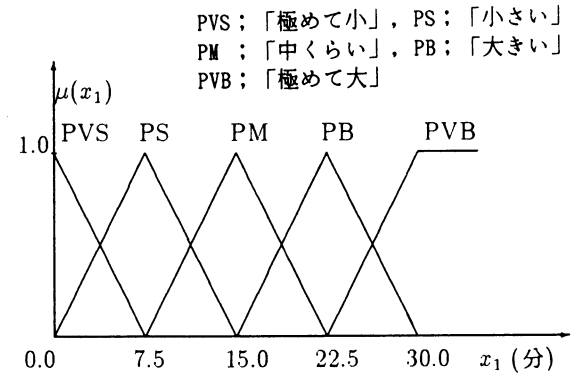
推論ルールは、若干のデータとの適合性の検討から図－６のように構成した。主要となる意思決定ルールはＲ－２～Ｒ－10である。この部分は時間差（５種）と単位距離料金（３種）に関連した経路選択判断を記述したものである。基本的な性質として「時間差が大きいほど」また「単位距離料金が小さいほど」高速道路の利用率（転換率）が大きくなることを表現したものである。ここでＲ－１は上記の「時間差」「単位距離料金」に関与しないルールとして、ＯＤ距離が「短い」場合の判断を記述したものである。すなわち、近距離の移動を行う場合には、道路利用者は高速道路の利用を考慮することなく、一般道路を利用する（いわゆるcaptive な選択）ことを示したものである。

（５）基本となる推論法

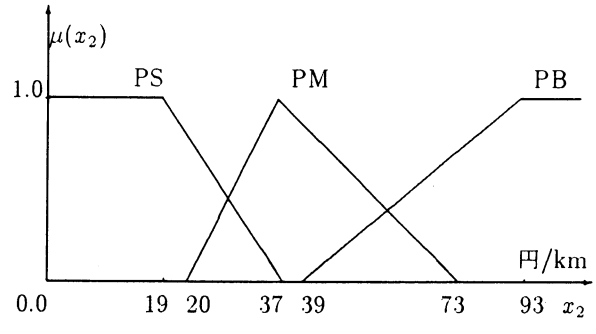
本研究のモデルの基本となる推論法は、 Mamdani法によるファジィ推論を用いた。したがって、前件部の積演算および後件部の合成演算にはmin を用いるとともに、ルールごとに得られる後件部ファジィ集合の和集合（ max）をとる。最終的に重心値をもって推計転換率値とする。いわゆる、min-max-gravity 法を用いている。以下の検討においては、このモデルタイプを基本として議論する。



図－１　転換率推論モデルの検討手順



図－２　時間差のメンバシップ関数



図－３　単位距離料金のメンバシップ関数

３．各種演算方法とその比較

３－１　ファジィ推論の演算方法

ファジィ推論モデルを構築するとき、人間判断の記述形式で最も重要となるのは演算方法である。したがって、ここでは演算方法について中心的に比較検討を行う。具体的には実際のデータを用いた計算を実行し各方法での推計結果比較を行う。典型的なt-normとして以下のものを用いる。

1)論理積：$x \wedge y = \min\{x, y\}$　　(1)

2)代数積：$x \cdot y = x \times y$ (2)

3)限界積：$x \odot y = 0 \vee (x + y - 1)$ (3)

4)激烈積：$x \wedge y = \begin{cases} x \cdots y = 1 \\ y \cdots x = 1 \\ 0 \cdots x,\ y < 1 \end{cases}$ (4)

「論理積」は上記の Mamdani法で用いられる方法で、演算が単純であることからファジィ制御等で一般的に利用される方法である。しかし後件部の上限が限定される（min をとる）ことの合理的解釈が難しい。前件部の適合性を後件部の信頼度の上限とする単純な推論であるとえる。「代数積」は相似的に後件部の全情報を考慮できる。この点後件部の適合性は相対的に保存され論理的合理性のよい記述ができる。しかし、交通量転換率現象のモデリングを考えると、利用者が常に「ファジィ数」全体を意識している形の演算を仮定することは必ずしも妥当ではなく、いずれが有効かを単純には結論づけれない。

「限界積」および「激烈積」はさきの２方法と比べ、比較的クリスプ判断に近い方法であるといえる。すなわち特定の条件が成立した場合のみ転換率を考える形である。ここでは人間行動をモデル化する場合であるので、このような特定条件を生かした形の推計方法も（人間が一部の情報のみで判断を行うという点では）有効であるかもしれない。

３－２　各方法による推計結果とその考察

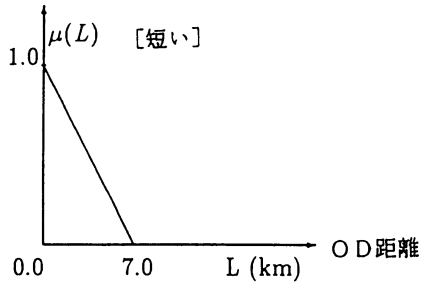
各含意公式を用いた場合の推計値と実績値の適合性を考察する。各推論モデルでは上記４種の推論方法に加えて、ファジィ数設定の影響も考慮するため「時間差」メンバシップ関数を３ケース設定した。各三角型の底辺を15分とした場合（ケース１：図－２の設定）、12分（ケース２）、９分（ケース３）とした。またファジィ推論は含意公式の変更以外は、基本モデルと同様である。（つまり前件部は積演算、後件部の確定値は重心により求める。）

各ケースのモデル適合性を推計値と実績値の相関係数として表－１に示す。相関係数から見る限り各方法の差異はさほどないことかわかる。

またどの方法についてもケース１の相関係数が最も高い。この結果から、この３ケースでは「時間差」ファジィ数の重なりが大きいほど適合性が向上することがわかる。

また各方法の結果（ケース１）をそれぞれ抽出し、推計値と実績値との関係を示したものが図－７である。「論理積」では、各点は対角線よりやや下部に多く分布し、若干過小推計となる。これに対し「限界積」と「激烈積」では比較的均等に分布していることがわかる。

以上のように、相関は同程度と考えれば、解釈の容易な「論理積」「代数積」を用いることの有効性は高い。しかし、推計値の相関だけでなく誤差分布も考慮すると「限界積」「限界積」の利用可能性も認められる。

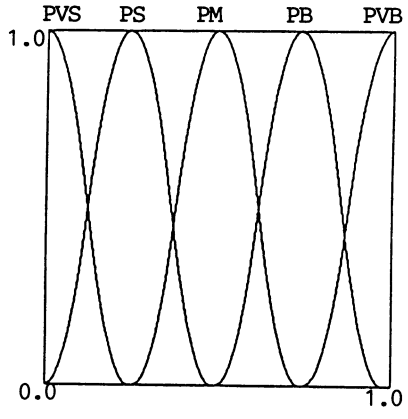


図－４　ＯＤ距離のメンバシップ関数

R-1 : IF L IS PS, THEN Y IS PVS
R-2 : IF X_1 IS PVS, THEN Y IS PVS
R-3 : IF X_1 IS PS and X_2 IS PS, THEN Y IS PM
R-4 : IF X_1 IS PS and X_2 IS PM, THEN Y IS PS
R-5 : IF X_1 IS PS and X_2 IS PB, THEN Y IS PS
R-6 : IF X_1 IS PM, THEN Y IS PM
R-7 : IF X_1 IS PB and X_2 IS PS, THEN Y IS PB
R-8 : IF X_1 IS PB and X_2 IS PM, THEN Y IS PB
R-9 : IF X_1 IS PB and X_2 IS PB, THEN Y IS PM
R-10 : IF X_1 IS PVB, THEN Y IS PVB

注）Ｌ；ＯＤ距離

図－５　転換率のメンバシップ関数



図－６　転換率モデルの推論ルール

表－１　各推論方法による推計結果(相関係数)

	論理積	代数積	限界積	激烈積
ケース１	0.844	0.837	0.838	0.841
ケース２	0.830	0.831	0.820	0.822
ケース３	0.825	0.830	0.818	0.820

４．ファジィ推論法によるモデル改善

４－１　加算型のファジィ推論法

４種類の典型的なファジィ推論法について検討し、判断解釈・実用的利用の点からその長所・短所を示した。ここでは後件部に加算を行うファジィ推論法「論理積－加算－重心法」（min-sum-gravity）と「代数積－加算－重心法」

（product-sum-garvity） を用いて検討する。これらは近年、水本[3]により推奨されている推論方法である。以下では、これらをMSG法、PSG法と表すことにする。

これらの方法では複数の推論が成立した場合に後件部で和集合（max)をとる従来法に比べて、これを加算(sum）する点から、人間の認知判断の記述の点からは、より合理的な推論であると解釈される[3]。

4－2　実用性に関する検討

ここでは「時間差」をさきに得られた形とし（ケース1に対応して）、2方法による転換率推計を行った。推計値と実績値との相関を図－8に示す。図中に示すように相関係数はそれぞれ0.846、0.849であり、若干前述の各方法と比べて推計精度が向上している。また推計値の散布形状から見ると、MSG法 では対角線の下部領域に点が多く、全体に過小評価となっている。この点は前述の「論理積」と似ている。またPSG法 では過大・過小評価部分が同程度であり転換率推計上のバランスもよいといえる。

以上の結果から、ここで示した2方法に関しては、 PSG法が他方法と比べて直観にも合致した演算であり、またモデル適合性も向上することがわかった。したがって、後件部に加算を実行するPSG法 は今後ファジィ推論による転換率モデルの実用的改良を考える上で有効な方法であるといえる。

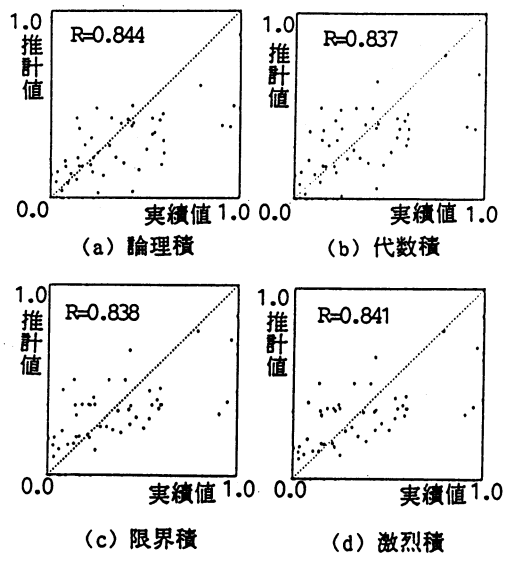
5．おわりに

本研究では、従来の調査・分析結果に基づき都市高速道路転換率モデルをファジィ推論により作成した。つぎに、演算の実用的・理論的整理と推計結果の傾向を検討した。また基本的演算の他に、ＭＳＧ法、ＰＳＧ法を用いて新たな推論モデル構築に関する検討を行った。この結果以下のような結論が得られた。

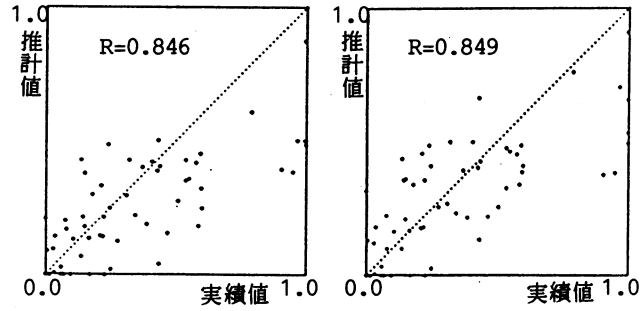
①ファジィ推論による都市高速道路転換率モデルは、この問題に従来からよく用いられる関数式モデルと比べて構造が比較的明解で頑健性に富むモデルとなることがわかった。

②ファジィ推論の基本的４種について、転換率モデル作成上の解釈、実用性から比較検討を行った。推計上は各方法に大きな相違はみられず、モデル解釈の容易性からは「論理積」「代数積」などの利用が有効であるといえることがわかった。

③「論理積－加算－重心法」と「代数積－加算－重心法」は含意に従来の「論理積」と「代数積」を用いる点は同様であるが、ルール統合の点で加算を実行する新しいモデル化となっている。転換率モデルではこれらの利用がモデルの適合性を向上させているといえる。この点、今後のさらに実用的な転換率モデルを作成についての方向性を示唆するものである。



図－7　各方法による転換率推計結果



図－8　ＭＳＧ法・ＰＳＧ法による転換率推計結果

【参考文献】

1）秋山孝正・佐佐木綱・宇野伸宏・有倉陽司：ファジィ理論を用いた交通経路選択に関する分析，第５回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.325-330，1989.

2）秋山孝正・佐佐木綱・有倉陽司：ファジィ推論を用いた都市高速道路転換率モデル，土木計画学研究・論文集，No.７，pp.259-266，1989.

3）水本雅晴：わかりやすいファジィ理論Ⅲ－ファジィ推論とファジィ制御，コンピュートロール，No.28，pp.32-45,1989.

問い合わせ先：〒606 京都市左京区吉田本町
京都大学工学部交通土木工学教室
邵　春福
TEL.075-753-5123，FAX.075-753-5916

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SC4-2

ＦＥＭのための要素自動分割へのファジィ理論の応用

Automatic Grid Network Generation for FEM by Fuzzy Theory

吉川 徳重　　近岡 秀男　　本田 修一郎　　佐野 学　　田中 一男

Tokushige YOSHIKAWA, Hideo CHIKAOKA, Shuichirou HONDA, Manabu SANO, Kazuo TANAKA

金沢大学工学部

Faculty of Engineering, Kanazawa University

This report discusses automatic grid network generation for FEM by fuzzy theory. Dividing operations of elements consist of two processes , macro-division and micro-division. In macro-division process, analized region is divided into square sub-regions(macro-elements). Among them, elements that should be subdivided are determined by estimation of boundary complexity and stress concentration and so on . In sub-division process , these extracted elements are subdivided by fuzzy reasoning.

１．はじめに

ＦＥＭ（有限要素法）[1)2)]は，解析の対象となるモデル（領域）を三角形や四角形などの部分要素に分割し，剛性方程式を基礎方程式としてマトリクス計算を行い，荷重など外力が付加された場合の要素節点での変位を求め，物体の変形などの物理現象を解析する数値計算手法である．近年，このＦＥＭをＣＡＤシステムの一部に組み込もうとする試みが数多くなされるようになり，それに伴って対象とするモデルを要素に自動分割する手法の研究も盛んになってきている[3)4)]．しかし，実際には要素分割の手法は，対象となる物理現象とＦＥＭ解析との両方に精通した熟練者が試行錯誤的に行っている場合が多く，完全な自動化に至っていないのが現状である．

ＦＥＭの要素自動分割に関しては，次の二つの作業を行わなければならない．一つは，対象とする領域内のどの部分を細分化すべきかという細分化領域を特定する作業，もう一つは，細分化すべき要素の特異性を分別し，その特異性に対応するように細分割をする作業である．前者は，いわゆるエキスパートの知識に依存する作業であり，その自動化はここでは行っていない．本研究では，自動分割の第１段階として，後者の特異性のうち幾何学的なものを基に細分割を行う操作部にファジィ推論を取り入れた．また，解析の対象とする領域は，簡単のため二次元の場合に限定している．

２．要素分割のプロセス

要素分割のプロセスは，大きく分けて以下に説明するように解析対象領域を長方形格子に分割するマクロ分割のプロセス，その長方形領域のうち細分化すべき部分領域を抽出するプロセス，および，それらを細分割するミクロ分割の３つのプロセスから構成されている．

（マクロ分割）

あらかじめ設定された総要素数を基に，解析対象領域をｍ×ｎ（ｍ，ｎはともに任意の自然数）の長方形メッシュに分割する．このとき作られた長方形部分領域をマクロ要素と呼ぶことにする．本研究ではｍ＝ｎとした．

（ミクロ分割する要素の抽出）

マクロ要素のうち，応力集中[5)]が予想される外形（境界）の形状変化の大きい部分や内部孔等を含み，細分割が必要であるマクロ要素を抽出する．

（ミクロ分割）

さらに，次節で述べるように，ファジィ理論を用いてマクロ要素をファジィ理論を用いてマクロ要素を三角形要素に細分割する．この操作をミクロ分割と呼び，このようにして分割された三角形要素をミクロ要素と呼ぶ．

解析の対象とするモデルの一例として，図１に示すような，角部と円を含む場合を考えることにする．まず，マクロ分割を行う．図２は，この領域をｍ＝ｎ＝６で正方形メッシュに分割した結果である．また，図中の網掛けされた部分が細分割すべき領域を表している．

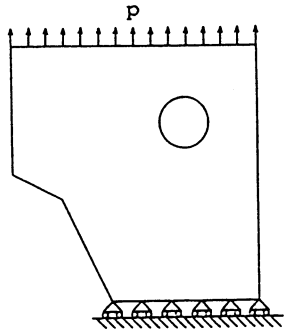


図1　解析モデル

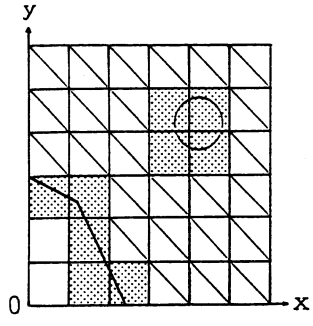


図2　マクロ分割

3．要素のミクロ分割

本研究では，幾何学的特異性のみに着目して細分化すべき領域を特定しているので，実際にミクロ分割を行うのは，マクロ要素内に形状変化の大きい境界を含むような場合に限定される．この様な場合は，大きく分けて角部とそれに隣接する領域が含まれる場合と，内部孔などに代表される曲線が含まれる場合である．

細分割の作業は上記のいずれの場合についても同様で，マクロ要素内に1つの点を追加し，その点と既に決定している既存の節点とを結ぶことによりミクロ要素に細分割するものである．この付加節点の位置を決定する際にファジィ推論を用いている．このときに使用するメンバーシップ関数，ルール，推論法は以下のようなものである．

（メンバーシップ関数とルール）

図3，4，5にファジィ推論に用いるメンバーシップ関数を示す．また，表1，2にルールテーブルを示す．図中の変数の定義とラベルの意味は以下のようなものである．

Rs：マクロ要素の面積のうち，モデルが占める割合

θ：マクロ要素内の境界に角部が存在する場合，角部の内角の大きさ

Rr：曲線が存在する場合，マクロ要素の一辺の長さに対する曲率半径rの割合

VS＝Very　Small
S＝Small
M＝Medium
B＝Big
VB＝Very　Big

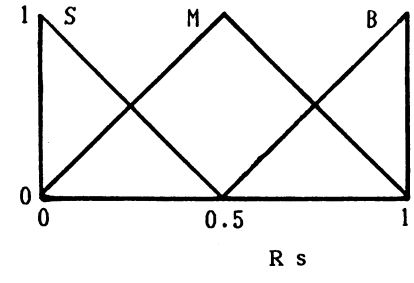


図3　Rsのメンバーシップ関数

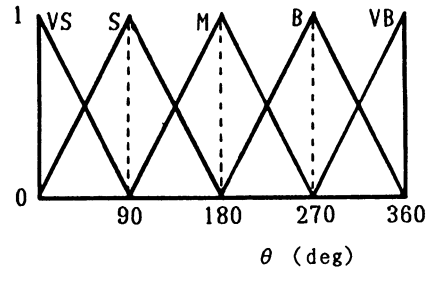


図4　θのメンバーシップ関数

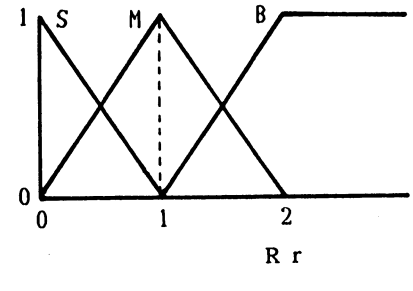


図5　Rrのメンバーシップ関数

表1　ルールテーブル

（Rs，θ）

θ ＼ Rs	S	M	B
VS	3/4	1/2	1/2
S	1	1/2	1/2
M	1	1/2	1/4
B	1	3/4	1/2
VB	1	1	1

表2　ルールテーブル

（Rs，Rr）

Rr ＼ Rs	S	M	B
S	1	1	1/2
M	1	3/4	3/8
B	1	1/2	1/4

（推論法）

本研究で用いた推論法は，重み付き平均法を用いた簡略化法である．いま，i番目のルールの適合度をωi，後件部のファジィシングルトン（実数）をfiとするとき，推論結果aは以下の式によって決定される．

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{k} \omega_i f_i}{\sum \omega_i}$$

k：ルール数

以下，角部を含む場合と曲線部を含む場合に分けて，具体的に前掲の図1の場合を対照しながら説明する．

（角部を含む場合）

まず，マクロ要素内に直線，および，角点がある場合は，Rsとθの2つを前件部変数としたファジィ推論を行ない，aの値を求める．

次に，図6，7のようにマクロ要素内に角部が存在する場合は，モデルの角部Aと角点Bとを結び，その線分AB上にAC：CB＝a：（1－a）となるような点Cを設定する．そして，この点CとB以外の角点とを結ぶことによってミクロ分割を行う．

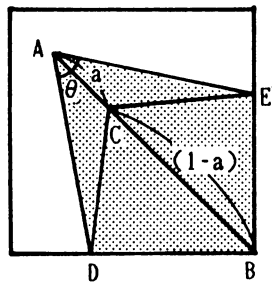


図6　角部（鋭角）を含む場合

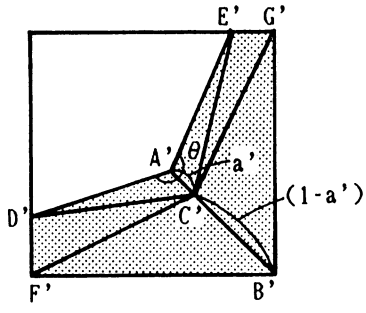


図7　角部（鈍角）を含む場合

図8のようにマクロ要素内の外形線が直線の場合は，直線をθ＝180°の角部としてファジィ推論を行いaの値を求め，角部の代わりに直線DEの中点をAとし，角部が存在する場合と同様にミクロ分割を行う．

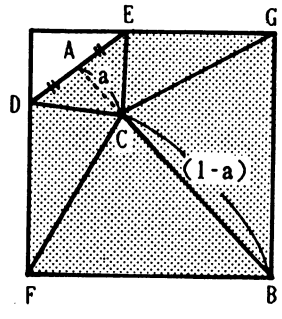


図8　外形線が直線の場合

（曲線を含む場合）

曲線を含む場合を一般的に取り扱うことは難しいので，本研究では，その第１段階として円がある場合のみを細分割の対象とした．

角部を含む場合と同様に，まず，ＲｓとＲｒの２つを前件部変数とし，ファジィ推論によってａの値を求める．

図９は内部円を含む場合を表したものであるが，考え方は直線の場合と同様である．ただし，直線の場合は外形線上の中点より対角線を引いたが，円の場合は円の中心から対角線を引くことにする．同図中の点Ｏは円の中心である．また，点Ａはその対角線と円弧との交点とする．そして，角部が存在する場合と同様にミクロ分割を行う．

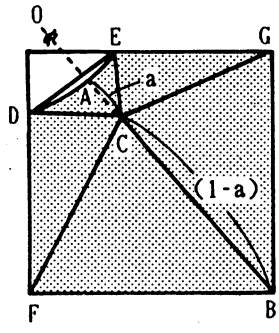


図９　曲率部を含む場合

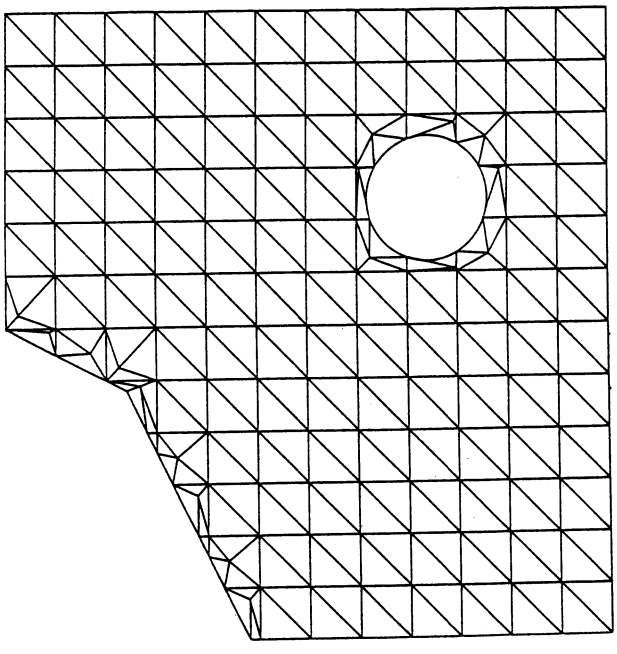


図10　要素分割例

４．要素分割例

図10 にｍ＝12，ｎ＝12で，要素数 296，節点数 175のときの要素分割例を示す．

５．おわりに

本研究は，あくまでも要素の幾何学的な特異性のみに着目した細分割過程においてファジィ推論を応用することを目的とした．そのためマクロ分割のプロセスにおける分割法はできるだけ簡潔なものとなるようにした．その結果，ＦＥＭにおける通常の分割と比較するとかなり不十分な結果しか得られない．例として示したモデルの内部円近傍の要素分割などを見ても，極めてお粗末としかいいようのない結果しか得られていないというのが現状である．

本研究で採用したように，まず，全体を粗く切った後，問題となる領域のみを更に細分割するという要素分割のプロセスをマクロ，ミクロの二つに分ける手法は，ＦＥＭに対する自動分割法としてはあまり適当でないように考えられる．今後，細分化領域を特定する作業（これもファジィ理論により行うことが可能と思われる．）の自動化を含めて，要素分割過程全体を一つのプロセスとして構成することを考えなければならない．

参考文献

１）鷲津久一郎・他：有限要素法ハンドブック，(1981)，培風館．

２）Zienkiewicz：The Finite Element Method (in Structural and Continuum Mechanics)，(1967)，McGrawhill．

３）横山政明：有限要素解析のための自動分割技法，精密機械，48-12，(1982)，1664/1671．

４）尾田十八・山崎光悦：有限要素自動分割法の現状とその利用法(1)，(2)，(3)，機械の研究，37-6，704/708，37-7，835/840，37-8，935/939，(1985)．

５）西田正孝：応力集中，(1984)，森北出版．

問い合わせ先

〒920　金沢市小立野2-40-20
金沢大学工学部機械システム工学科
佐野　学
TEL　0762-61-2101 EXT.263
FAX　0762-63-3849

SC4-3

トンネル施工実績に基づくファジィ岩盤分類基準式
A FUZZY ROCK MASS CLASSIFICATION SYSTEM FOR TUNNEL CONSTRUCTION

鈴木昌次* 古川浩平** 古田 均*** 井上洋司**** 中川浩二**
Shoji SUZUKI, Kohei FURUKAWA, Hitoshi FURUTA, Hiroshi INOUE and Koji NAKAGAWA

*山口大学 工学部（現・（株）大本組 技術研究所）
Eng. Res. Inst. Ohmoto-Gumi Co.,Ltd.
**山口大学 工学部
Faculty of Eng. YAMAGUCHI Univ.
***京都大学 工学部
Faculty of Eng. KYOTO Univ.
****日本道路公団 広島建設局
Hiroshima Construction Bureau J.H.P.C.

ABSTRACT

In this paper, an attempt is made to apply the fuzzy sets theory to the rock mass classification of granite tunnels. By using the fuzzy regression analysis, it is possible to develop an simplified equation to classify rock masses, which can be applied to a tunnel face under construction. Each classified region derived from the proposed equation has sectional and continuous values with possibility distribution. The adequacy of the equation in rock engineering, the comparison with the usual statistical approach and the results of questionnaire are discussed.

1. はじめに

トンネルにおける岩盤分類は設計、施工に影響を与える岩盤の性質を等級に分類し、各々の岩盤に対応した合理的な設計、施工を行うことを目的とする[1]。岩盤分類法は、従来から多くの提案がなされ実用に供せられている[2]が、岩盤分類は風化程度、割れ目状況といった定量的計測の極めて困難な評価指標を必要とするため、主として定性的な記述によらざるを得なかった。この結果、岩盤分類は判定を行う技術者の主観に多くを依存してきた。現状のトンネル施工においては技術者が地山状況、切羽の目視観察、従前の施工経験等を踏まえて上記の定性的な岩盤分類基準のもとに岩質判定を行っている。

本研究ではトンネル施工中の切羽における岩質判定は地山分類基準と技術者の経験に基づく主観を中心として構成されるファジィシステムであると考える。その上で実際の施工中に行われた岩質判定から可能性線形回帰モデルにより上記システムを同定し、定量的な岩盤分類基準式を提案する。さらに、提案式の工学的妥当性を示し、従来の統計手法および技術者に対するアンケート調査結果との比較において有効性を示す。

2. 可能性線形システムの同定

日本道路公団では、従来からトンネル施工において坑内観察を統一様式で行っている。その中で、図-1に示す切羽観察記録表は圧縮強度、風化変質等の切羽状況を示す9項目に対し、岩盤工学上良好な状態から不良な状態へ1～4段階の評価を行っている。また、岩盤等級は通常A～Dの4段階で定義している[3]。実際の施工においては、切

Ⓐ	切羽の肌の状態	1. 安定	2. 鏡面から岩塊が抜け落ちる	3. 鏡面の押出しを生じる	4. 鏡面は自立せず崩れあるいは流出
Ⓑ	素掘面の状態	1. 自立（普請不要）	2. 時間がたつと緩み肌落ちする（後普請）	3. 自立困難掘削後早期に支保する（先普請）	4. 掘削に先行して山を受けておく必要がある
Ⓒ	圧縮強度	1. $\sigma_c \geq 1000$ kgf/cm²ハンマー打撃はね返る	2. $1000 > \sigma_c \geq 200$ ハンマー打撃でくだける	3. $200 > \sigma_c \geq 50$ 軽い打撃でくだける	4. 50 kgf/cm²$> \sigma_c$ ハンマー刃先くい込む
Ⓓ	風化変質	1. なし・健全	2. 岩目に沿って変色，強度やや低下	3. 全体に変色，強度相当に低下	4. 土砂状，粘土状，破砕，当初より未固結
Ⓔ	割れ目の頻度	1. 間隔 $d \geq 1$m	2. $1\text{m} > d \geq 20$cm	3. $20\text{cm} > d \geq 5$cm	4. $5\text{cm} > d$ 破砕，当初より未固結
Ⓕ	割れ目の状態	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土をはさむ，当初より未固結
Ⓖ	割れ目の形態	1. ランダム方形	2. 柱状	3. 層状，片状，板状	4. 土砂状，細片状 当初より未固結
Ⓗ	湧水	1. なし，湿水程度	2. 滴水程度	3. 集中湧水	4. 全面湧水
Ⓘ	水による劣化	1. なし	2. 緩みを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊・流出

図-1 切羽観察記録表

羽観察記録及びその他の状況を考慮して専門技術者が日本道路公団の定める地山分類に基づき岩盤等級を判定し、判定結果を岩質判定記録に記載している。ここでは、岩盤の挙動は岩種によって異なり、Ⓐ～Ⓘの各項目評価が岩質判定結果に及ぼす影響は同一ではないと考え、広島型花崗岩地山に施工されたトンネルにおける切羽観察記録と岩質判定記録に基づいた可能性線形システムの同定を行った。入力を切羽観察記録、出力を予測岩盤等級とする可能性線形システムは、式(1)のように表せる。

$$Y_i = A_0 + A_A X_A + A_B X_B + A_C X_C + A_D X_D + A_E X_E + A_F X_F + A_G X_G + A_H X_H + A_I X_I \quad (1)$$

ここで、$X_A, X_B, \cdots, X_I$は切羽観察項目Ⓐ～Ⓘの評価ランク(1～4)である。係数$A_0, A_A, \cdots, A_I$は可能性分布関数であり、図-2、式(2)に与えられる対称な三角形ファジィ数を採用する。式(2)において、β_jは中心、C_jは可能性の幅を与

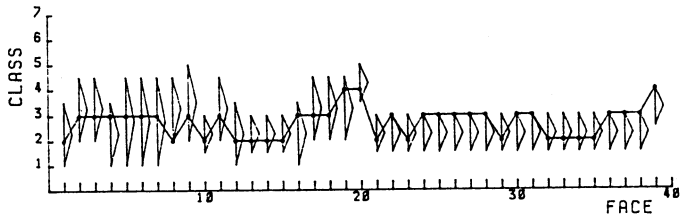


図-3　aトンネルの岩盤分類基準値

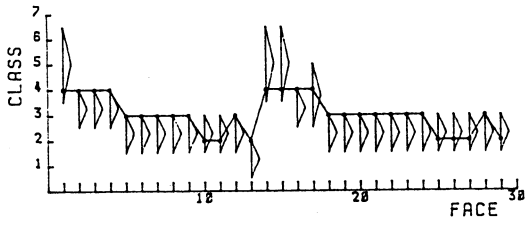


図-4　bトンネルの岩盤分類基準値

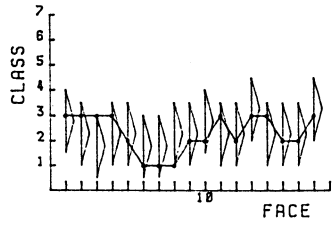


図-5　cトンネルの岩盤分類基準値

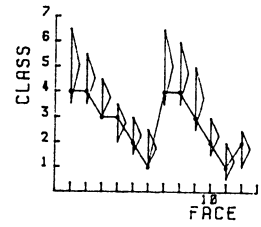


図-6　dトンネルの岩盤分類基準値

えるものである。式(1)のY_iは出力ファジィ数であり、同様に式(3)で与えられる。ここに、Nはデータ数である。

$$A_j=(\beta_j, C_j) \tag{2}$$

$$Y_i=(\sum_j \beta_j{}^t X_{ij}、\sum_j C_j{}^t\,|\,X_{ij}\,|\,) \tag{3}$$

$i=1,2,\cdots,N \quad j=A,B,\cdots,I$

可能性線形システムはファジィ回帰モデルで同定できる。ファジィ回帰モデルでは観測値y_iと式(1)の出力Y_iとの差をシステム構造自体のあいまいさであると仮定し、線形システムの係数である可能性分布に依存すると考える。そこで、観測値y_iがシステムの出力ファジィ数に可能性レベルh（$0\leqq h\leqq 1$）以上で含まれるようにA_jを決定する。hは出力ファジィ数の幅を決定し、hが大きい程、予測値の幅は広がりシステムのあいまいさが大きくなる。レベルhでの予測ファジィ数Y_iのメンバーシップ関数は式(4)で表せる。なお、y_iは日本道路公団の標記A～Dを1～4の実数値に対応させている。

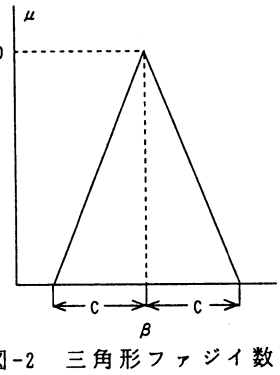


図-2　三角形ファジィ数

$$1-|\,(y_i-X_i{}^t\beta)/(C^t\,|\,X_i\,|\,)\,|\,\geqq h \tag{4}$$

式(1)のA_jは、式(4)の条件下で、出力ファジィ数の幅を最小化して求められ、次式の線形計画問題に帰着する。

$$\min\sum_{i=1}^{N} C^t X_i \quad \text{subject to} \tag{5}$$

$$(1-h)C^tX_i+X_i{}^t\beta\geqq y_i,\ (1-h)C^tX_i-X_i{}^t\beta\geqq -y_i$$

$$X_i=(X_A, X_B, X_C, X_D, X_E, X_F, X_G, X_H, X_I)^t$$

y_i：施工時の岩盤等級判定結果

本研究では4トンネルにおける計97切羽での切羽観察記録をデータとして用いた。なお、本研究においてはメンバーシップ関数が限界値を含めて正の値にあれば良いとして扱いh=0とした。同定の結果を式(6)に示す。

$$Y=(1.,0.)X_D+(.25,.25)X_G+(0.,.5)X_I \tag{6}$$

図-3～6は式(6)を用いたときの各トンネルにおける予測値である。図中の黒丸は施工中に専門技術者により判定された岩盤等級を示す。予測岩盤等級はファジィ数であるので、下限値、中心値、上限値で与えられる。例えば、図-4の切羽番号10での予測値は下限値=1.5、中心値=2.25、上限値=3.0である。これは、日本道路公団の段階式等級に従って表現すれば「B等級からC等級の間であるが、B等級の可能性が大きい」という分類を与えている。ただし、前述のように解析においては岩盤等級A～Dを1～4の数値に対応させている。このため、解析上は予測値の幅も含めて5以上の等級を与える事もあるが、これらはD等級と判定される切羽の中でも特に劣悪な状態にあるものと解釈できる。

3．　可能性線形システムの工学的評価

ここでは、式(6)に採用された切羽観察項目と可能性分布に関して工学的見地からの考察を加える。式(6)より、花崗岩トンネルの岩盤分類を支配する可能性線形システムは、風化変質Ⓓ、割れ目の形態Ⓖ、水による劣化①によって構成される。可能性分布関数については図-1の内容との検討を行うとその意味が明解である。まず、Ⓓ項目の係数A_Dの中心は1.0であり、トンネルにおける岩盤分類を切羽の自立性の観点から考えたとき、岩盤強度を表す代表項目の評価値で等級がほぼ決定されていると考えることは可能である。同様にⒼ項目の係数A_Gが(0.25,0.25)となっているのは、割れ目は岩盤強度を表す重要な要因ではあるが、亀裂が発達していても岩盤自身が強固で十分な自立性を有する場合もあり、分類を決定的にするものでは無いことを示す。また、①項目は、岩盤本来の工学的強度を表すものではないが岩盤の状況によっては切羽の自立性を左右する決定的な要因ともなり得る。このため比較的大きな可能性としてシステムに取り込むことは妥当であると考えられる。なお、割れ目の性状は、支保の軽重に大きな影響を与え、湧水は施工全般にわたって影響を及ぼすことから、可能性分布における中心は岩盤本来の強度を表し、幅は評価のあいまいさと施工性に及ぼす影響を表すと考えられる。

4．　従来の統計解析手法による予測式との比較

本文で提案した岩盤分類基準式との比較のために従来から多く行われてきた統計解析手法による分析を行った。統計手法による予測値はクリスプ値であるが、可能性線形システムは可能性の幅と度合を含んだ形で岩盤等級を与える。この点で直接の比較は困難であるが定性的な比較は可能である。比較した解析法は重回帰分析と数量化理論Ⅰ類である。重回帰分析では重相関係数R=0.726、分散比F_0=20.3で次式(7)を得た。

$$Y=1.328+0.186X_A-0.414X_C+0.561X_D+0.228X_E+0.235X_G \quad (7)$$

次に、数量化理論Ⅰ類の適用においては、分類項目をアイテム、項目内の4ランクの評価をカテゴリーとし、現場判定結果を外的基準とした。解析の結果、重相関係数R=0.827で表-1の基準カテゴリーウエイトを得た。なお、表-2には上記2手法による偏相関係数を示してある。

表-1 基準カテゴリーウエイト

項目	1	2	3	4
Ⓐ	-0.208	0.12	2.355	0.952
Ⓑ	-0.499	0.124	-0.313	-0.499
Ⓒ	0.330	-0.053	-0.081	0.348
Ⓓ	0.056	-0.169	0.565	0.056
Ⓔ	0.405	-0.152	0.168	0.217
Ⓕ	-0.286	0.106	0.018	-0.558
Ⓖ	-0.196	-0.607	0.410	0.988
Ⓗ	-0.236	0.032	0.350	-0.377
Ⓘ	0.058	-0.319	0.058	0.058

表-2 偏相関係数

項目	重回帰	数量化
Ⓐ	0.194	0.576
Ⓑ	-0.011	0.427
Ⓒ	-0.225	0.234
Ⓓ	0.438	0.55
Ⓔ	0.207	0.37
Ⓕ	-0.133	0.301
Ⓖ	0.359	0.563
Ⓗ	0.053	0.319
Ⓘ	-0.098	0.284

以上の結果より、3種の解析に共通にⒹ、Ⓒ項目の寄与が大きいことから明らかにこの2項目が岩盤分類における重要な役割を担うと思われる。また、統計解析ではⒾ、Ⓗ項目の影響度が小さく、特に式(7)では採用されていない。これは、統計解析では相関係数を指標としたクリスプな予測値を得ようとすることから、相関の低い湧水に関する項目が軽視されたためと考えられる。これに対し、可能性線形システムでは湧水の影響を可能性として比較的大きな要因として扱っており、統計上相関の低い湧水に関する項目についても影響の重大さを評価している点において可能性線形システムの工学的合理性が示されている。なお、統計解析では式(7)、表-1に見られるように予測式の係数に負の値が現れる。これは対応する切羽観察項目の評価が不良になると、その総合としての岩盤良好度が高くなるという不合理な関係を与え、工学的な意味において理解しがたい。これに対し可能性線形システムでは定式化上、負の相関はありえずこのような不都合を生じない。

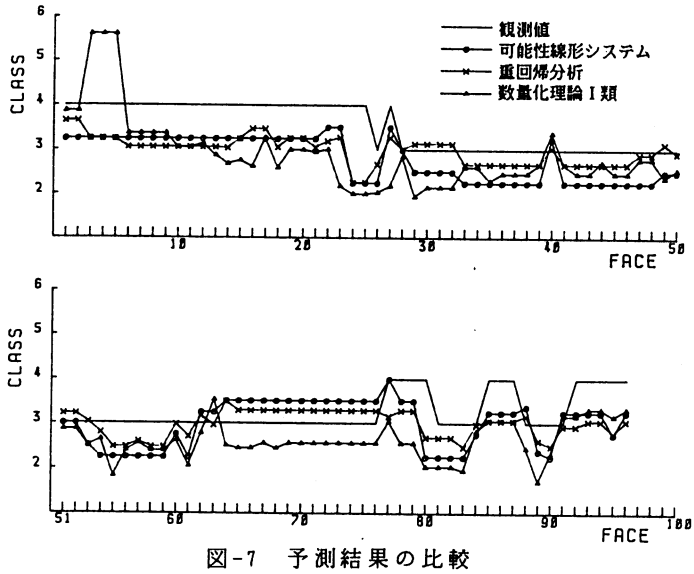


図-7 予測結果の比較

次に、可能性線形システムが予測システムとして、どの程度、統計解析に追随できるかを調べるために、これまでに得られた3種の予測式を用いて実際に岩盤分類基準値の予測を行なう。図-7は上記3手法による予測結果と現場判定を示したものである。ただし、式(6)については予測の中心値のみを示してある。図-7における予測値と観測値の誤差の絶対値の平均をとったところ重回帰(0.5173)、数量化(0.7595)、可能性(0.6536)であった。この結果から可能性線形システムが統計解析とほぼ同程度の予測能力を持つと言えよう。

5. 岩質判定アンケート結果との比較

ここでは、本研究で提案した岩盤分類基準式の妥当性を評価するために、別途行ったアンケート結果の基礎的な分析結果を示す。アンケートは全5切羽について施工中に記載された切羽観察記録、切羽状況図と切羽写真を加えた参考資料を基に該当切羽の岩質判定を行うものであり、各資料を考慮した程度（以下、重要度と言う）を回答している。対象者は日本道路公団、民間建設業に所属する技術者で岩質判定の経験があることを条件とし、全40サンプルの回答を得た。判定する岩質等級は日本道路公団の定めるA～D等級の岩質区分を基準とした。ただし、可能性線形システムの同定と同様にA～Dを1～4の数値に対応させ三角形分布で回答している。切羽観察記録に対する重要度は「非常に重

表-3 観察項目の評価ランク

項目＼切羽	1	2	3	4	5
Ⓐ	2	1,2	1	1	1
Ⓑ	2	2	1	2	1
Ⓒ	2,3	2	2	3	2
Ⓓ	2	2	2	3	2
Ⓔ	2,3	2,3	2	3	2,3
Ⓕ	2	2	2	2	2
Ⓖ	3	3	2	3	1
Ⓗ	2,3	2	1	1	2
Ⓘ	2	1,2	1	1	1

要」を1、「考慮しない」をOとしたときの評価を行っている。表-3は参考データとして示した切羽観察記録の評価ランクを示したものである。

図-8は各切羽の岩質判定結果をメンバーシップ関数として描いたものであり、横軸は岩盤等級、縦軸はグレードを表す。図中の三角形分布はアンケート結果のサンプル平均値、( )内は現場判定結果である。ただし、現場での判定は前述のようにA～Dの段階的判定であるため、これに対する推定範囲を点線で示してある。

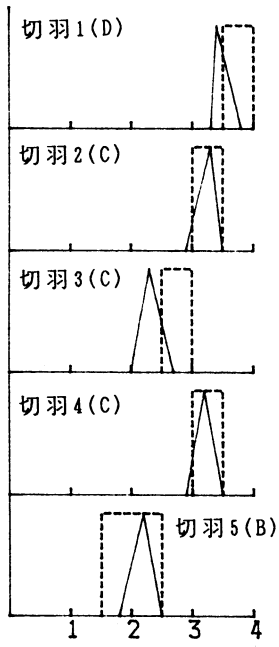


図-8　岩質判定結果

図-8より切羽3を除いては、ほぼ現場判定と同様な回答が得られている。これは、切羽3についてのみ切羽状況図の記載が不明瞭であったためと思われる。以上より、切羽観察記録、切羽状況図、写真を添付することによって現場判定と同様な判定を行うことができると考えられる。

次に、図-9は切羽観察記録に対する重要度回答値の平均値を示したものである。図より、©、Ⓓ項目については評価ランクの変化にも関わらず同一の傾向を示し、谷部と山部の区別が明瞭に現れていることからⒹ項目への依存度が高いことが分かる。Ⓐ、Ⓑ項目は他の項目に比し高い重要度を示しているが、図-8に示すように切羽1～5が岩質等級においてBからDの範囲で変化しているのに対し、Ⓓ項目が特に重要視されている第4切羽を除くとⒶ、Ⓑ項目に対する重要度の変化は他の項目に比し小さい。また、図-1の内容からⒶ、Ⓑ項目は切羽全体の挙動を表し、その他の項目の総合結果であると考えられることからⒶ、Ⓑ項目は重要視されているものの岩質判定に与える影響は大きくないと考えられる。Ⓔ、Ⓕ、©項目は割れ目に関する評価であるが、Ⓕ項目は全切羽において評価ランクが2でⒺ、©項目には1～3の評価ランクが与えられているにも関わらずⒻ項目の重要度のみが山部を成していることから割れ目についてはⒻ項目への依存度が高いと考えられる。ただし、切羽間の重要度の差異は小さく、岩質判定に与える影響は大きくないと考えられる。Ⓗ、①項目については、切羽1、2と切羽3、4、5との間で明瞭な差が見られる。①項目については明らかに評価ランクが2になったときの影響がかなり高く、これに付随してⒽ項目も高くなっている。①項目の評価ランクが1であればⒽ項目の評価ランクが2であってもⒽ項目の重要度は低く、切羽1、2でⒽ項目の重要度が上がっているのは①項目の影響で付随的なものであると思われる。従って、①項目が岩質等級に与える影響は大きいと考えられる。

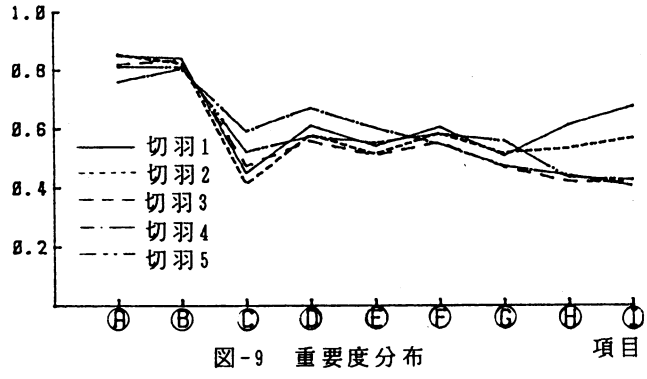


図-9　重要度分布

以上より、アンケート結果では©、Ⓕ、①項目が重要因子と考えられ、提案式との関係において割れ目に関する項目に違いがあるものの中心と幅において数値的に大きい©、①項目が一致したことで提案式の妥当性が示されると思われる。

6.　おわりに

本研究では、広島型花崗岩地山におけるトンネル施工時の岩盤分類法として可能性線形システムの応用による分類基準式を提案した。また、提案式におけるファジィ係数の工学的意味を考察し、従来の統計解析との比較を行った。さらに、技術者に対するアンケート結果との比較を行った。以下に結論を列記する。

1)岩盤分類基準式におけるファジィ係数の中心は切羽の自立性、幅は評価の可能範囲および施工性への影響を数量的に表現したものと考えられ、工学における合理的かつ明瞭な説明付けができる。

2)基準式に含まれる評価項目が少ないにも関わらず、予測の中心値のみを用いた比較においても従来の統計手法とほぼ同様な予測精度が得られる。

3)基準式に採用された評価項目はアンケート調査の結果と良い対応を示す。

以上より、可能性線形システムのトンネル施工における岩盤分類への適用性および提案した岩盤分類基準式の有効性が示されたと思われる。

参考文献：1)岩盤力学委員会第二分科会：トンネル岩盤分類の考え方，土木学会誌，Vol.64，No.11，pp.49～56，1979.11、2)日本応用地質学会編：岩盤分類，日本応用地質学会，1984.、3)日本道路公団：設計要領第三集第9編トンネル，pp.34，1985.10、4)田中英夫：可能性モデルとその応用，システムと制御，Vol.28，No.7，pp.447～451，1984.

問い合わせ先：〒700 岡山市内山下1-1-13
(株)大本組 技術研究所 鈴木昌次 Tel.0862-25-5131

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SC5-1

CMAC学習に基づくオペレータの制御戦略を有するファジィ障害物回避制御

Fuzzy Obstacle Avoidance Control with the Strategy of Operator Obtained by the CMAC Learning

前田陽一郎　　山中猛
Yoichiro MAEDA　　Takeshi YAMANAKA

国際ファジィ工学研究所
Laboratory for International Fuzzy Engineering Research (LIFE)

Abstract: This paper presents a method for performing obstacle avoidance control for mobile robots in an environment having moving obstacles. The method consists of recognizing the degree of danger using fuzzy reasoning and making a decision for avoidance action using a strategy map. The map describing this control strategy is constructed by the acquisition of the skill of an operator by using the CMAC learning algorithm. This paper discusses the results of obstacle avoidance simulation using this method.

1. 緒言

移動ロボットの障害物回避制御方式には代表的なものに、1) コンフィギュレーション空間法[1]、2) 人工ポテンシャル法[2]、3) ヒューリスティック手法[3]などがある。1) はグローバルな経路計画に向いているが、処理に時間がかかり、いくつかの拘束制約条件をもつ。2) はシンプルで高速なアルゴリズムでリアルタイム制御には向いているが、近傍情報のみによるローカルな回避しか期待できず、停留と呼ばれるデッドロック現象が大きな問題となっている。3) はAIルールを用いた柔軟な知的制御によりグローバルとローカルの両方を考慮したような総合的な回避が可能である反面、ヒューリスティックルールを発見するのが困難であったり、多大な推論時間を要するなどの欠点をもっている。

そこで我々は、3) の手法にファジィ推論を用いることにより、移動障害物に対し、人間に近い感覚で回避アルゴリズムが記述でき、かつ高速な推論が可能な障害物回避手法をすでに提案している[4,5]。

しかしながら、本手法で用いられている回避戦略にあたるルールはあらかじめ人間が与えたものであり、シミュレーション結果に基づいて人間がチューニングを行っている。この修正プロセスはシミュレーション結果のフィードバックにより自動化することも可能であるが、実際に人間にロボットを操作させ、うまく回避したケースを制御戦略として学習させる方法が考えられる。

本報告では、CMACと呼ばれる学習アルゴリズムを用いることにより、実際に人間に回避操作を行わせて、ディシジョンテーブルの制御戦略にあたる操作特性をスキル獲得することを試みた。さらに本方式の有効性をシミュレーションにより確認したのでこれについても報告する。

2. ファジィ障害物回避アルゴリズム

移動障害物が存在する環境において、人間は潜在的に危険を察知する能力を有しており、適切でかつ大まかな状況判断を瞬時にやってのける。本方式では障害物回避の処理プロセスを直感的な状況判断による粗い危険度認識とその結果に基づいてプロダクションルールにより回避方向を定める行動決定の2つのフェーズで構成されると考える。

本方式の障害物回避アルゴリズムを図1に示す。$_{r,o,t}$の添字はそれぞれロボット、障害物、目標点を示し、Pは絶対位置ベクトル、S、Uはロボット座標系から見た障害物の相対位置および相対速度ベクトル、O、D、Mはそれぞれロボットの障害物回避ベクトル、目標到達ベクトル、操舵ベクトルを示している。

図の右側はアルゴリズムのメインフローで、ここではこの部分について簡単に説明する。状態入力としてロボット、障害物、目標点の現在位置が与えられると、これらを相対位置および相対速度に換算し、ロボット座標系から見た極座標表示に変換する。次に現在の周囲状況をファジィ推論で大まかに状況認識する。すなわち、位置の極座標表示を用いて静的危険度α、速度の極座標表示を用いて動的危険度βを決定する。さらにこのα、βより回避方向をディシジョンテーブルを用いて決定する。ここで得られた回避ベクトルOと目標点に対する到達ベクトルDが求まれば、OとDを合成し、操舵ベクトルMが決定できる。これより指令操舵角が得られ、移動ロボットに指令値として出力される。

本手法の中で用いているメンバーシップ関数、静的危険度αおよび動的危険度βの決定のためのファジィルール、さらに回避ベクトル決定のためのディシジョンテーブルの詳細説明については、ここでは割愛する[4,5]。

3. CMAC学習アルゴリズムによる人間の戦略マップの獲得

J.S.Albusにより小脳の情報処理機構の数学モデルとして提案されたCMAC(Cerebellar Model Arithmetic Computer)[6]はニューラルネットワークの一手法で、複雑な入力空間マップの要素をいくつかの細胞(セル)に分担保持させることにより、効率良く学習できるアルゴリズムを提供したものである。CMACは以下のような特長をもっている。

- 汎化作用をもつ。
- 従来のテーブルマッピングよりはるかに少ない記憶容量で足りる。
- 学習速度が比較的速い。
- 入力が多次元のマッピングに向いている。

本報告では、オフラインで模擬的に人間にロボットの操作をさせ、この学習アルゴリズムを用いて前節で述べた制御戦略を記述したディシジョンテーブルを自動生成することを考える。学習の後、完成したマップを戦略マップとして障害物回避シミュレーションを行う。

図1の左側にこの学習プロセスのフローを示す。マップの学習は以下の手順で進められる。

1) ステップ0: まずファジィ推論により得られたα、βを2次元のCMAC入力空間と仮定する。最初CMACセルのすべての荷重はゼロにしておく。(本ステップは初回のみ)

2) ステップ1: ロボット、障害物、目標点の2次元状態を表示し、これを見ながら人間がロボットのステアリングを操作する。このときの人間の操作量(回避角)を$\hat{P}$、危険度から現在のCMACセルを用いて得た回避角をPとする。

3) ステップ2: セル要素の修正量Δを次式で算出する。(CMAC学習アルゴリズム)

$$\Delta = g \cdot (\hat{P} - P) / |A^*| \qquad (1)$$

但し、gは学習の利得係数、$|A^*|$は発火細胞の数。$|\hat{P} - P| \leq e$ならば学習を完了する。

4) ステップ3: 修正量Δを発火に関係したセルの要素すべてに加え、CMACセルを修正する。

5) ステップ4: 修正された各セルからテーブルルックアップにより、入力空間マップの該当要素を求める。

6) ステップ5: 得られた要素の値をステアリング角度に正規化する。この結果を回避ベクトルOの値としてメインフローに返す。

シミュレーションにおいては上記ステップ1～5をディシジョンテーブルによる回避ベクトル決定部のかわりに挿入し、オペレータの操作学習を何回か繰り返す。学習終了後、出来上がったCMACの入力空間マップはそのままオペレータの操作特性が盛り込まれた戦略マップとして利用できる。

4. シミュレーション

まずはじめに前節で述べたCMAC学習アルゴリズムを用いて、あらかじめオペレータの制御戦略を学習させた結果について述べる。図2は学習の結果得られたディシジョンテーブルで、横軸は静的危険度α、縦軸は動的危険度βを示している。いずれの軸も中央付近は安全、

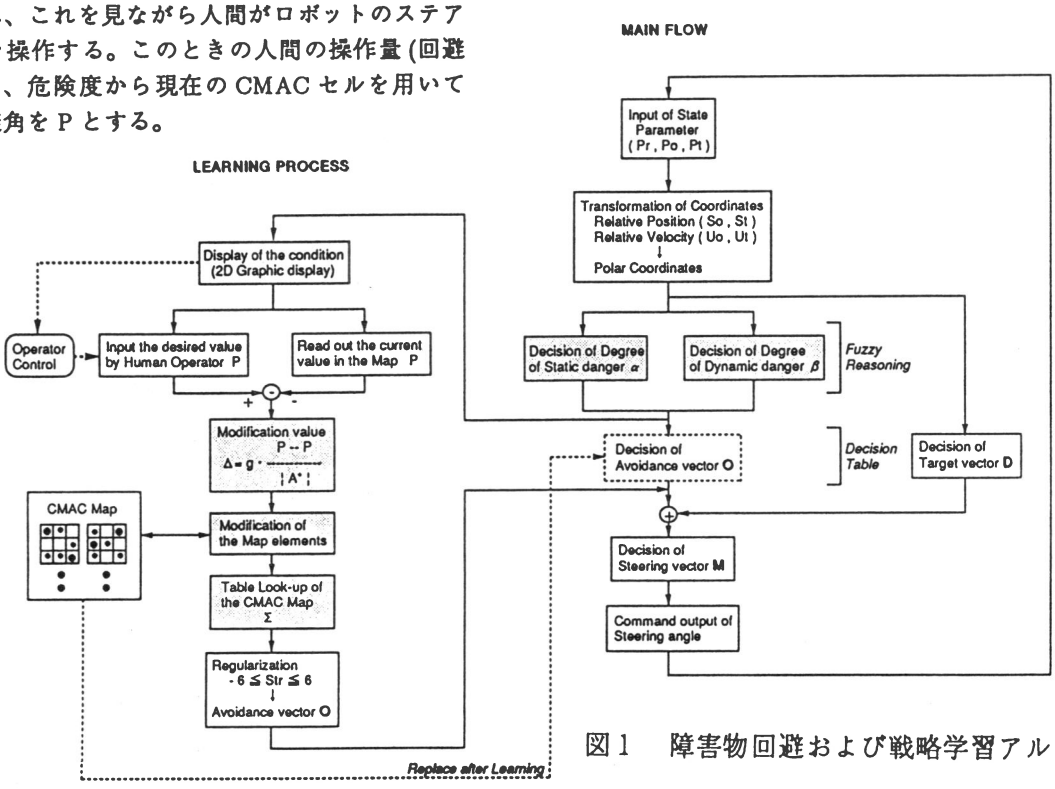


図1　障害物回避および戦略学習アルゴリズム

両端近くは危険な状態と考えることができる。図はさまざまな方向から出現する移動障害物に対し、同一オペレータがある一定の制御戦略を念頭に置きながらリアルタイムで回避操作したときに得られたマップである。

a) は障害物の遠くから余裕をもってゆっくりと回避する戦略 [戦略 1] をもった場合に得られたマップ、b) は障害物のかなり近くで突然大きく回避する戦略 [戦略 2] の場合のマップである。図中の楕円は長径の長さで回避角の大きさを示しており、図で最大がほぼ 5.0 で 75° に対応している。正は右回避 (縦楕円)、負は左回避 (横楕円) を示している。学習の利得係数 g は 0.7、発火細胞の数 $|A^*|$ は 3 である。a) は比較的小さな楕円 (回避角小) が均等に広がっている (安全な領域ですでに回避している) のに対し、b) は大きな楕円 (回避角大) が偏在している (危険な状態になるまで回避しない) ことがわかる。試行回数はいずれも約 700 回程度であるが、実際にマップを修正した有効学習は a) が 66 回、b) が 94 回で、比較的少ない回数で学習が収束していることがわかる。

ここで得られた戦略マップをもともとのディシジョンテーブルと置き換えて、障害物回避シミュレーションを行わせたときの回避結果を図 3 に示す。大きな丸は障害物、小さな丸は目標点、三角形はロボットを表している。矢印は移動方向で、黒く塗りつぶしたところは 3 秒ごとの同一時刻における位置を示している。a)、b) はそれぞれ戦略 1 のもとでの障害物のスピードが遅いときと速いときの回避例で、あまり大きくステアリングを切らずに、しかも前もってゆっくり回避していることがわかる。c)、d) は戦略 2 を用いており、初期位置・移動速度は a)、b) と同様の条件である。回避が比較的障害物の直前で行われており、かつ a)、b) に比べステアリングの切り方が極端である様子がわかる。

5. 考察

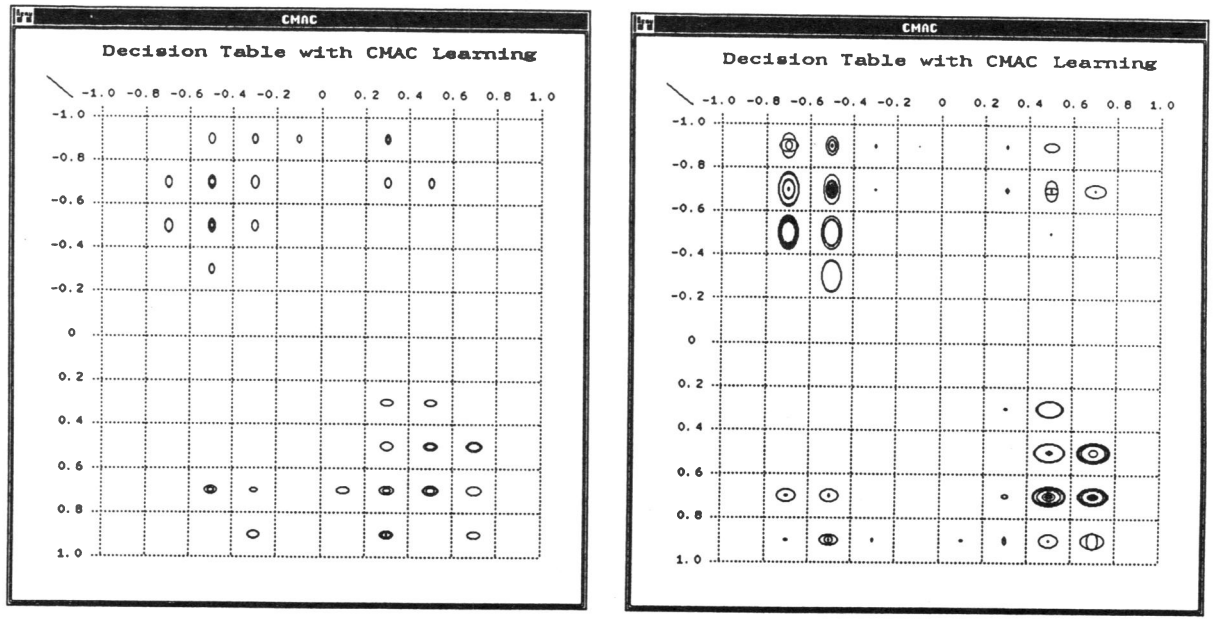
シミュレーション例では一人のオペレータが両極端な制御戦略を念頭に置いて操作した場合に得られたマップのみを示したが、異なる人が操作した場合のオペレータの個人差などももちろん特徴識別が可能である。シミュレーションはこのほかにもさまざまなケースで実施したが、明らかになったことをまとめると以下のようになる。

1) 同一人物が同一戦略で試行すると、比較的一定のマップが学習される。オペレータにより得意な回避方向があり、個人差の検証ができる。

2) 正しい回避を行うとマップ上で左上が正、右下が負のステアリングが出現する。右上、左下のコーナーはステアリング方向が一定でない。このようにマップ上での戦略評価が可能である。

3) マップの左と右の端の列は学習の結果、ステアリングがほとんど出現しないことがわかった。これは正しい回避をする限り、このような危険な状態が発生し得ないことを意味しており、特異な状態の戦略データは人間の操作学習からは獲得困難である。

4) 学習完了マップを用いた自律動作はほぼその人の特性どおりに動作することが確認されたが、場合によっては学習時とは異なった逆回避や接触を行うときがあり、学習ゲインをより小さくして試行回数をもっと増やす必要がある。学習ゲイン $g = 1.0$(単発学習) の場合、ミス操作や不定戦略をすべて学習してしまうため、$g \leq 0.7$ 程度が適当であるものと考えられる。



a) b)

図 2　戦略学習の結果得られたディシジョンテーブル

6. 結言

動的障害物を有する環境において、ファジィ推論を用いて状態の危険度を認識しながら、人間と同じようなフレキシブルな知的回避ができるファジィ障害物回避アルゴリズムをすでに提案している。本報告では、この中で用いられている制御戦略を記述したディシジョンテーブルをオフラインで自動生成するため、汎化作用があり、効率の良いマップ学習が可能であるCMAC学習アルゴリズムを適用した。この手法を用いると、実際にオペレータにロボットを操作させたときの回避特性・制御戦略等のスキルを容易に獲得できることがシミュレーションにより明かとなった。今後はいくつかの戦略を切り替えるような複雑な動作や自律的学習との組み合わせなども考慮していきたいと考えている。

最後に、本論文に対する研究の機会を頂いた寺野寿郎LIFE所長並びにLIFE組合員各社の方々に感謝の意を表します。尚、本研究は(財)機械システム振興協会より委託を受けている「ヒューマンフレンドリファジィシステム」開発の一環として行ったものである。

参考文献

[1] T.Lozano-Pérez, "Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements", IEEE Trans. SMC, Vol.11-10, pp.681-698 (1981)

[2] O.Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots", The International Journal of Robotics Research, Vol.5, No.1, pp.90-98 (1986)

[3] 武野, 柿倉,"移動ロボットの移動障害物に対する衝突回避問題について", 日本ロボット学会誌,Vol.4,No.5,pp.33-37 (1986)

[4] 前田, 竹垣"ファジィ推論を用いた移動ロボットの動的障害物回避制御", 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.6, pp.50-54 (1988)

[5] Y.Maeda, "Fuzzy Obstacle Avoidance Method for a Mobile Robot Based on the Degree of Danger",Proc. of NAFIPS'90, Vol.1, pp.169-172 (1990)

[6] J.S.Albus, "Brains, Behavior and Robotics", McGraw-Hill (1981)

問い合わせ先
〒231 横浜市中区山下町 89-1 シーベルヘグナビル 4F
技術研究組合・国際ファジィ工学研究所 前田陽一郎
TEL: 045-212-8223 FAX: 045-212-8255

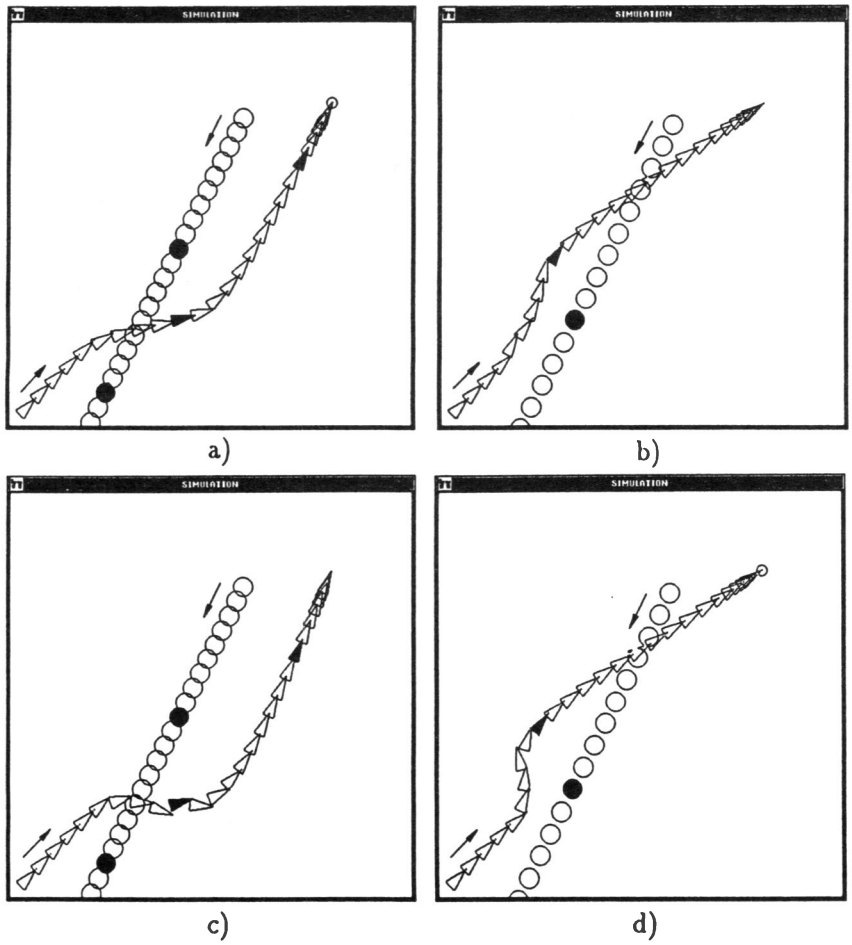


図3　障害物回避シミュレーション結果

SC5-2

逆キネマティクス-逆ダイナミクスモデルを学習するマニピュレータのファジィ制御

-C¹級のファジィモデリング-

Fuzzy Control of a robotic manipulator learning inverse kinematics and dynamics models

渡辺俊彦
Toshihiko WATANABE
(株)神戸製鋼所
KOBE STEEL,LTD.

市橋秀友
Hidetomo ICHIHASHI
大阪府立大学工学部
University of OSAKA Prefecture

Abstract:In this paper an iterative fuzzy modeling is proposed , which obtain a differentiable smooth function (a function of class C¹).The iterative identifications of nonlinear functions by the proposed method are compared with the error back propagation algorithm in the neural network model. An application to the trajectory control of a robotic manipulator is given. The inverse-kinematics model together with inverse-dynamics model are acquired by the iterative fuzzy modeling using feedback motor command(torque) as an error signal. None of the mathematical models of the manipulator dynamics is required and the control performance improved rapidly by the fuzzy model learned iteratively. The capability to generalize learned movements has been improved by the fuzzy modeling of class C¹.

1．はじめに

多関節型であることによる非線形性や関節間の干渉を無視できない高速動作を行うマニピュレータでは，与えられた目標軌道上を精度よく動かすためにはフィードフォワードによる制御が必要となる．しかし制御対象の逆ダイナミクスモデルやそのパラメータが完全に既知であることが必要である．また手先の位置と姿勢から各関節角を計算する逆キネマティクスモデルは幾何学的な問題であり一定の解法がない．

このようなことから，川人ら[1]や加納ら[2]は，ニューラルネットワークモデルを用いた逆ダイナミクスモデルと逆キネマティクスモデルのフィードバック誤差学習法を提案している．しかし多層モデルを用いる方法は収束に要する時間が長く多くの繰り返し学習を必要とする[3]．本研究では汎化能力を高めるためになめらかな入出力関係を得ることのできるファジィモデルを提案し，出力関数が微分可能（C¹級のなめらかな関数）となるためにメンバーシップ関数が満たすべき条件を示す．そして最急降下法による学習アルゴリズムを導く．３章では非線形関数の逐次同定についてバックプロパゲーションモデルとの比較を示す．４章と５章では提案の逐次型ファジィモデリングをマニピュレータの制御に応用し，作業座標上に与えられた円軌道をほぼ完全に追従させることができ，汎化機能も向上できることをシミュレーションによって示す．

2．逐次型ファジィモデリング

入力変数を$x_i(i=1,2,...,n)$，菅野の推論法[4]でのルール結論部の線形関数をu_j，ルールを$R_j(j=1,...,m)$とし，A_{ij}をj番目のルールの入力変数x_iのファジィ集合とし，$A_{ij}(x_i)$をそのメンバーシップ関数とする．また演算子*は，代数積を表す．

a）ファジィ推論則

菅野の推論則はモデルの記述能力の高さで優れているが，ルール結論部に多くの係数があるために繰り返しの学習に向いた形式ではない．そこで，菅野の推論則の結論部を，学習がスムーズに進むように座標変換して用いる．

学習型ファジィ制御の推論則は次のようになる．

$$R_j: \text{if } x_1 \text{ is } A_{1j} \text{ and } ...\text{and } x_n \text{ is } A_{nj}$$
$$\text{then } u_j = a_{0j}+a_{1j}\cdot(x_1-c_{1j})+....+a_{nj}\cdot(x_n-c_{nj}) \quad (j=1,..,m) \quad (1)$$

ただし，$c_{ij}(i=1,..,n$ ；jはルール番号)は，

$c_{ij} \in \{x_i \mid A_{ij}(x_i)=1\}$ を満たす点で，任意に１点定めておく．メンバーシップ関数として３角型を選ぶとすると，３角形の中心である．これはそれぞれのルールについて基準点を設けて座標変換（平行移動）することを意味する．したがって全てのルールが同等に扱われ逐次学習時の係数の発散を防ぐことができる．

$$\mu_j = A_{1j}(x_1)*A_{2j}(x_2)*...*A_{nj}(x_n) \quad (j=1,...,m) \quad (2)$$

とし，

$$\sum_j^m A_{ij}(x_i) = 1 \ , \ {}^{\forall}x_i(i=1,2,...,n) \quad (3)$$

でかつ，*として代数積を用いるとすると$\Sigma \mu_j = 1$が成り立つ．よって重み付き重心法の分母は１となるので，R_jに関する推論結果yは，

$$y = \frac{\Sigma \mu_j \cdot u_j}{\Sigma \mu_j} = \Sigma \mu_j \cdot u_j \quad (4)$$

となる．

b） 学習アルゴリズムの導出

r番目の入力データに対する理想出力（規範モデルの出力）をy^*_r，ファジィモデルの出力をy_rとし，全ての入出力データの２乗誤差を評価関数とする最小化問題として定式化する．すなわち評価関数を，

$$E = \frac{1}{2} \Sigma_r (y^*_r - y_r)^2 \quad (5)$$

とする．ただしパラメータの修正は１つのデータが与えられるごとに行う逐次学習方式とする．(5)式の誤差関数の最急降下方向を求めるためには全ての入出力データが事前に必要である．Amari[5]はこのような問題における確率的降下法を提案しており，学習の係数を十分小さくとれば，一つのデータについての誤差関数の降下方向を用いても平均的に(5)式の極小値が得られることを示している．一つのデータの評価関数の降下方向を求め，その逆方向が最急降下方向となる．また(5)式の誤差関数はヘッセ行列が半正定であることから下に凸で，極小値はただ一つ存在する．したがって次の学習則が得られる．

ηを学習係数，(y^*-y)を理想出力との誤差信号とし，μ_jを条件部適合度として，学習則は

$$a_{0j} = a_{0j} + \eta \cdot (y^* - y) \cdot \mu_j \quad (8)$$
$$a_{ij} = a_{ij} + \eta \cdot (y^* - y) \cdot \mu_j \cdot (x_i - c_{ij}) \quad (9)$$

となる．

c）C¹級のファジィモデリングのためのメンバーシップ関数

ファジィモデルの出力関数は一般に微分不可能な点を含みなめらかではない．それはメンバーシップ関数がC⁰級であることによるものである．マニピュレータの学習型ファジィ制御[6]では汎化機能が不十分なことが報告されているが，通常のファジィモデ

ルはニューラルネットワークモデルに比べてなめらかさに劣る点が一つの原因と考えられる．学習の汎化にはなめらかな関数が有効である．すその長い釣鐘型のメンバーシップ関数を用いれば微分可能とはなるが，重心法の分母の計算が必要になり，制御への応用では演算時間遅れに影響する．そこで本節では三角型メンバーシップ関数を拡張し，出力関数が微分可能となるメンバーシップ関数を定義する．なお1階微分可能なようにメンバーシップ関数を定義するが，制御への応用としてはこれで十分であると思われる．高階微分可能にするためにはメンバーシップ関数としてB－スプライン[7]を用いればよいが，このようにすると結論部が定数項のみの簡略ファジィ推論モデルはスプライン関数に一致する．

メンバーシップ関数に次の条件を加える．変数をxとし中心をa，左幅をb，右幅をcとする．また1つの変数上では2つのファジィ集合が重なるものとする．先に述べた推論則において，メンバーシップ関数はC¹級の関数で $f(x) = A_{ij}(x)$として，

（条件1）全てのiについて

$$\sum_{j=1}^{n} A_{ij}(x) = 1$$

（条件2）

$$f(a) = 1 \quad , \quad f'(a) = 0$$

（条件3）

1) $b < \infty$ の時

$$f(a-b) = 0 \ , \quad f'(a-b) = 0$$

2) $b = \infty$ の時

$x \leqq a$ で $f(x) = 1$

（条件4）

1) $c < \infty$ の時

$$f(a+c) = 0 \ , \quad f'(a+c) = 0$$

2) $c = \infty$ の時

$x \geqq a$ で $f(x) = 1$

以上4つの条件は出力関数が1階微分可能となるための十分条件であるが，通常は条件1の代わりに条件5を加える．

（条件5）

1) $b < \infty$ の時，

$a-b \leqq x \leqq a$ で

$$f(x) = 1 - f\left(2\left(a - \frac{b}{2}\right) - x\right)$$

2) $c < \infty$ の時，

$a \leqq x \leqq a+c$ で

$$f(x) = 1 - f\left(2\left(a + \frac{c}{2}\right) - x\right)$$

この条件の意味はとなり合ったメンバーシップ関数がメンバーシップ値0.5で交わり，この交点に関して点対象となることを意味する．

このような条件を満たすメンバーシップ関数をFig.1にしめす．Fig.1の例のパラメータの値を列挙すると①はa=10, b=∞, c=5で，②はa=15, b=5, c=5,③はa=20, b=5, c=10，④はa=30, b=10, c=∞である．

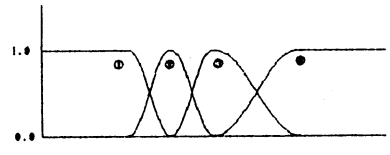


Fig.1 Examples of the membership function of class C¹

具体的に条件2－5をみたすメンバーシップ関数としては次の例のような関数があげられる．

例）$g(x) = 2x^3 - 3x^2 + 1$ とし，

$$f(x) = \begin{cases} g\left(\dfrac{x-a}{c}\right) & (a \leqq x \leqq a+c) \\ 1 - g\left(1 + \dfrac{x-a}{b}\right) & (a-b \leqq x \leqq a) \\ 0 & (x \leqq a-b, a+c \leqq x) \end{cases}$$

以上の条件を満たすように各変数のメンバーシップ関数を設定すればファジィモデルの出力関数はC¹級となる．

d）条件部の学習

先の前件部メンバーシップ関数を左右に分けて考え，幅をメンバーシップ関数の中心間の距離として，偏微分し降下方向を求めると次のようになる．

ある状態変数xのメンバーシップ関数f_nの中心をa_n，f_{n+1}の中心をa_{n+1}として，$a_n \leqq x \leqq a_{n+1}$の時，i = n,n+1として，

$$a_i = a_i + \tau \cdot (y^* - y) \cdot \frac{\partial f_n}{\partial a_i} \cdot \left\{ \frac{1}{f_n} h(f_n) - \frac{1}{f_{n+1}} h(f_{n+1}) \right\}$$

で修正する．ここで，h(f)はメンバーシップ関数fのファジィ集合を条件部に持つルールのみの総合推論結果である．ただしτは学習係数としできるだけ小さい値を設定する．メンバーシップ関数の幅bは$a_{n+1} - a_n$とする．尚，後のマニピュレータへの応用では条件部は固定する．

3．バックプロパゲーションモデルとの比較

本章では既知の1入力1出力の関数を理想モデル（教師信号）として提案の逐次型ファジィモデリングとニューラルネットワークのバックプロパゲーションモデル[8]との比較を行った．パラメータ数10のファジィモデル，中間層のユニット数4（パラメータ数13）と10（パラメータ数31）のバックプロパゲーションモデルの3つの場合の比較を，理想モデルとして線形関数，周期関数，指数関数を用いて行った．いづれもなめらかな関数である．入出力データは21個とし繰り返し逐次学習させる．0,100,500,1000,10000,100000回の学習後での300点の入出力データについての誤差の2乗和をTable.1に示す．

Table1 Simulation result

iteration number		0	100	500	1000	10000	100000
linear							
F-SU	(12)	9724000	809.3	230.3	50.74	0.000	0.000
N-BP-4	(13)	706900	13360	4297	2469	685.8	16.45
N-BP-10	(31)	1811000	6022	2032	1001	396.0	4.865
sine							
F-SU	(12)	712500	981.1	457.8	424.4	427.9	428.0
N-BP-4	(13)	395000	343600	321400	321200	279500	1404
N-BP-10	(31)	447300	323300	321600	321000	61892	43.00
exponential							
F-SU	(12)	679500	3168	1054	900.8	880.0	880.0
N-BP-4	(13)	1657000	1459000	381400	10940	644.0	229.0
N-BP-10	(31)	1682000	1120000	6140	2272	195.0	149.0

BPモデルは線形関数の場合，学習の速度は速いが，非線形関数の場合ではかなりの繰り返し学習を必要とする．うまく収束すれば精度が良いが，2つの学習係数の調整にはかなりの手間を要した．一方逐次型ファジィモデリングではどの場合も学習の速度は速く安定して収束している．また学習係数の調整もほとんど不用な程度に容易である．これらの結果から考えると非線形関数の同定に関しては，逐次型ファジィモデリングの方が優れているといえる．

4．逆キネマティクスモデルの同定と汎化テスト

提案の逐次型ファジィモデリングを用いて逆キネマティクスモデルの学習のシミュレーションを行った．逆キネマティクスモデルはマニピュレータの手

先の位置と姿勢（方向）から各関節角を計算するモデルである．このモデルは冗長自由度を持つ場合，解は多く存在し不良設定問題となる．

加納ら[2]はヤコビ行列を用いるフィードバック誤差学習法によって逆キネマティクスモデルが獲得できることを示している．

すなわち誤差信号を次のように発生させる．

$$\Delta\theta = J^{T}\cdot(q_d - q) \qquad (10)$$

ここでJ^{T}はヤコビアン転置行列でq_d，qは作業座標での手先の目標位置と実際の位置である．

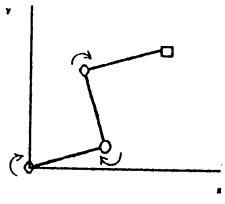


Fig.2 A plane type 3-link manipulator

平面３リンクマニピュレータ(Fig.2)を対象として逆キネマティクスモデルを逐次学習させるシュミレーションを行った．今，入力は座標（q_x，q_y），出力は各関節角θ_1，θ_2，θ_3である．入力の範囲を$0 \leq q_x \leq 1.2$，$0 \leq q_y \leq 1.2$ $q_x^2+q_y^2 \leq 1.2^2$とする．Fig.3のようにこの範囲内に８個の点を取り各点間を50分割し，400個の点を入力として繰り返し学習する．汎化テストとしてq_x，q_y座標をそれぞれ0.1m刻みで123点の格子点を入力してそのときの出力である関節角による出力と目標位置との距離（誤差）を計算しそれを100までの正数に変換し図に示した．入力のq_xとq_yをそれぞれファジィ集合で６分割した．Fig.3-a)は学習前でFig.3-b)は1000回の学習の後の出力である．これから逆キネマティクスの近似モデルが獲得できていることが分かる．また学習の汎化もある程度うまくいっている．Fig.4に各テスト点の距離の総和が学習とともに減少していく様子を示した．

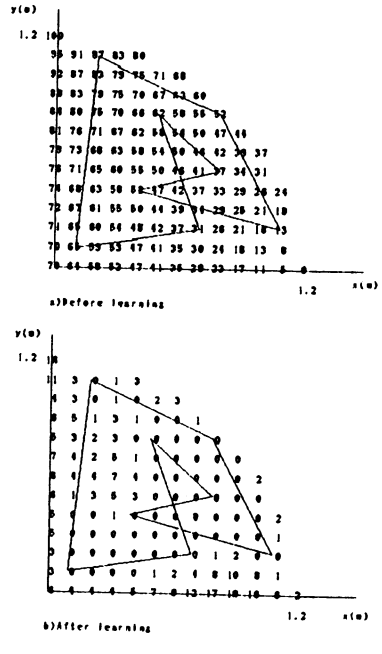


Fig.3 Errors between output of real model and fuzzy model(0-100)

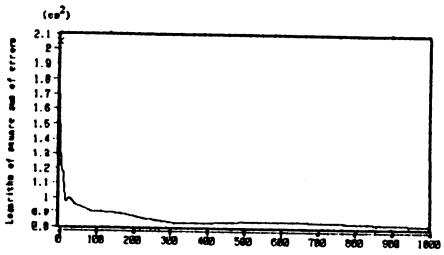


Fig.4 Learning history of total errors

5．逆キネマティクスモデルと逆ダイナミクスモデルの同定

本章では逆キネマティクスモデルと逆ダイナミクスモデルを同時に獲得させる問題を考える[2]．

以下のマニピュレータへの応用で用いる，川人らによって提案されたフィードバック誤差学習法をまず概説する[1-3]．

この手法は非線形な制御対象の逆モデル（逆系）を逐次的に学習させるもので，Tを操作量，T_fをフィードバック操作量，T_i（＝ｙ）をフィードフォワード操作量として，

$$T = T_f + T_i \qquad (11)$$

とする．マニピュレータの場合モデルの理想出力T*（＝ｙ*）は当然未知であるが，フィードバック操作量が理想出力との誤差を表わすと仮定して学習の誤差信号（ｙ*－ｙ）の代用としてT_fを用いるものである．すなわち，

$$T_f \fallingdotseq T^{*} - T_i \qquad (12)$$

と考える．T_iが理想出力T*に近づけばT_fは減少し，逆モデルによるフィードフォワード系によって系全体の伝達特性は１となる．

手先に円軌道を描かせるシミュレーションをFig.5の垂直３リンクマニピュレータとFig.2の冗長性のある平面マニピュレータについて行った．

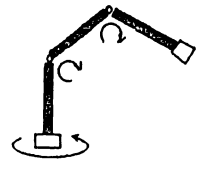


Fig.5 A vertical type 3-link manipulator

逆モデルへの入力は目標の位置とその速度，および加速度を用いる．シミュレーションでは予め軌道を時間関数で設定しておきその導関数から速度と加速度を求める．逆モデルからの出力は各関節へのフィードフォワードトルクである．

フィードバックトルク（誤差信号）T_fは

$$T_f = J^{T}\cdot(K_p\cdot(q_d - q) + K_d\cdot(q_d' - q')) \qquad (13)$$

として発生させる．ここでJ^{T}はヤコビアン転置行列，q_dとq_d'は目標の位置と速度のベクトルを表わし，qとq'はそれぞれ観測された位置と速度のベクトルを表わす．K_pとK_dはそれぞれ比例項ゲイン，微分項ゲインである．各関節への入力トルクはフィードバックトルクと逆モデルからのフィードフォワードトルクの和として計算される．

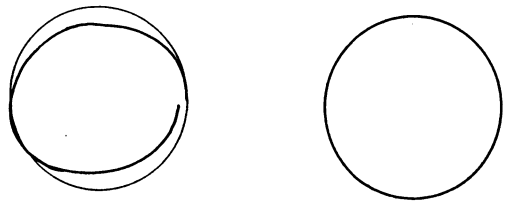
ａ）垂直３リンクマニピュレータでのシミュレーション

まずFig.5の３リンクマニピュレータでの円軌道追従のシミュレーションを行った結果を示す．目標軌道は次のように設定した．

$$s = \sin\frac{\pi}{2}(t-1) + 1 \qquad (0 \leq t \leq 2)$$

$$q_x = -0.1 + 0.1\cos\pi s$$
$$q_y = 0.4\sqrt{2} \qquad (14)$$
$$q_z = 0.4 + 0.1\sin\pi s$$

ここでｔは時間(秒)を表わす．つまり２秒間の $q_y = 0.4\sqrt{2}$ の平面上の半径 0.1m の円軌道に追従させるシミュレーションを行った．条件部のファジィ集合はそれぞれの入力変数の変域をを３分割した．関節角の初期状態はそれぞれ１リンク目から $\pi/2, \pi/4, \pi/2$ とした．Fig.6に学習前のフィードバック制御のみによる手先の軌道と1000回の学習の後の軌道を q_x-q_z 平面に投影して示す．この図では q_x-q_z 平面と垂直な方向のずれは見えないが，学習前の軌道で現われていたずれが学習後にはほとんど見えなくなっていることが確認できた．Fig.7に誤差の２乗和の減少の様子を示す．縦軸は対数目盛りである．誤差は大きな振動もなく安定して減少していることが分かる．



a)Before learning　　b)After learning

Fig.6 Drawn trajectory by vertical type 3-link manipulator

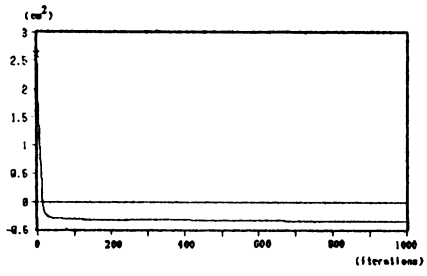
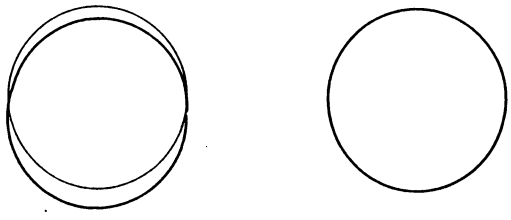


Fig.7 Learning history of square sum of errors

ｂ）平面３リンクマニピュレータでのシミュレーション

次に平面３リンクマニピュレータでのシミュレーション結果を示す．ａ)と違いトルクの生成に際して重力の影響を受けないが，腕に冗長性がある．ａ）と同じく２秒間の円軌道を目標軌道として与えた．Fig.8に学習の前と後での手先の描いた軌道を示す．学習の後ではかなりうまく追従できるようになった．



a)Before learning　　b)After learning

Fig.8 Drawn trajectory by plane type 3-link manipulator

ｃ）楕円軌道の追従による汎化テスト

次にａ）で円軌道追従の学習によって獲得された逆モデルを用いて楕円の主軸の一方を0.1から0.0に変化させて学習の汎化を調べた．誤差の２乗和の対数を縦軸に，短軸の長さを横軸にとってFig.9に示す．ある程度の汎化機能が実現できていることがわかる．

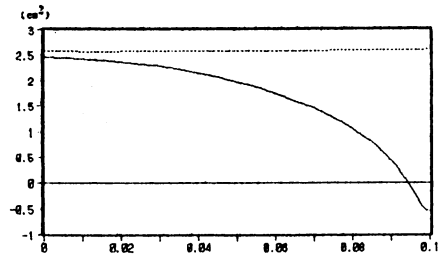


Fig.9 Generarizing test of learning
——— : Fuzzy model
------ : Non learning

６．おわりに

本研究では，逐次型ファジィモデリングの学習則を導出し，ファジィモデルの出力関数が微分可能となるためにメンバーシップ関数の満たすべき条件を示した．そしてまず冗長性のあるマニピュレータの逆キネマティクスモデルの同定に応用し，その汎化機能をテストした．学習の汎化は入力変数の数と条件部のファジィ集合に依存する．しかしなめらかなメンバーシップ関数を用いると入力が２次元程度のモデルであれば汎化はかなりうまくいくことがわかった．最後に逆ダイナミクスモデルと逆キネマティクスモデルの両者を含んだ逆モデルの同定をマニピュレータの手先が円軌道を描く場合を例に，シミュレーション実験を行った．学習型ファジィ制御は，逆キネマティクスを含む場合も学習に要する時間がかなり短く，誤差が学習とともになめらかに収束をすることがわかった．

参考文献

(1)M.Kawato,K.Furukawa,R.Suzuki:A Hierarchical Neural-Network Model for Control and Voluntary Movement; Biological Cybernetics,Vol.57,pp169～ 185(1987)

(2)加納，川人，鈴木：フィードバック誤差学習によるマニピュレータの逆ダイナミクス逆キネマティクス学習シミュレーション;電子情報通信学会技術研究報告,88巻，171号,pp.91～96,MBE 88-92 (1989)

(3)瀬戸山，川人，鈴木：多層神経回路網内に学習される逆ダイナミクスモデルによるマニピュレータの制御；電子情報通信学会技術研究報告,87巻，135号,pp.249～256,MBE 87-135(1989)

(4)菅野：ファジィ制御，日刊工業新聞社(1988)

(5)S.Amari:A Theory of Adaptive Pattern Classifiers;IEEE Trans.EC-16,279-307(1967)

(6)渡辺，市橋：逆ダイナミクスモデルを学習するマニピュレータのファジィ制御;SICE関西支部シンポジウム講演論文集,pp.25～30(1990)

(7)吉本，市田：スプライン関数とその応用，教育出版(1979)

(8)D.E.Rumelhart,J.L.MacClelland :Parallel Distributed Processing,MIT Press (1987)

問い合わせ先 : 〒591堺市百舌鳥梅町4-804
大阪府立大学工学部経営工学科
市橋秀友
TEL, (0722)52-1161　　FAX, (0722)59-3340

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SC5-3

階層的ファジィモデルによる誤差逆伝播学習

Back Propagation Error Learning with Hierarchical Fuzzy Models

－ オンラインのGMDHアルゴリズム －

Online GMDH Algorithms

市 橋 秀 友

Hidetomo ICHIHASHI

大阪府立大学 工学部

Department of Engineering, University of Osaka Prefecture

Abstract : The neural network models are smooth functions of class C^{∞}. Whereas, the fuzzy models are not differentiable (class C^{0}) usually. This paper proposes a method to obtain a fuzzy model of class C^{1} by the iterative learning. And, an error back propagation algorithm with hierarchical fuzzy model is also proposed. Comparative studies with a neural network model in cases of several typical functions and a parity digit problem are given.

1．はじめに

非線形システムのモデリング手法として，ＧＭＤＨ[1]やスプライン関数でのデータ平滑法[2,3]などがある．これらは事前に与えられた入出力データに基づく最小自乗法であり，正規方程式を解析的に解くもので，計算機での情報処理としてはバッチ処理である．一方，多層構造のニューラルネットワークでの誤差逆伝播学習は逐次的に与えられるデータからオンラインでモデリングを行うものでマニピュレータの制御[4]などにおいて，運動方程式などの数学モデルを必要としない点からその有効性が認められる．同様の観点からファジィモデルを用いた逐次学習法が提案されていて，高速に収束することが報告されている[5]．しかし多変数のモデルではパラメータ数が膨大になり大規模システムには適用できない．そこで本研究ではファジィモデルを階層構造にしてパラメータ数を減らし，誤差逆伝播法[6]による逐次型モデリングを提案する．この階層モデルを，数式モデルとして見たとき，多重線形関数や２次関数を部分表現式として全体表現式を構成するＧＭＤＨに等しく，その意味でオンラインのＧＭＤＨであるといえる．

まず準備として，2章と3章で幾つかのファジィモデルと学習則を概説し，4章ではシミュレーションによる比較を行う．次に5章で階層モデルによる誤差逆伝播学習を提案し，パリティ問題への応用を示す．

2．C^{0}級の逐次型ファジィモデリング

2．1 簡略推論による場合[7]

簡略ファジィ推論に用いる第i入力変数の変域における第j番目のファジィ集合を A_{ij} とする．メンバーシップ関数$A_{ij}(x_i)$はメンバーシップ値が 0.5 のところで交わるような三角形（屋根型）であるとする．n 個の入力変数をx_i(i=1,....,n)，出力 y を推論する k 番目のルール結論部の実数値を w_k とする．j =0,1のときルール総数はm=2^n個であり，ルール番号kをk=1,2,..,2^n と与える．条件部適合度合は

$$\mu_k=A_{1j}(x_1)*A_{2j}(x_2)*\ldots*A_{nj}(x_n) \quad (1)$$

とする．kを定めるとjは逆にiとkの関数 j(i,k) であり，整数 k-1 を n桁の2進数で表したときの右から第i桁目の値である．したがって，0または1の値をとる（変域をファジィ集合で7分割したときjはn桁の7進数の右から第i桁目で0-6の整数値をとる）．また * は代数積でありminimum演算子は用いない．k番目のルールの条件部適合度合は

$$\mu_k=\prod_{i=1}^{n} A_{i,j(i,k)}(x_i) \quad (2)$$

で，ファジィモデルの出力 y を

$$y=\sum_{k=1}^{m} \mu_k \cdot w_k \quad (3)$$

とする．三角形の中心 a_{ij}を節点と呼ぶ．最急降下法による学習則は $\delta=y^{*}-y$ ，すなわちδ を入力データに対する出力 y と理想出力 y^{*} の差とし，

$$w_k(t+1)=w_k(t)+\tau \cdot \mu_k(t) \cdot \delta(t) \quad (4)$$

とする．ただしτは学習係数で，(t)は第t 入力ベクトルに対応していることを意味する．このモデルは１次のＢスプラインを用いたスプライン関数[1,2]でありＣ^{0}級（１階微分が不連続な関数）である．

2．2 入力変数を多重に考慮する場合[8]

2.1節での簡略ファジィ推論において，入力変数x_iを2重に考慮すると，変数x_iについての2次関数となる．またこのことは，ルールを次のようにしたことに等しい．

R1: If x_1 is very A_{10}
then y is w_1

R2: If x_1 is between A_{10} and A_{11}
then y is w_2

R3: If x_1 is very A_{11}
then y is w_3

上記のルールでのメンバーシップ関数は，

very A → $A(x)^2$

between A and B → $2 \cdot A(x) \cdot B(x)$

となる．ここでのA_{ij}は三角形（屋根型）のメンバーシップ関数である．R_kの条件部適合度合をμ_kとすると，総合推論結果は，2章と同様に

$$y = \sum_k \mu_k \cdot w_k \qquad (5)$$

となる．これは区分的な２次関数を用いた補間によって非線形な入出力関係を表現する方法といえる．最急降下法に基づく学習則は(4)式に等しい．このモデルもC^0級である．

3．C^1級の逐次型ファジィモデリング

3.1 菅野の推論法による場合[9,10]

2.1節の簡略推論の結論部を線形関数とした菅野の推論法は２次関数を用いたモデルとなる[5,11]．したがって，2.2節と同じ数式モデルを仮定していることになる．また次の3.2節のモデルも２次関数である．2.2節と3.2節のモデルはn入力の場合適合するルールの数は3^n個となるのに対して，ここでの菅野の推論法では2^n個であり，デジタル制御へ応用したとき演算遅れが小さい．

$g(x) = 2x^3-3x^2+1$ とおき，a_jを節点として各変数のメンバーシップ関数を

$$A_{ij}(x_i)=\begin{cases} g\left(\dfrac{x-a_j}{a_{j+1}-a_j}\right) & ;a_j \leqq x_i \leqq a_{j+1} \\ 1-g\left(1+\dfrac{x_i-a_j}{a_j-a_{j-1}}\right) & ;a_{j-1} \leqq x_i \leqq a_j \\ 0 & ;x_i \leqq a_{j-1}, a_{j+1} \leqq x_i \end{cases} \qquad (6)$$

と設定すれば菅野の推論法によるファジィモデルの出力関数はC^1級（１階連続微分可能な関数）となる．詳細は[9]にあるので省略する．

3.2 スプライン関数を用いる場合

なめらかな関数補間の方法にスプライン関数がある．簡略推論におけるルール条件部に用いるファジィ集合のメンバーシップ関数を２次のＢ－スプライン（スプライン基底）とすることができる．ドゥブァコックス（de Boor-Cox）の算法よりメンバーシップ関数は

$A_{ij}(x_i)$ =

$$\begin{cases} \dfrac{x_i-a_j}{a_{j+1}-a_j} \cdot \dfrac{x_i-a_j}{a_{j+2}-a_j} & ; a_j \leqq x_i < a_{j+1} \\ \dfrac{a_{j+2}-x_i}{a_{j+2}-a_{j+1}} \cdot \dfrac{x_i-a_j}{a_{j+2}-a_j} + \dfrac{x_i-a_{j+1}}{a_{j+2}-a_{j+1}} \cdot \dfrac{a_{j+3}-x_i}{a_{j+3}-a_{j+1}} & ; a_{j+1} \leqq x_i < a_{j+2} \\ \dfrac{a_{j+3}-x_i}{a_{j+3}-a_{j+2}} \cdot \dfrac{a_{j+3}-x_i}{a_{j+3}-a_{j+1}} & ; a_{j+1} \leqq x_i < a_{j+3} \end{cases} \qquad (7)$$

となる．ただしa_jは節点である．もっと高次のスプライン関数も使用できる．推論則および学習則は2.1節の簡略推論の場合と同じである．ここでのファジィモデルもC^1級である．

4．種々の関数での比較

５つの１変数関数を理想モデル（教師信号）として逐次学習を比較した．2.1節での簡略推論では１入力１出力のとき区分的な線形関数であるのでこれを除いて，2.2節の入力変数を多重（２重）にする場合（F-QM），3.2節のスプライン関数を用いる場合（F-SP），３層のニューラルネットの誤差逆伝播法で中間層のユニット数が４の場合（N-BP-4）について種々の関数での学習回数の比較を行った．3.1節の菅野の推論法による場合は文献[9]に比較を示している．入力変数の変域を区間[0,3]とし，その中の21個のデータ点について繰り返し学習させた．表１の値は同定されたモデルを用いて[0,3]内の300個のデータ点での誤差を二乗和したものである．ただし，F-QMK はF-QM において，節点の学習則を導き，節点も変化させた場合である．学習則は，ある入力データ x に対して左の節点 a_j の場合，

表１　最急降下法での学習回数の比較（誤差の２乗和）

iteration number		0	100	500	1000	10000	100000
linear							
F-QM	(11)	9724000	0.0059	0.0000			
F-SP	(12)	9724000	24.79	0.0000			
N-BP-4	(13)	706900	13360	4297	2469	685.8	16.45
F-QMK	(12)	9724000	0.0342	0.0000			
quadratic							
F-QM	(11)	15170000	0.0125	0.0000			
F-SP	(12)	15170000	1.798	0.0000			
N-BP-4	(13)	3655000	1950000	1176000	104500	23450	8376
F-QMK	(12)	15170000	0.7846	0.0000			
sine							
F-QM	(11)	712500	1246	1246	1246	1246	1246
F-SP	(12)	712500	120.4	99.05	99.05	99.05	99.05
N-BP-4	(13)	395000	343600	321400	321200	279500	1404
F-QMK	(12)	712500	562.7	549.9	538.2	506.9	506.3
exponential							
F-QM	(11)	679500	264.2	264.2	264.2	264.2	264.2
F-SP	(12)	679500	20.72	18.99	18.99	18.99	18.99
N-BP-4	(13)	1657000	1459000	381400	10940	644.0	229.0
F-QMK	(12)	679500	1473	1214	1049	864.6	864.6
fractional							
F-QM	(11)	2345000	37400	37400	37400	37400	37400
F-SP	(12)	2345000	14480	14470	14470	14470	14470
N-BP-4	(13)	2547000	517700	506200	482400	358900	2914
F-QMK	(12)	2345000	7947	4857	2697	2255	2209

$$a_j(t+1) = a_j(t) + \tau\ \delta(t)\frac{\partial y}{\partial a_j} \qquad (8)$$

$$\frac{\partial y}{\partial a_j} = \frac{2(a_{j+1}-x)}{(a_{j+1}-a_j)^3}\{w_{2j-1}(a_{j+1}-x) - w_{2j}(2x-a_j-a_{j+1}) - w_{2j+1}(x-a_j)\} \qquad (9)$$

となる．ルール結論部実数値の学習のための学習係数は0.3としているが，節点の学習係数は 3×10^{-7} とした．節点もパラメータとなるのでその分，節点の数を減らしている．各々の場合のパラメータ数を(　)で示している．また真のモデルとして用いた関数は，線形関数(linear)，２次関数(quadratic)，SIN関数(sine)，指数関数(exponential)，分数関数(fractional)である．分数関数は滑らかではあるが局所的に尖っている．各々の関数を以下に示す．

linear	$y=100+50x$
quadratic	$y=-120(x-1.5)^2+300$
sine	$y=50\mathrm{SIN}(4\pi x/3)+150$
exponential	$y=50+200\mathrm{EXP}(-(x-1.5)^2/0.5)$
fractional	$y=50+5/(0.03+(x-1.7)^2)$

5．階層的ファジィモデルによる誤差逆伝播学習

5．1　オンラインＧＭＤＨアルゴリズム

最も簡単な場合として2.1節の簡略推論を用いる．このモデルは論理関数の学習すなわち，パリティ問題に有効であることが知られている[7]．しかし，パラメータの数が，j=0,1の場合n入力に対して 2^n 個必要となり，パターン認識などのもっと大規模な問題には不向きである．そこで，ファジィモデルを図１のように階層構造とする．図１の階層図における一つのサブモデルは２変数の多重線形関数であり[7]，その意味で統計的な非線形システム同定手法であるＧＭＤＨ（変数組合せ計算法）[1,2]の基礎関数に等しく，全体のモデルは完全表現に等しい．ＧＭＤＨにおいては，モデルの選択規範，入出力データの分割による正則化などの発見的規範があるが，本章では誤差逆伝播学習法による完全表現式の逐次同定についてのみのべる．なお，図１の例に示すように，ＧＭＤＨとしては２層モデルであるがニューラルネットワークの多層モデルに似せて３層とみなし各添字を設定している．また簡単のために図１の３層モデルについて以下説明する．

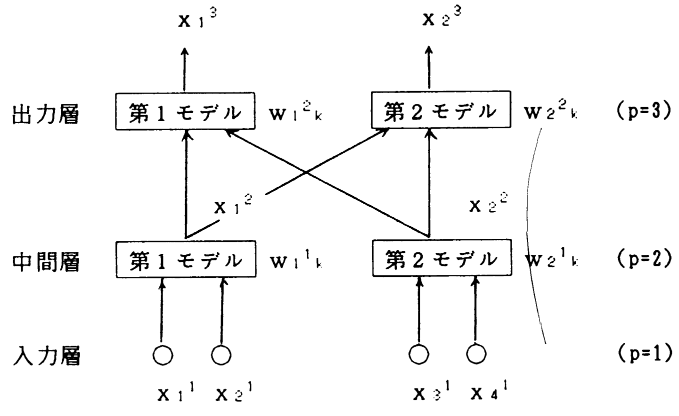


図１　階層的ファジィモデル

w_{ik}^{p-1} は第 p層第一モデルの k番目のルールの結論部実数値であり，x_i^p は第 p層の第iモデルの出力であり，かつ第 p+1層の入力でもある．$\mu_k^{p-1,i}$ は第 p層における第 iモデルの第 kルールの条件部適合度合を表す．誤差の評価関数を

$$E(w) = \frac{1}{2}\sum_i^2 (\ y_i^* - x_i^3(w))^2$$

とすると，以下のように誤差逆伝播学習則が導かれる．

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ik}^{p-1}} = \frac{\partial E}{\partial x_i^p}\frac{\partial x_i^p}{\partial w_{ik}^{p-1}} = \frac{\partial E}{\partial x_i^p}\frac{\partial}{\partial w_{ik}^{p-1}}\sum_m^4 \mu_m^{p-1,i}\ w_{im}^{p-1} = \frac{\partial E}{\partial x_i^p}\mu_k^{p-1,i} \quad (p=2,3\ ,\ i=1,2)$$

p=3，すなわち出力層では，

$$\frac{\partial E}{\partial x_i^3} = -(y_i^* - x_i^3) \qquad (10)$$

であるので，$\delta_i^3=y_i^*-x_i^3$ とすると，

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ik}^2} = -\ \delta_i^3\ \mu_k^{2,i} \qquad (i=1,2)$$

となる．また p=2，すなわち中間層では，

$$\frac{\partial E}{\partial x_i^2} = \sum_m^2 \frac{\partial E}{\partial x_m^3}\frac{\partial x_m^3}{\partial x_i^2} \qquad (i=1,2)$$

であり，上式を $-\delta_i^2$ とすると，(10)式を代入して

$$\delta_i^2 = \sum_m^2 \delta_i^3\frac{\partial x_m^3}{\partial x_i^2} \qquad (i=1,2)$$

したがって，学習則は常に

$$w_{ik}^{p-1}(t+1) = w_{ik}^{p-1}(t) + \delta_i^p\ \mu_k^{p-1,i} \qquad (11)$$

となる．

2.1 節の簡略推論の場合，第kルールにおける第i入力に対するファジィ集合のメンバーシップ関数は $A_{i,j(i,k)}$，ただし $j\in\{0,1\}$ であり，$A_{i,j(i,m,k)}^{p-1}(x_i^{p-1})$ は，第 p層における第mモデルの第 i入力の適合度合であるとする．出力 x_m^3 は，

$$x_m^3 = \sum_k^4 \mu_k^{2,m}\ w_{mk}^2$$

であり，

$$\mu_k^{2,m} = A_{1,j(1,m,k)}^2(x_1^2)\ A_{2,j(2,m,k)}^2(x_2^2)$$

であるので，

$$\frac{\partial x_m^3}{\partial x_i^2} = \sum\frac{\partial \mu_k^{2,m}}{\partial x_i^2}\cdot w_{mk}^2$$

たとえば，

$$\frac{\partial \mu_k^{2,m}}{\partial x_1^2} = \frac{\partial}{\partial x_1^2}\{\ A_{1,j(1,m,k)}^2(x_1^2)\}\cdot A_{2,j(2,k)}(x_2^2)$$

となる．

出力層の第 mモデルでは，

$$\frac{\partial}{\partial x_1^2}A_{1,0}^{2\ m}(x_1^2) = \frac{-1}{a_{1,1}^{2\ m} - a_{1,0}^{2\ m}}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_1^2} A_{i:1}^{2}{}^{m}(x_1^2) = \frac{1}{a_{i:1}^{2}{}^{m} - a_{i:0}^{2}{}^{m}}$$

である．ただし $a_{i:j}^{p-1,m}$ は第 p層の第 mモデルの第 i入力変数の左（j=0）または右（j=1）の節点を表す．

5．2 計算機によるシミュレーション

7入力1出力の階層モデルに複数個のパターンを学習させるパリティー問題のシミュレーションを行った．これは，入力パターン中の「＋1」の個数の偶奇を判定し，偶数のときには『－1』を，奇数のときには『＋1』を出力させる問題であり，ニューラルネットワークによるBP法，CONEアルゴリズムによるその改善[12,13]等が研究されている．

さて，2.1節のファジィモデルを用いる場合，7入力であればルールの総数は $2^7=128$ でありパラメータは 128 個必要である．しかし図1において中間層の第一モデルを4入力1出力，第二モデルを3入力1出力，出力層は第一モデルのみとした階層的ファジィモデルの場合パラメータ数は28個となる．

学習則は，(11)式にさらにモーメンタム項を加えた次式とした．

$$\Delta w_{i:k}^{p-1}(t+1) = \tau \delta_{i}^{p} \mu_{k}^{p-1,i} + \alpha \Delta w_{i:k}^{p-1}(t) \qquad (12)$$

また，ルール結論部の初期重みの値は乱数で与える必要があり区間[-0.5,+0.5]の値とした．入力パターンは順番に提示されるものとする．また，一通りのパターンの提示とそれに伴う修正を1学習サイクルとする．

学習の収束は出力誤差の二乗和

$E(w) = \Sigma (y^* - x_3(w))^2$

が 10^{-5} 以下になったときとする．

シミュレーション結果を表2に示す．シミュレーションの結果は異なった初期重みでの10回の平均値である．

表2 階層的ファジィモデルによるパリティ問題のシミュレーション結果

入力パターンの数	学習サイクルの数			
	文献[13]によるA-CONE $\eta=.01$ $\alpha=.5$ $\Delta\eta=.05$		階層的 Fuzzy model $\tau=.25$ $\alpha=.5$	
	出力誤差		出力誤差	
	$E=10^{-2}$	$E=10^{-5}$	$E=10^{-2}$	$E=10^{-5}$
10	33	85	11	24
15	37	91	35	47
20	46	109	11	27
25	63	132	20	43
30	55	125	16	28
35	92	173	19	32
40	114	203	23	37

表2より，"階層的ファジィモデル"は入力パターン数の増加にさほど影響されずに高速に収束することがわかる．ただし入力パターン数によっては，局所最小値に陥る場合もあった．本シミュレーションでは入力パターン数が 15，20の場合におおよそ 20回に 1回の割合で局所最小値に陥った．

参考文献

[1]池田；GMDHの基礎と応用 I－VIII；システムと制御，Vol.23, No.12(1979)-Vol.24, No.7(1980)

[2]市田，吉本；スプライン関数とその応用，教育出版，(1979)

[3]桜井；スプライン関数入門，東京電機大学出版局(1981)

[4]瀬戸山，川人，鈴木；多層神経回路網内に学習される逆ダイナミクスモデルによるマニピュレータの制御，電子情報通信学会技術研究報告，MBE 87-135，249/256(1989)

[5]渡辺，市橋；フィードバック誤差学習によるロボット・マニピュレータのファジィ制御，システム制御情報学会論文誌，Vol.3, No.7, pp.212-217(1990)

[6]D.E.Rumelhart，J.L.MacClelland；Parallel Distributed Processing, MIT Press (1987)

[7]市橋，渡辺；簡略ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習型制御，日本ファジィ学会誌，Vol.2, No.3(1990)

[8]渡辺，市橋；コンテナクレーンの学習型ファジィ制御，第34回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集，pp.61-62(1990)

[9]渡辺，市橋；逆ダイナミックス－逆キネマティクスモデルを学習するマニピュレータのファジィ制御，第6回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，Sep.6-8，明治大学(1990)

[10]菅野；ファジィ制御，日刊工業新聞社(1988)

[11]水本；ファジィ推論法による補間，第5回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，461/466(1989)

[12]福見，大松；新しいニューロンモデル"CONE"とその学習アルゴリズム，電気学会論文誌C，Vol.110-C, No.3, pp.191-197(1990)

[13]福見，大松，寺西；高速な収束特性を有するニューロンモデル「CONE」とそのパターン認識への応用，電子情報通信学会論文誌 D-11 Vol.J73-D-II, No.4, pp.648-653(1989)

謝辞

本研究でのコンピュータシミュレーションは大阪府立大学経営工学科中田智仁君に担当頂いた．また日頃からご指導頂いている田中英夫教授に深謝します．

問い合わせ先

〒591堺市百舌鳥梅町4-408

大阪府立大学工学部経営工学科

市橋秀友

TEL 0722-52-1161 EXT 2377 FAX 0722-59-3340

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

SC5-4

ファジィラベリング機能付き学習制御

LEARNING CONTROL WITH FUZZY LABELING

有川晴彦
Haruhiko ARIKAWA
アーク・テクノリサーチ株式会社
Ark Techno-Research Inc.

水本雅晴
Masaharu MIZUMOTO
大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication Univ.

Abstract : It is known very convenient that fuzzy control has allowed an operator to give instructions to a computer in linguistic expressions, while it is one-way or only from-man-to-computer. This paper proposes learning algorithm using neural_network_driven sub-normal membership functions and learning control with fuzzy labeling by which the computer returns the learning results to the operator in linguistic expressions.

１．はじめに

ファジィ制御の大きな利点の一つは、オペレータがコンピュータへ、言語値表現による制御ルールを与えることができるので、人間からコンピュータへのインターフェースが簡便となった点である。一方、ニューラルネット駆動型ファジィ推論[1]等の学習機能を有したファジィ制御の研究が近年多数報告されてきているが、その学習結果を、コンピュータからオペレータへ、言語値表現によって伝達する研究は未だ報告されていない。本論文は、ニューラルネット駆動非正規化メンバーシップ関数を用いた学習ファジィ制御を提案する。さらに、コンピュータがオペレータへ、その学習結果を言語値表現で返すことを目的とした、ファジィラベリング機能を提案する。また、そのハードウェア構成例を示す。

２．ニューラルネット駆動非正規化メンバーシップ関数による学習アルゴリズム

本論文における学習制御のアルゴリズムとして、各ルール後件部の非正規化メンバーシップ関数（ＳＭＦ：Sub-normal Membership Function for each consequent）をダイナミックに変化する方法を用いる（図１）。簡単化のために今、およそ正（Ｐ）、およそ零（Ｚ）、およそ負（Ｎ）の３種のファジィラベルが、前件部ＡとＢの２入力および後件部Ｃの１出力にそれぞれ定義されていると仮定する。この場合、従来のファジィ推論法によれば、組み合せにより設定可能な制御ルールの数は９（＝３×３）である。しかしながらもし、前件部が同じであるにも拘らず、後件部が異なるという矛盾した制御ルールを認めるとすれば、組み合せにより制御ルールの数は２７（＝３×３×３）が設定可能となる。ＳＭＦによる学習アルゴリズムでは、こうした設定可能なルールは便宜上始めから全て設定されていると仮定する。但しこれらＳＭＦの初期状態での最大値は、オペレータがルール設定を行えば１であり、ルール設定を行わないときは０である。

上記を具体例で説明する。例えばいまオペレータが次式の制御ルールを設定したとすると、

IF　A＝P　&　B＝P THEN　C＝Z　　(1)

学習が行われない初期の段階では、コンピュータの内部において図２の状態に定義される。すなわち、前式のＳＭＦの最大値は１に、次式のＳＭＦの最大値は０となる。

IF　A＝P　&　B＝P THEN　C＝P　　(2)
IF　A＝P　&　B＝P THEN　C＝N　　(3)

つまりオペレータは、前件部を同じくするが後件部は異なる(2)(3)式を設定していないにも拘らず、これらルールは便宜上仮想的に存在すると考える。但し、これらＳＭＦ最大値は０であるので、これらルールは存在しても、これらルールは存在しないのと等価である。

実際の制御においては、組み合せにより設定可能な全ルール（上記の例では２７）のＳＭＦの最大値を最適化するため、３層逆伝播型ニューラルネットワーク（ＮＮ：three-layer-backpropagation type Neural Network）により学習を行う。ここにＮＮへの入力は制御対象からの観測値であり、ＮＮからの出力はＳＭＦへの最大値である。出力が学習によってダイナミックに変化すれば、それに従ってＳＭＦの最大値が０～１閉区間で最適化され、その結果、初期にオペレータが設定した制御ルールの修正が行われる。

このことを(1)～(3)式のルールにのみ示したものが図３である。ＮＮによる学習の結果、図２の初期状態から図３の状態へと変化している。すなわち、(1)のＳＭＦの最大値が1.0から0.4へと減少し、(2)(3)のＳＭＦの最大値がそれぞれ0.0から0.7と0.2へ

増加したのである。

以上が、ＳＭＦによる学習アルゴリズムの概略である。学習により得られた制御ルールはそれ自体がファジィ化されている。ルールがファジィ化された利点の一つとして、より少ない数のファジィラベルを使って、より多くの言語値上の分解能を得られることが挙げられる。

３．ファジィラベリング機能による学習結果の表示

前節で得られた学習結果を、コンピュータがオペレータにファジィラベルを用いて表示する（これをファジィラベリング機能と称することにする）ために、前節(1)～(3)式のルールに限定して、次の①～③の方法を考えてみる。

① ファジィ化されたルールをそのまま表現する方法。つまり「Ｃ＝Ｐ」の発火度は７０％、「Ｃ＝Ｚ」は４０％、「Ｃ＝Ｎ」は２０％と表現する方法である。こうした表現は、前節の学習結果を正確に伝えるものであるが、必ずしも人間の理解力に対して最善の表現であるとは言えない。

② 最大発火度もしくはしきい値則を用いて「Ｃ＝Ｐ」と単純化して表現する方法。こうした単純化は人間レベルの会話ではしばしば用いられて、かつ有効な方法である。ただし、４０％の「Ｃ＝Ｚ」と２０％の「Ｃ＝Ｎ」を無視している。ここでＮＮによる学習の結果、オペレータが初期に設定した制御ルールに、言語値表現上の修正が行われた点に留意されたい。

③ 「Ｃ＝ＰＳ（Possitive Small)」とラベル数を増やして表現する方法。これはよりもっともらしい表現となる。このとき３－７ラベル変換（Ｎ・Ｚ・Ｐ → ＮＬ・ＮＭ・ＮＳ・ＺＲ・ＰＳ・ＰＭ・ＰＬ）を行うので、以下その変換法について述べる。まず図３で得られた学習結果のラベルを合成して、その重心Ｗを計算する（図４）。つぎにＮＬ～ＰＬの７ラベルのうち算出された重心Ｗと最も近い重心を持つラベルを選択し（この場合は図５よりＰＳのW_{PS}）出力ラベルとする。ただしそれは非正規化されて、領域Ｅ／Ｆの比（図５）は、領域e_1～e_3とf_1～f_3（図３）より次式で計算される。

$$\frac{E}{F} = \frac{2e_1+e_2+2e_3}{2f_1+f_2+2f_3} \qquad (4)$$

上式において右辺の係数２は、台集合両端のラベルを２倍に評価する必要があるためである。またより進んだ方法として、合成重心Ｗの近傍の、重心W_{PS}をもつラベルＰＳを選択するだけでなくて、ラベルＰＳを平行移動もしくは傾斜させてＷとW_{PS}を完全に一致させてもよい。これは、メンバーシップ関数の形状修正作業として、一般的にオペレータが行っているものの自動化と考えられる。

以上①～③の方法のうち、どれが最も適当な表現方法かは単純に決められないので、方法論決定のためのメタルールを使用することが考えられる。

本提案のファジィラベリング機能は、最終的にはコンピュータと人間オペレータ間のリアルタイムな対話による学習制御を想定しているのであり、そのための一ステップである。

４．ハードウェア構成

リアルタイムな学習制御を実現するために、高い推論実行速度とプログラム融通性を有するアドレスルックアップ仮想ページング方式[2]を採用する。ただし記憶素子はデュプレクス構成のＲＡＭモデュール[3]をマルチプレクサ等でトグルに切り換えて使用する。これは一方のＲＡＭモデュールが実際の制御に用いられている間、他方のモデュールに学習結果を書き込んで記憶内容を更新するものである。図６にその概略を示す。

５．おわりに

ニューラルネット駆動の非正規化メンバーシップ関数による学習アルゴリズムとファジィラベリング機能が提案された。前者において矛盾するルールを同時に容認する事は、現実の知識や現象が対立事象の平衡点として把握されうる性質を利用したものである。また後者の機能は、それ自体は表示の方法論に過ぎないが、コンピュータの学習結果を言語値で表現することの重要性を強調するものである。図７にその概念図を示す。

将来の課題として、本提案を応用した実際の制御システムの開発が挙げられる。そこではオペレータが与えた制御ルールを最適化するだけでなく、制御目的を与えれば試行学習を行って、言語値レベルの制御ルールを自動生成するシステムも含まれる。

参考文献

[1] 林勲・野村博義・若見昇：ニューラルネット駆動型ファジィ推論による倒立振子の学習制御，第５回ファジィシステムシンポジウム予稿集，pp.183-187, Kobe Japan.(1989)

[2] 有川晴彦・廣田薫：アドレスルックアップ仮想ページング方式によるファジィ推論チップ，計測自動制御学会論文集，Vol 20.2 pp.180-187, (1990)

[3] H. Arikawa, T. Hinami & M. Mizumoto,"Real-Time Fuzzy Control System & A Fuzzy Board-Controller",Proc. NAFIPS Congress, pp.350-353, Toronto Canada.(1990)

問い合せ先：〒600 京都市下京区中堂寺南町１７
京都リサーチパーク・アネックス内
株式会社アイ・エム・エー（研究所）
有川 ／ 田中
TEL 075-315-8641 FAX 075-315-8642

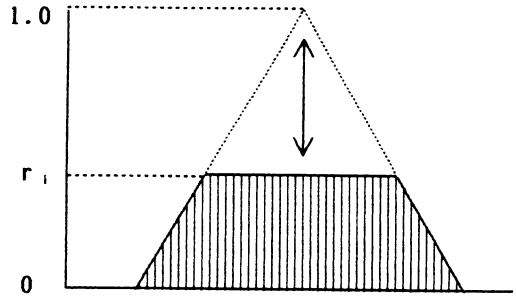


図１．非正規化メンバーシップ関数

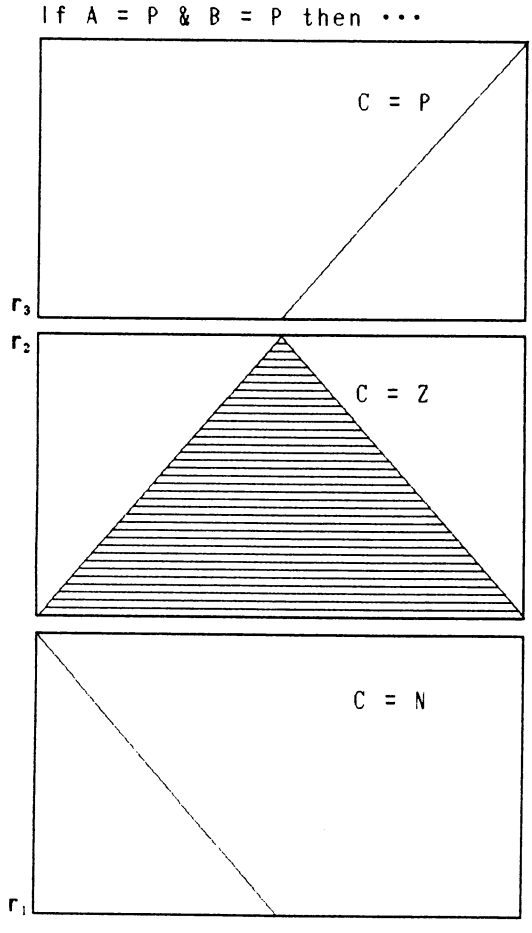


図２．学習前の初期状態の例

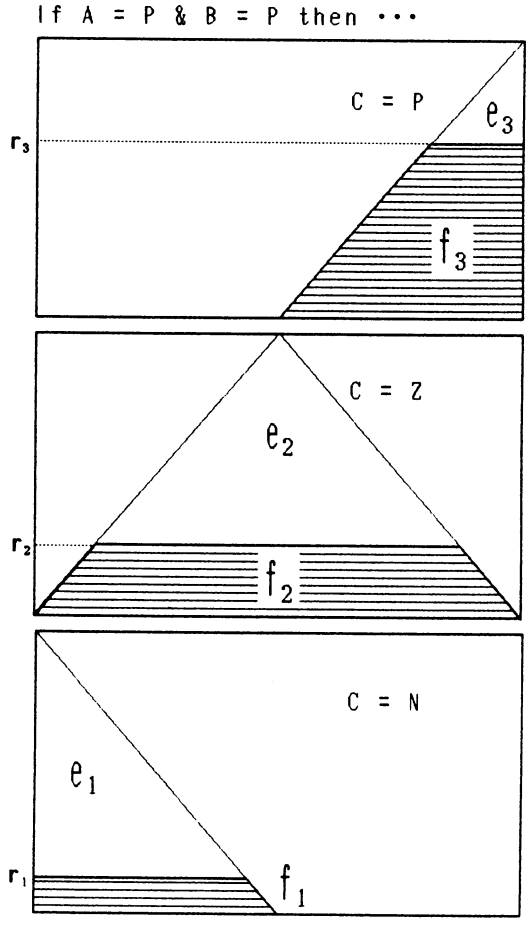


図３．学習完了後の非正規化メンバーシップ関数の例

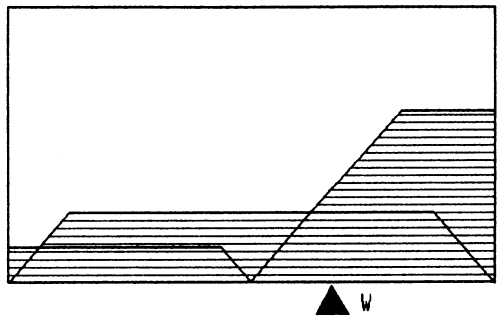


図４．非正規化メンバーシップ関数の合成と重心の計算

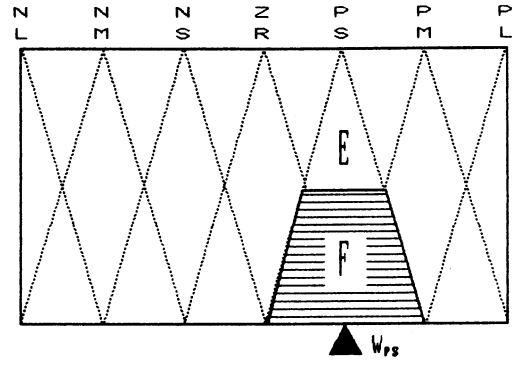


図５．ラベル数３から７への変換と選択ラベルの非正規化

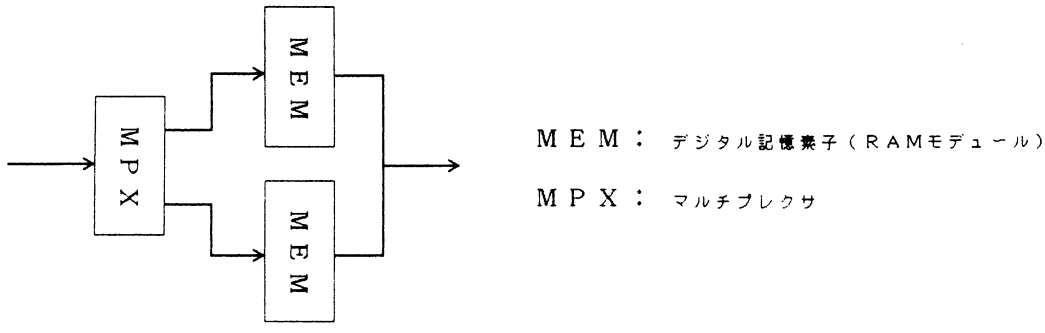


図６．デュプレクスＲＡＭモデュール

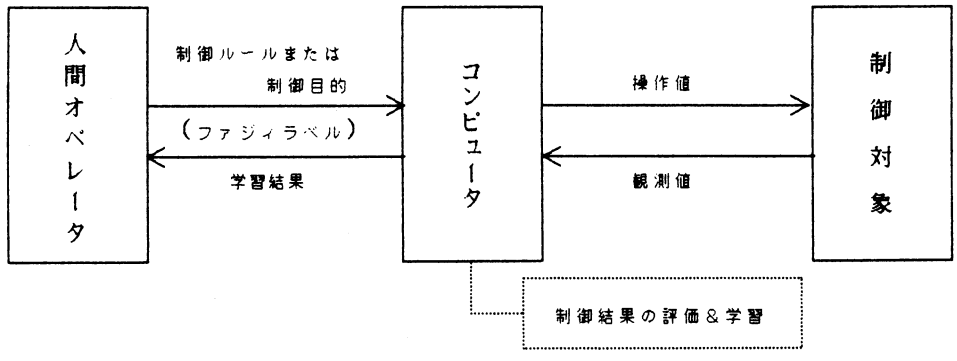


図７．ファジィラベリング機能付き学習制御の概念図

デモンストレーションセッション論文

ｾｯｼｮﾝ ＤＭ１　〔デモンストレーション紹介〕

司会　鈴木 一如 （国際ファジィ工学研究所）

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

DM1-2

シミュレーションゲームへのファジィ理論の適用

Application of Fuzzy Theory to Simulation Games

広内哲夫　　宮川裕之

Tetsuo HIROUCHI　　Hiroyuki MIYAGAWA

文教大学　情報学部

Fuculty of Information and Communication, BUNKYO University

Abstract : The best way for beginners to learn fuzzy theory is to make use of simulation games which fuzzy inference is applied to. In this paper, we explain two simulation games for the beginners. One is the simulation game of a missile horming a target, another is that of a car automatically controlling its own position and velocity. The fuzzy inferene engine has three types of simple membership functions, and it can calculate exact position,velocity and etc.

1　はじめに

現在，産業の分野，特に制御の分野で，ファジィ理論の応用が盛んに進められ，多くの成果が生み出されている．一方，経営管理に於けるエキスパートシステム構築の際の管理者からの経験やノウハウの収得，あるいは心理学に於けるアンケート調査の際の一般の人々からの意見の収集の時に，あいまいさの処理を含むことから，ファジィ理論の応用が期待されている．

ファジィ理論では，メンバーシップ関数が微妙であり，その取り扱いによっては，結果に大きな影響が出る．従って，その理論の適用に当たっては，その点を充分認識しておく必要がある．このような観点から，筆者はファジィ理論の特性や有効性を初心者が視覚的に習得することが出来るシミュレーションゲームを開発したので報告する．本論文では，目標物体を正確に追尾するミサイル，および位置／速度／停止を自動的に制御する自動車のシミュレーションゲームについて述べる．これらのゲームは，ファジィ推論に基づくファジィ制御の応用であり，その結果はコンピュータグラフィックスによる動的な図形として描き出される．

2　ファジィ推論法

本論文で用いたファジィ推論の方法はマムダニによって用いられたファジィ関係の合成則に基づくものである[1]．システムの状態に関する情報をｘ，ｙ，システムへの入力をｚとすると，システムを制御するｎ個からなるファジィ制御規則は次のように表わされる．

$$\text{if } x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i \text{ then } z \text{ is } C_i \quad (i=1,2,\cdots,n)$$

ここで，A_i，B_i，C_iは言語ラベルの付いたファジィ集合に対するメンバーシップ関数である．前件部変数ｘ，ｙに対する入力がクリスプな値x_0，y_0である時，後件部変数ｚに対してのクリスプな出力値z_0は，次の手続きによって求める．これはマムダニの方法を若干改良したものである．

(1)クリスプな入力値（x_0，y_0）に対する規則ｉの前件部の適合度w_iを求める．

$$w_i = A_i(x_0) \cdot B_i(y_0)$$

(2)適合度w_iを規則ｉの後件部に作用させて，規則ｉの推論結果$C_i^*(z)$を求める．

$$C_i^*(z) = w_i \cdot C_i(y)$$

(3)規則１から規則ｎまでがＯＲ結合されているとして，ｎ個の規則により合成された推論結果$C^\circ(z)$を求める．以下の式の∨はｍａｘ演算である．

$$C^\circ(z) = \bigvee_{i=1}^{n} C_i^*(z)$$

(4)推論結果として得られたファジィ値$C^\circ(z)$を操作量としてのクリスプ値（z_0）に変換する．

$$z_0 = \frac{\int C^\circ(z)\, z\, dz}{\int C^\circ(z)\, dz}$$

3　ミサイルの追尾制御

3．1　シミュレーションゲームの内容

２次元の防空空域に侵入した敵機をミサイルで迎撃するシミュレーションゲームである．敵機は一定の速度のもと

で飛来するが，ゲームをする人はミサイルの速度と発射時間を与えて，敵機を迎撃する．

3．2　追尾の方法

ミサイルの敵機に対する追尾角度（θ_h）は，平面幾何学による簡単な計算から求めた理論角度（θ_t）にファジィ推論を適用して求め直したファジィ角度（θ_f）を用いた．そしてそのファジィ角度を用いて追尾シミュレーションを行うこととした．

$$\theta_f \leftarrow \theta_t$$
$$\theta_h = \theta_f$$

3．3　ファジィ制御規則

敵機を追尾するミサイルの飛行を制御するファジィ制御規則は次の3つを用いた．

規則1：if　敵機が前方「右手方向」に存在する
　　then　ミサイルは「右手方向」に飛行角度をとれ
規則2：if　敵機が前方「ほぼそのままの方向」に存在する
　　then　ミサイルは「ほぼそのままの方向」で飛行せよ
規則3：if　敵機が前方「左手方向」に存在する
　　then　ミサイルは「左手方向」に飛行角度をとれ

規則の前件部，後件部において言語ラベル「右手方向」，「左手方向」，「ほぼそのままの方向」の付いたファジィ集合を定義するメンバーシップ関数は，通常，良く用いられる三角型とした．（なお，本論文で用いた他のメンバーシップ関数もすべて三角型とした）．

3．4　結果

上記の規則を用いたシミュレーションプログラムを走らせ，ミサイルの追尾の理論角度（θ_t）と，ファジィ角度（θ_f）について，次式

$$\theta_f \fallingdotseq \theta_t \qquad (-40° \leqq \theta_t \leqq +40°)$$

が成立するように，メンバーシップ関数の形状を定めた．迎撃成功はミサイルが敵機に1単位時間に飛行する距離（1単位距離）の二分の一以内に近付くことが出来たときとした．

敵機はミサイルの防空空域を1単位時間当り2単位距離で飛行し，そこを100単位時間で横断することとした．この条件で，ミサイルの飛行速度が低速（1単位時間当り4単位距離以下）の場合を除いて，ほとんどが1％前後の誤差で，ミサイルは敵機を撃墜することが出来た．

4　自動車の走行制御

4．1　シミュレーションゲームの内容

自動車をリングコース上で与えられた位置と速度を保って走行させ，与えられた停止線の直前で自動的に止めるシミュレーションゲームである．すなわち，ファジィ推論による位置制御，速度制御，停止制御を行うゲームである．これらの制御は相互に関係し合っている．ゲームを行う人は目標速度，停止間隔，スタート位置を与える．

4．2　位置制御

位置を制御するモデルは，「リングコースの中央にガイドウエイ（目標位置）が設置されており，自動車はガイドウエイからの距離を測定し，その距離からのズレに応じて進行方向の角度を決定する」というものである．このためファジィ制御規則として次の4つを用いた．

規則1：if　目標位置が「右手遠く」に存在する
　　then　「右手方向に大きく」回転して進め
規則2：if　目標位置が「右手近く」に存在する
　　then　「右手方向に小さく」回転して進め
規則3：if　目標位置が「ほぼそば」に存在する
　　then　「ほぼそのまま」進め
規則4：if　目標位置が「左手近く」に存在する
　　then　「左手方向に小さく」回転して進め
規則5：if　目標位置が「左手遠く」に存在する
　　then　「左手方向に大きく」回転して進め

現時点iの車の位置（x_i，y_i）と目標位置（x_o，y_o）からズレの距離（r_i）を求め，そのズレから上記の規則を用いて車の進行角度（θ_i）を推論し，その時の速度（v_i）を用いて次の時点i＋1の車の位置（x_{i+1}，y_{i+1}）を算定する．

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2}$$
$$\theta_i \leftarrow r_i$$
$$\left.\begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + v_i \cdot \cos\theta_i \\ y_{i+1} &= y_i + v_i \cdot \sin\theta_i \end{aligned}\right\}$$

4．3　速度制御

速度の制御は加速機（アクセル）の働きをモデルにした．すなわち，目標速度と加速度に応じ加速機を踏んだり緩め

たりして速度を調節するものとした．このために用いたファジィ制御規則は次の７つであるが，これは山川の「倒立振子」の規則を速度調節に合うように簡易化したものである[2]．

規則１：ｉｆ　目標速度を越えており，加減速はほぼない
　　ｔｈｅｎ　加速機を緩めよ
規則２：ｉｆ　目標速度を越えており，加速されている
　　ｔｈｅｎ　加速機を緩めよ
規則３：ｉｆ　目標速度を越えており，減速されている
　　ｔｈｅｎ　加速機はほぼそのままにせよ
規則４：ｉｆ　目標速度にほぼ達しており，加減速はほぼない
　　ｔｈｅｎ　加速機はほぼそのままにせよ
規則５：ｉｆ　目標速度に達しておらず，加速されている
　　ｔｈｅｎ　加速機はほぼそのままにせよ
規則６：ｉｆ　目標速度に達しておらず，減速されている
　　ｔｈｅｎ　加速機を踏み込め
規則７：ｉｆ　目標速度に達しておらず，加減速はほぼない
　　ｔｈｅｎ　加速機を踏み込め

現時点ｉの速度（v_i）と前時点ｉ－１の速度（v_{i-1}）から，現時点の目標速度（v_o）との差（$v_i - v_o$）と加速度（$v_i - v_{i-1}$）を求め，それらの値に上記の規則を適用して次の時点ｉ＋１のための加速機の出力（p_{i+1}）（最大値は１，最小値は０）を推論し，その出力から次の時点の加速速度（$k * p_{i+1}$；ｋは加速定数であり１単位時間当り２単位距離の値を採用）を求め，その時点の速度（v_{i+1}）を算定する．

$$p_{i+1} \leftarrow (v_i - v_o) \text{ and } (v_i - v_{i-1})$$
$$v_{i+1} = v_i + k \cdot p_{i+1}$$

４．４　停止制御

停止を制御するモデルは「停止区間内に車が進入すると，停止線からの距離に応じて徐々に減速し，停止線直前で完全なブレーキが働く」というものである．このためのファジィ制御規則として，次の４つを用いた．

規則１：ｉｆ　車は停止区間の「初めの付近」に存在する
　　ｔｈｅｎ　速度を「やや」落とせ
規則２：ｉｆ　車は停止区間の「まん中付近」に存在する
　　ｔｈｅｎ　速度を「十分に」落とせ
規則３：ｉｆ　車は停止線に「十分近い所」に存在する
　　ｔｈｅｎ　速度を「ほとんど」落とせ
規則４：ｉｆ　車は停止線の「直前の所」に存在する
　　ｔｈｅｎ　速度を「ゼロ」にせよ

規則４の場合，後件部が「速度がゼロ」というクリスプ命題を含んでいる．この規則は，実際のシミュレーションプログラムでは規則３で代用した．従って，規則３の後件部の「速度をほとんど落とせ」というファジィ命題のファジィ集合に対するメンバーシップ関数の形状に工夫を凝らした．

現時点ｉの車の位置（x_i，y_i）と停止線の位置（x_o，y_o）を用いて車の停止線からの距離（d_i）を求め，その距離に上記の規則を適用し，次の時点ｉ＋１の車の速度（v_{i+1}）を推論する．

$$d_i = x_o - x_i$$
$$v_{i+1} \leftarrow d_i$$

なお，実際の自動車の場合，停止区間が短い場合には，急ブレーキをかけても止まらない．本シミュレーションにおいても，停止区間内において進入速度が速すぎる場合には，車は停止線をオーバーすることになる．そこで，このような場合が生じたら，停止線を形式的に進行方向側に延ばして設定し直し，さらに再度，停止のためのファジィ推論を適用することとした．

４．５　結果

位置制御に関しては，画面で見る限り，リングコースの中央位置を保ちながら走行をスムーズにコントロールすることができた．速度制御に関しては，目標速度を与えると，その速度を誤差なく達成することができた．また，停止制御に関しては，停止区間に妥当な速度で進入すれば，徐々に減速しながら停止線前約０．５単位距離の地点で停止することが出来た．なお，コースの一周は５７４．１６単位距離である．

ファジィ制御と同様なクリスプ制御機構のもとで，クリスプ制御規則（位置，速度，停止の各制御における規則数はそれぞれ２３個，２１個，２１個）を用いた走行制御を行ってみたが，ジグザグ走行となり，目標速度の正確な達

成は不可能であり，しかも停止線直前での停止は困難であった．

5　おわりに

本論文で示したミサイルと自動車のシミュレーションゲームは，簡単なファジィ理論の応用ではあるが，この理論の有効性を見定めることが出来るものと思われる．筆者もファジィ理論の学習は初めてであったが，今後は，経営管理や財務管理などのためのファジィエキスパートシステムの構築に適用しようと思っている．

(1)菅野道夫，「ファジィ制御」，日刊工業新聞社，
１９８８年．
(2)山川　烈，［Ｆｕｚｚｙコンピュータの発想」，講談社
１９８８年．

問い合わせ先：〒253　神奈川県茅ケ崎市行谷1100
文教大学情報学部情報システム学科
広内哲夫
tel　0467-53-2111　ext. 333
fax　0467-54-5720

DM1-3

ファジィ制御設計支援ソフトFUZZIC-1, AMADEUS

FUZZY CONTROL DESIGN AID - FUZZIC-1, AMADEUS

博田忠邦　　増田次郎
Tadakuni HAKATA　　Jiro MASUDA
三菱原子力工業株式会社
Mitsubishi Atomic Power Industries, Inc.

Abstruct : PC-Based Fuzzy Control System Design Aid Tools, FUZZIC-1 and AMADEUS have been developed. FUZZIC-1 can be used for development and design of Fuzzy control system. Wide variaty of membership functions, Fuzzy rules and defuzzification methods with graphical display are available, and high-degree fuzzy control system can be developed by this soft. AMADEUS is a tool for developing simulation programs by interractive input of simulation modules on CRT display. Both programs are written by Quick-BASIC.

1. はじめに

ファジィ制御システムには、比較的簡単なものから、かなり複雑で高度なものまでが研究されているが、比較的高度なファジィ制御システムの設計開発を支援する実用的ファジィ設計開発支援ツール FUZZIC-1 を作成した。FUZZIC-1 は PC上での次の機能を持っている。

1) ファジィデータ作成エディター
2) 多様なメンバーシップ関数の利用
3) 効率的かつ多様で多層構造のルールの作成利用
4) 感度解析、演算の分析、表示機能
6) シミュレーションとの連携演算機能

また、ファジィシステムの開発では、制御対象のシミュレーションが必要である。モジュールを使用し、PC の CRT 上でシステムのダイヤクラムを作成することで、シミュレーションが容易に作成でき、演算型できる支援ソフト AMADEUS も開発した。

これらのソフトにより、高度なファジィ制御システムの開発が支援出来る。以下に、主要な機能を説明する。

2. FUZZIC-1 の概要

FUZZIC-1 は、Quick BASIC で書かれたソフトで、PC-9800 シリーズ及びその互換機で使用できる。ファジィデータ作成支援プログラム FUZD1 と 主プログラムFUZM1 および、シミュレーション作成プログラム FUZC1 からなる。主要な機能は次ぎの通りです。

2.1 ファジィデータの作成

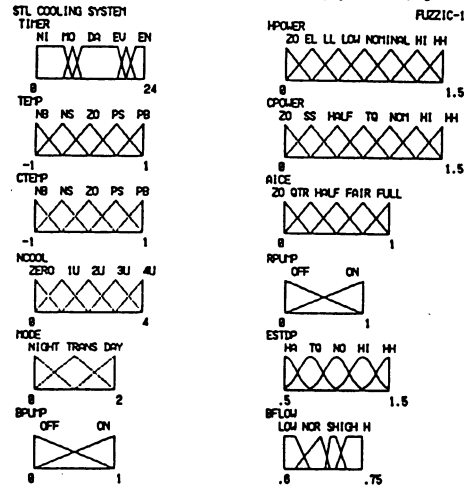
メンバーシップ関数、ファジィルールは支援に従いオプション形式で定義していく。

2.1.1 メンバーシップ関数の定義

次ぎの形が選択できます。

MSFの形	形状	備考
3 (TRIANGE)	三角形	離散型、連続型
3S(〃)	三角形標準型	離散型、連続型、d関数
4 (TRAPEZOID)	台形	離散型、連続型
4S(〃)	台形標準型	〃 、 〃
B (BELL)	釣り鐘状	〃 、 〃
BS(〃)	釣り鐘状標準型	〃 、 〃
POLYNOMIAL	多角形	〃 、 〃

下記は、メンバーシップ関数の例である。



2.1.2　ルールデータの作成

作成支援によりルールデータを作成する。ルールは、主として、IF-THEN 形式によるが、下記を任意の位置に含めることが出来る。

イ）IF-THEN ルール

AND, OR, THEN IF の論理計算

前件部 4 理論演算、後件部定義　4 個まで

前件部に、=, <, >, <> が使用できる

ベクトル、マトリックス表現が可能

ファジィ入力が可能(離散型)

後件部にシングルトン、式の指定が可能

ロ）関数(一次遅れ、微分、積分、純粋時間遅、加減算)

ハ）BASIC Statement（任意の BASIC の Statement）

5 グループまでのルールグループを、カスケードに接続した多層構造のルールが作成できる。これらの多様な機能により、利用者の希望するルールが、効率的に作成できる。ルールの数は、多機能化した表現の活用により、通常の場合の 1/2 から 1/5 とできる。

2.3 ファジィ推論と非ファジィ化

ファジィ推論の論理演算は、Max-Min, Min-Max, 加算ー乗算が選択出来る。非ファジィ化には、重心法、面積法、高さ法が選択できる。 ルールの確信度の入力、離散型のヒステリシスの設定が可能である。

2.4 ファジィ演算の支援

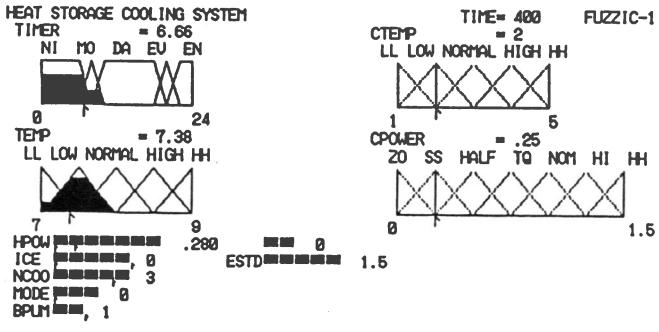
下記が用意されている。

イ）ファジィデータの変更: メンバーシップ関数の変更（三角形、台形、釣り鐘状の相互、離散型ー連続型の相互変更、ファジィ幅、スパンの変更）

ロ）ルールのダイヤグラム自動作成表示

ハ）感度解析

ニ）演算結果のグラフィック表示。例を次ぎに示す。




```
D. RULE FOR MODE: R6 IF TIMER=NIGHT  OR TIMER=ENIGHT THEN MODE=NIGHT
D. RULE FOR BPUMP:  R3 IF HPOWER=MSF THEN CPOWER=ZO  SS HA TQ NO HI HH
D. RULE FOR RPUMP: R16 IF MODE=NIGHT  OR MODE=TRANS  THEN BPUMP=ON : RPUMP=OFF
```

3. AMADEUS の概要

AMADEUS は、シミュレーションプログラムの作成を支援するソフトで、次ぎの機能をもつ。

1）シミュレーションプログラムを作成する場合に、C, FORTRAN, BASIC, 等の言語で記述するのが一般的であるが、AMADEUS では、プログラム言語によらず、PC 画面上で、対話形式によってシミュレーションが作成でき、演算することができる。

2）シミュレーションに必要な要素は、下記に示すものを含め、殆ど全てのものが装備されている。

イ）時間関数(積分、微分、一次遅れ、無駄時間等)

ロ）非線形要素(リミッター、不感帯、バックラッシュ等)

ハ）ロジック要素(AND, OR, タイマー等)

ニ）制御器(PI, ON-OFF 等)

ホ）入力関数(ステップ、ランプ、方形波、パルス列等)

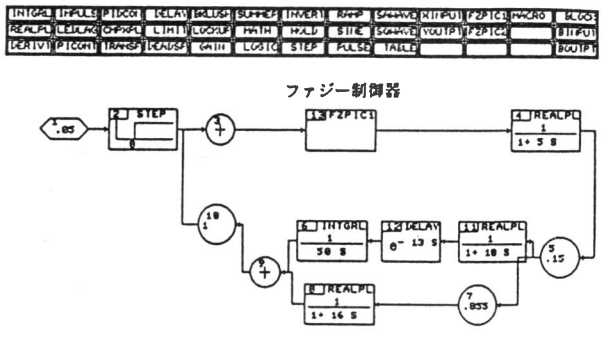
上記の演算要素をモジュールとして、任意に組み合わせて、任意のシミュレーションが作成できる。

3）ファジィ制御器のモジュールもあり、ファジィを含むシミュレーションと制御系の模擬を作成し、演算することができる。

以上が、AMADEUS の主要な機能であるが、先に述べたソフト FUZZIC-1 と組み合わせて使用することにより、高度なファジィ設計開発を効率良く行うことができる。

次ぎの図は、作成したシミュレーションのダイヤグラムの例である。

制御回路構成の例



ファジー制御器

問い合わせ先:

〒 105 東京都港区芝公園 2-4-1

三菱原子力工業(株) 制御安全設計部　博田忠邦

TEL 03-433-8251(代)

DM1-4

カラーコピー系における感性を考慮したファジィ画像処理

HUMAN SENSORY PERCEPTION ORIENTED FUZZY IMAGE PROCESSING IN COLOR COPY SYSTEM

福島　清司　　藤原　義久　　源野　広和　　蚊野　浩　　米田　広一
Kiyoshi FUKUSHIMA　Yoshihisa FUJIWARA　Hirokazu GENNO　Hiroshi KANO　Hiroichi YONEDA
三洋電機株式会社　制御システム研究所
SANYO Electric Co.,LTD. Control & Systems Research Center

Abstract: Various image processing methods have been developed for precise reproduction of original image input data in a color copy system. Image processing methods which also give consideration to human sensory perception are required to obtain printed samples that look better than the originals.

This paper introduces a sensory image processing method which uses 'fuzzy logic' enabling image control based on sensory perception and the quantification of sensory perception, in order to reproduce more desirable face skin tone which is the most important in color reproduction.

1．はじめに

従来からカラーコピー系においては、入力された原画像のデータを忠実に再現するための種々の画像処理手法が開発されてきた。しかし、原画像よりも美しいと感じるプリントサンプルを得るためには、人間の感性を考慮した画像処理手法が必要となってくる。

今回、カラー記録で最も重要とされる顔色を好ましく見せることを目的として、ＳＤ（Semantic Differential)尺度を用いた官能検査の結果を数量化理論Ｉ類を用いて分析して顔色の人の感性に与える影響を定量化した後、ファジィ理論を用いて顔色領域の抽出および色調整を行う手法を開発したので報告する。

2．画像処理系

図１に本画像処理系を示す。カラー原稿はカラースキャナによりＲＧＢ値に分解され、ＣＩＥ（国際照明委員会）のＸＹＺ，$L^*a^*b^*$系を経由して$L^*a^*b^*$系の極座標空間である$L^*C_{ab}^*H_{ab}^\circ$系 空間（図２）の値に変換される。そして、すべての画像処理は、この$L^*C_{ab}^*H_{ab}^\circ$値上で行なわる。処理されたデータは再度ＲＧＢ値に変換された後、ＣＭＹ色信号としてカラープリンタに出力される。

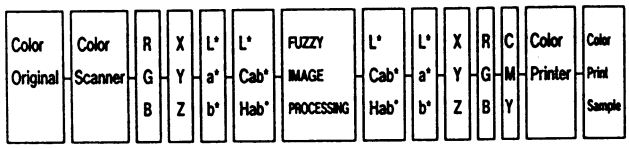


図１．画像処理系

図２に$L^*C_{ab}^*H_{ab}^\circ$系空間を示す。この空間においてＬ* 値、C_{ab}^*値、H_{ab}° 値は、それぞれ色彩の３属性である明度、彩度、色相の値を表している。[1]

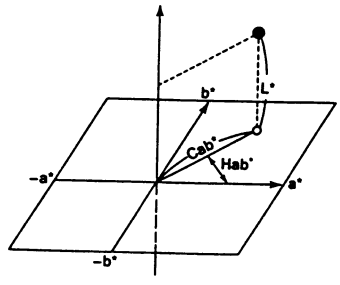


図２．$L^*C_{ab}^*H_{ab}^\circ$空間

3．感性の定量化

人間の感性を考慮した画像処理を行うためには色彩の人間の感性に及ぼす影響を定量化する必要がある。今回は、ＳＤ尺度を用いた官能検査の結果を数量化理論Ｉ類を用いて分析することにより色彩の人の感性に及ぼす影響を定量化した。

3.1 官能検査

今回、２４枚の肌色に相当する$L^*C_{ab}^*H_{ab}^\circ$ 値の異なる色パッチをマンセルパッチの中から選択した。そして、図３に示すような顔の肌色部分のみが透明なスライドを透し被験者５０名に観察してもらい、各パッチから受ける印象を図４に示す５段階のＳＤ尺度を用いて評価することにより人の顔色が人の感性に及ぼす影響を調査した。

図３．スライド

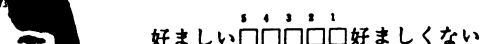


図４．ＳＤ尺度

3.2 数量化理論Ｉ類

数量化理論Ｉ類は複数個の定性的属性X_{ij}（説明変数）から１つの定量的変数Ｙ（目的変数）を式（１）のような多変量解析式を用いて予測する方法である。

$$Y = b_0 + b_{11}X_{11} + b_{12}X_{12} + \cdots\cdots + b_{1p}X_{1p}$$
$$+ b_{21}X_{21} + b_{22}X_{22} + \cdots\cdots + b_{2q}X_{2q}$$
$$+ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$+ b_{n1}X_{n1} + b_{n2}X_{n2} + \cdots\cdots + b_{nr}X_{nr} \qquad (1)$$

b_{ij}：スコア

この（１）式において、b_{ij}値はスコアと呼ばれ、対応する説明変数X_{ij}が目的変数Ｙ値に対してどの程度影響しているのかを示している。

今回、人がどんな顔色に対して好ましく感じるのかを明確化するために官能検査の結果得られた１２００のデータ（２４パッチ×５０名）をこの数量化理論Ｉ類を用いて分析した[2]。具体的には、ＳＤ尺度上での評価値を目的変数Ｙに、パッチのもつＬ* 値、C_{ab}^*値、H_{ab}°値をそれぞれ説明変数として分析を行

った。分析の結果得られたH$_{ab}$° 値におけるスコアをグラフ化したものを図５に示す。

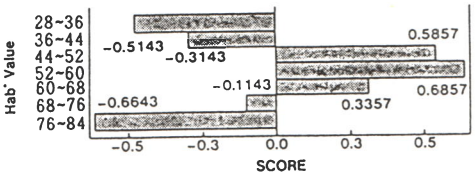


図５．H$_{ab}$° 値におけるスコア

図５においてスコアの値が大きくグラフが右に伸びている説明変数ほど好ましい印象を与えていることを示している。すなわちH$_{ab}$°値で５２～６０ が最も好ましい顔色であることが判明した。L* 値、C$_{ab}$* 値においても同様に分析した結果L* 値で７５～８５、C$_{ab}$* 値で１５～２５が最も好ましい印象を与えていることが判明した。

４．ファジィ画像処理

ファジィ理論を用いて顔色領域の抽出および色変換を行った。

4.1 顔色領域の抽出

各種入力顔画像の顔色の分布領域を分析した結果、１０＜L*＜９０，５＜C$_{ab}$*＜５５，－２０＜H$_{ab}$°＜９０の領域であった。この顔色は、さらに黄みを帯びた部分、赤みを帯びた部分、陰の部分等に分割できる。これらの領域を抽出するために、L*C$_{ab}$*H$_{ab}$° の顔色分布領域をそれぞれ３分割したメンバーシップ関数を定義した。図６に、H$_{ab}$°値におけるメンバーシップ関数を示す。

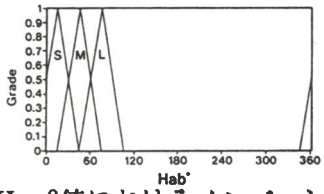


図６．H$_{ab}$°値におけるメンバーシップ関数

4.2 ファジィルール

表１にファジィルールを示す。このルールは、官能検査の結果を基準として設定したが、全ての顔色領域を一様に「好ましい顔色」の領域に変換したとすれば画像としての意味をなさなくなる。したがって各領域ごとの特徴を考慮し、最適なルールを作成した。

表１．ファジィルール

FUZZY-RULE FOR L*

	Cab* Large			Cab* Middle			Cab* Small		
	Hab' Small	Hab' Middle	Hab' Large	Hab' Small	Hab' Middle	Hab' Large	Hab' Small	Hab' Middle	Hab' Large
L* Small	+5	+5	+5	0	0	0	0	0	0
L* Middle	+8	+8	+8	+8	+8	+8	+8	+8	+8
L* Large	+3	+3	+3	+3	+3	+3	+3	+3	+3

FUZZY-RULE FOR Cab*

	Cab* Large			Cab* Middle			Cab* Small		
	Hab' Small	Hab' Middle	Hab' Large	Hab' Small	Hab' Middle	Hab' Large	Hab' Small	Hab' Middle	Hab' Large
L* Small	0	0	−3	0	0	0	0	0	0
L*Middle	+10	+10	−10	+10	+10	0	0	0	0
L* Large	0	0	−3	0	0	0	0	0	0

FUZZY-RULE FOR Hab*

	Cab* Large			Cab* Middle			Cab* Small		
	Hab' Small	Hab' Middle	Hab' Large	Hab' Small	Hab' Middle	Hab' Large	Hab' Small	Hab' Middle	Hab' Large
L* Small	+28	+10	−14	+28	+10	−14	+14	+5	−7
L* Middle	0	0	−14	0	0	−14	+28	+10	−14
L* Large	+28	+10	−14	+28	+10	−14	+28	+10	−14

4.3 ファジィ画像処理

実際のファジィ推論を用いた色変換量の算出法を以下に示す。尚、このファジィ推論には、ルックアップテーブル方式の簡略化ファジィ推論方法[3] を採用した。L*C$_{ab}$*H$_{ab}$° 値における色変換量をそれぞれ△L*、△C$_{ab}$*、△H$_{ab}$° とすると△L*、△C$_{ab}$*、△H$_{ab}$°は以下の式で算出される。

$$\triangle L^* = \sum_{i=1}^{27} (\mu_i \cdot \triangle L^*_i) \Big/ \sum_{i=1}^{27} \mu_i \qquad (2)$$

$$\triangle C_{ab}^* = \sum_{i=1}^{27} (\mu_i \cdot \triangle C_{ab}^*{}_i) \Big/ \sum_{i=1}^{27} \mu_i \qquad (3)$$

$$\triangle H_{ab}^\circ = \sum_{i=1}^{27} (\mu_i \cdot \triangle H_{ab}^\circ{}_i) \Big/ \sum_{i=1}^{27} \mu_i \qquad (4)$$

$$\mu_i = \min\{\mu_{Li}(L^*), \mu_{Ci}(C_{ab}^*), \mu_{Hi}(H_{ab}^\circ)\} \qquad (5)$$

ただし $\mu_{Li}(L^*)$:grade of L* for No.i rule
$\mu_{Ci}(C_{ab}^*)$:grade of C$_{ab}$* for No.i rule
$\mu_{Hi}(H_{ab}^\circ)$:grade of H$_{ab}$° for No.i rule
ΔL^*_i :L* output by No.i rule
$\Delta C_{ab}^*{}_i$:C$_{ab}$* output by No.i rule
$\Delta H_{ab}^\circ{}_i$:H$_{ab}$° output by No.i rule

4.4 画像処理結果

図７にオリジナル画像、図８に画像処理後の画像のサンプルを示す。画像処理後のサンプルの方が明らかに好ましい顔色の印象を与えている。

図７．オリジナル

図８．処理後

５．おわりに

本報告では、感性の定量化手法、およびその結果を考慮したファジィ色変換手法を実現した。

この手法により、種々の色から構成される顔色等の色変換を、種々の色それぞれの重みを考慮し、かつ色空間の連続性を崩さずに行うことが可能となった。

６．参考文献

（１）日本色彩学会：色彩科学ハンドブック
（２）長町三生：「感性工学」、海文堂（１９８９）
（３）市橋，田中：「ＰＩＤとＦＵＺＺＹのハイブリッド型コントローラ」、第４回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、９７／１０、（１９８８）

問い合わせ先：〒573　大阪府枚方市１－１８－１３
三洋電機（株）制御システム研究所
メカトロデバイス研究室　福島　清司
TEL　0720-41-1284(ダイヤルイン)（内線 613）
FAX　0720-41-1416

DM1-5

ファジィ多変量解析パッケージについて

The Fuzzy Multivariate Analysis Package

吉岡雅人　秋元　武　森本正昭
Masato YOSIOKA　Takeshi AKIMOTO　and　Masaaki MORIMOTO
㈱プラスアイ・システム　㈱プラスアイ・システム　㈱電通
PRASAI·System INC.　PRASAI·System INC.　and　DENTSU INC.

Abstract:We developed to the Fuzzy Multivariate Analysis Package. This Package is very useful for the Fuzzy data procedure to Non enginiering areas. And it is consisted of four methods that is the Multiregression Analysis, Quantification Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ. It is worked on the MS-DOS and NEC PC-9801 Series of the Personal Computers.

1．はじめに

最近ファジィの応用分野が急速に広まってきており、特に制御系を中心としたものが多く開発されている。 非制御系分野については研究者間で精力的に研究されているが、応用については制御系に比べて少ない状態である。 特にファジィデータ処理については、各研究者が必要に応じて独自に開発している現状がある。 ここに、筆者等は心理学者、マーケット・リサーチャー等非制御系応用分野の方々に簡便に利用できることを目的にファジィ多変量解析パッケージを開発した。 本パッケージは現在はファジィ重回帰分析、ファジィ数量化Ⅰ、Ⅱ、ⅢおよびⅣ類から構成されている。

2．機能構成

本パッケージの機能構成を図１に示す。

2．1．ファイル作成

データファイルを作成する。また各アイテムの属性を設定する。

2．2．データ入力

データファイルにデータを追加、修正、削除を行う。

2．3．データ閲覧と印刷

データファイルの参照を行う。画面、プリンターに出力ができる。

2．4．分析

分析法は、以下の５種類の手法がある。

・回帰分析
・数量化Ⅰ類
・数量化Ⅱ類
・数量化Ⅲ類
・数量化Ⅳ類

分析結果はグラフ表示ができる。プリンターにも出力可能。

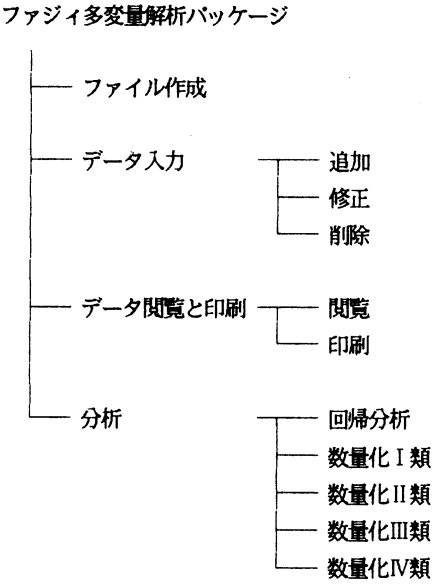


図１　機能構成

3．使用条件

機種	ＮＥＣ　ＰＣ－９８０１シリーズ
ＯＳ	ＭＳ－ＤＯＳ
メモリ	６４０Ｋ
データ数	アイテム　５０（変数）
	サンプル　５００（件数）
	アイテム＊サンプル＝１００００件以内
	（環境により減少する。）

参考文献
（1）寺野寿郎、浅居喜代治、菅野道夫：ファジィシステム入門、
オーム社（1987）

問い合わせ先：〒111　東京都台東区浅草橋5－17－2
株式会社　プラスアイ・システム
秋元　武
TEL　03（865）1021
FAX　03（862）8578

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6〜8, 1990)

DM1-6

ファジィ制御によるヘリコプターのホバリング

A Study on Hovering of Model Helicopter using Fuzzy Control

西野 順二
Junji NISHINO

室伏 俊明
Toshiaki MUROFUSHI

菅野 道夫
Michio SUGENO

東京工業大学 システム科学専攻
Department of System science Tokyo Institute of Technology

Abstract : The helicopter has a lot of flight modes. The most characteristic flight is Hovering which is the mode of standing still in the air. It enables the helicopter to be used in many situations. However , a helicopter has nonlinear dynamics, so its mathematical modeling is very difficult. That causes hardness to ride it and to design autopilot-controllers. This paper proposes a FUZZY controller using Linguistic Rules to stabilize the behavior in hovering mode. The stabilizer(FUZZY controller) works well with a radio-controlled model helicopter.

1 はじめに

ヘリコプタはVTOL(Vertical Take-Off and Landing plane)の一種であり垂直上昇や空間停止（ホバリング）の可能な特徴ある構造を持っている。さらにホバリング状態を基本にして全方向移動ができ、その自由度の高さから複雑な地形環境においてその性能が発揮される。また模型のヘリコプターも同様な性質を持っており、小形な分だけさらに敏捷で細かい動きが可能である。そのような性質のために複雑で、人間には近寄ることの出来ないような環境に於ける作業などでの重要性が高い。

しかし一方で基本的に不安定であり操縦が非常に難しく誰でも自由に利用するわけにはいかないのが現状である。そこで、これまでにもラジコンヘリコプタの制御に関する研究がなされてきた[5]が、ヘリコプタの持つ多自由度性や非線形性などのためにモデル化が非常に困難であった。それはその運動性能の根元となる巨大なロータがヘリコプタの動的特性を決める最大因子となっているからである。(その回転による左右の非対象性に基づく非線形性と軸間干渉など。)とくにホバリング点の近傍では姿勢の変化によって状態が発散的であり高速、不安定系である。また前進飛行などについても速度と迎角変化の連成により動的に不安定となる[2]。ヘリコプタの操縦を難しくしているのは、このホバリングが着陸姿勢となっているためである。

無線操縦による模型ヘリコプターはサイズが小さくなった分機動性が上がり運動性能が向上しているが、同時に時定数などの減少によって不安定性が増している。さらに模型ヘリコプタでは計測器の登載能力の点などから数値的データを集めることが難しく、そのためにこれまでは機体ごとの正確な特性の把握が難しかった。

さて、Mamdaniがファジィ制御を試みて以来[4]制御に関してさまざまな研究[3]がなされてきた。それらの中ではモデルの立てにくいオペレータの制御戦略がファジィ制御を用いて表現されている。しかし、その多くは時定数が長い大きなプラントであった。最近の研究では、高速で不安定な対象への適応例としてヘリコプタの制御[7][6]がある。

解析的には表現の困難なヘリコプターであるが、人間のオペレータは特性をとらえて上手に制御している。本研究ではこのオペレータの動作をファジィ制御の手法を用いてコンピュータ上で実現し模型ヘリコプターのコントロールを行ないその効果を確かめた。

2 ルールの構成

2.1 ホバリングの言語ルール

まず操作入力と主に支配的な挙動の関係を以下に示す。

操作	挙動
throttle	エンジン出力
elevator	機体 pitch 変化
airlon	機体 roll 変化
ladder	回頭

実際にはヘリコプターのオペレータはこの知識を土台として様々な局面で現われる特性に拡張して把握している。そしてそれは基本的には言葉によって表現されている。その要約が操縦の教本等の説明文である。そこで模型ヘリコプタの入門書にある記述を元に言語的なルールの抽出を行なうことができる。

本研究の目的はホバリング状態における安定化であるため、ホバリングに関する記述をまとめ制御則の抽出を行い、以下のような結果を得た。

a) 機体がrollしたら逆向きにairlonを操作する。

b) 機体がpitchingしたら逆向きにelevatorを操作する。

c) 機首が回ったら逆向きにladderを操作する。

d) 機体が横に動いたら逆向きにairlonを操作する。

e) 機体が前後に動いたら逆向きにelevatorを操作する。

f) 機体が上下したら逆向きにthrottleを操作する。

a,b,cは姿勢角を保つ制御則、d,e,fは位置を一定にする制御則である。さらに、

A) このとき大きく動いた場合は操作も大きくする。

B) このとき速く動いた場合は操作も大きくする。

が暗黙のうちに定められている。

2.2 推論法

本研究でもちいるルールは後件部の値が定数であるものを用いている。それらは以下のような if-then ルールの集まりによって表わされる。

$$R_i : \text{if } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^i, \text{ then } y_i = b_i$$

ここでx_k：入力変数、y_i：出力変数、A_k^i：ファジィ集合、b_i：定数である。

x_1のA_1^iにおけるグレードw_1^iとx_2のA_2^iにおけるグレードw_2^iの積$w_i = w_1^i * w_2^i$を前件部の適合度とする。

複数個のルールによる出力Yは各々の前件部に対する適合度による重み付き平均で与えられる。

さて、作成した言語による制御規則を前述の if-then ルール群で書き下ろす。シミュレータからコントローラへの入力は連続した数値である。まずこれらの入力変数をファジィ分割する。入力変数は Pitch,dPitch,Roll,dRoll の 4 変数である。また出力は Elevator,Airlon の 2 変数である。

入力変数をファジィ分割しそれぞれに NE,ZO,PO というラベルをつける。ここで、それぞれ NE:Negative,ZO:Zero,PO:Positive の略である。出力する値はファジイ数ではなく定数であるので分割は必要ない。

支配的な操縦の関係から

Pitch,dPitch $\Longrightarrow$ Elevator

Roll,dRoll $\Longrightarrow$ Airlon

という入出力関係のルールを構成する。

ファジィPI コントローラの設計手法 [1] に基づいて、シミュレータを用いて状態を確認しながら分割された前件部の空間に後件部の値を埋め込んでいったところ Elevator 、Airlon に関して各々9 のルールができた。

3 実験と結果

3.1 実験

実験の構成を図に示す。

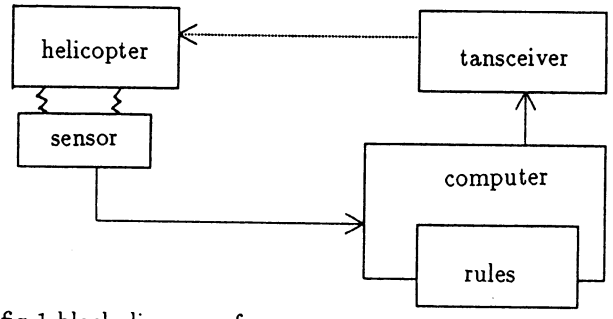


fig.1 block diagram of
model helicopter control system.

以下実験の構成について述べるが、詳細は文献 [6] を参照。

ラジオコントロール模型をベースに実験用に改造した。基本的な操縦のメカニズムはそのまま利用した。

使用したセンサは加速度センサを 2 つと角速度センサを 2 つである。これらのセンサを 2 つの軸に関して独立となるように配置した。このシステムによって前後左右軸について互いに独立に加速度センサと角速度センサを用いて機体の姿勢角とその変化を計測した。センシングに関わるノイズで最も大きな要素はエンジンからの機械的振動によるものである。これに対しては 10Hz の 2 次バタワースフィルタを用いて高周波側をカットし、良好なセンシングが行えるようにした。

制御則の演算はマイクロコンピュータ上で行なった。コンピュータへの入力は市販の A/D ボードをもちいている。コンピュータからの出力は専用チップを利用した D/A コンバータを用いた。

機体に対する操作入力は市販の模型用送受信機をもとに pwm サーボを通して無線で行なわれる。この時オペレータの操縦操作との加算を行っている。送信周期による無駄時間が約 20 ミリ秒である。

プログラムは C 言語によって記述され実行周期は約 4.7 ミリ秒である。ここで用いた推論規則の構造とそのプログラムはシミュレータ上で有効であったものをそのまま用いた。推論規則のパラメータは機体の応答により実験的に修正した。

浮上開始時のスロットル操作のみオペレータが行い、浮上後は危険状態になるまではコンピュータだけによるコントロールを行なう。

飛行状態の観測は VTR をもちいて行った。

3.2 結果

実験によって実際の機体に対するコントローラのパラメータが同定された。数値を図に示す。

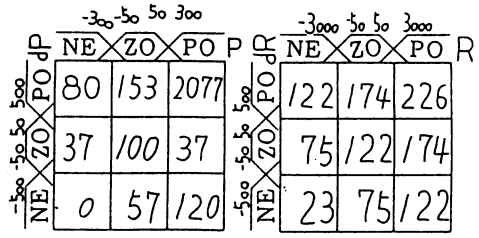


fig.2 rule tables.

ここで P,R は姿勢角に、dP,dR は角速度に比例した入力値である。出力は、表の数値に比例した、操作舵角である。この時、elevator は 100 airlon は 122 が中立点 (操作量が 0) である。

新しく調整した機体から初めて 4 から 6 回程度のパラメータの調整で機体の傾きはみられなくなった。

ファジィ制御の手法を用いた姿勢の安定化システムが構成できた。

機体の姿勢が安定化しても機体のドリフトが発生していた。これはセンサの都合上機体の対地速度が計測されていないため姿勢の安定をはかっても初期速度とテールロータ推力による速度が残るためである。しかしこのとき自由運動にみられるような並進速度に引き起こされる姿勢の崩れが無いことからコントローラがよく機能していることがわかった。

4 おわりに

ヘリコプタのホバリングの制御規則を言語的に表現し、これをもとに制御ルールの基本形を考案しシミュレーションによって構造の同定を行なった。

また、このルールによる制御の有効性を確認するために必要なハードウエアを構成し、シミュレーションによって得られたルールの構造を実験に適用しパラメータのチューニングを行なった上で姿勢の安定化を確認した。

まとめると、ファジィ制御によるヘリコプタの操縦のための基本的なシステム構成を行ない言語的なルールによる制御がヘリコプタの安定化において有効であることが確認された。

今後の課題は、速度、位置センサの使用による位置制御、マクロ命令による遠隔操作、などへの拡張である。

References

[1] 菅野 道夫, ファジィ制御 .(1989) 日刊工業新聞社

[2] 加藤・今永, ヘリコプタ入門 .(1985) 東京大学出版会.

[3] 室伏・菅野, 模型自動車のファジィ制御 . 日本ロボット学会誌,6-6,536-541(1988)

[4] E.H.Mamdani *Applications of fuzzy algolithms for control of simple dynamic plant* , Proc.IEE 121-12,1585-1588(1974)

[5] 大山・山野・古田, ラジコンヘリコプタのモデリングと制御. 計測自動制御学会論文集,20-4,350-356(1984)

[6] 西野 順二, ファジィ制御によるヘリコプターのホバリング. 東京工業大学 制御工学科 卒業論文 (1990)

[7] 百武 友幸, ファジィ理論による模型ヘリコプタの安定化. 東京工業大学 制御工学科 卒業論文 (1989)

問い合わせ先：

〒２２７横浜市緑区長津田町４２５９番地

東京工業大学 総合理工学研究科

システム科学専攻 西野 順二

TEL 045-922-1111 ext. 2645

FAX 045-921-1485

6th Fuzzy System Symposium (Tokyo, Sep. 6～8, 1990)

DM1-7

多入力ファジィ推論ボードを用いた模型ヘリコプタの制御

Fuzzy Controlled Model Helicopter by Using Virtual Paging Fuzzy Inference Board

蜂巣　史良*)　関谷　庸男**)　大谷　正幸*)　芦田　隆次*)　廣田　薫**)
Shiroh Hachisu,　Tsuneo Sekiya,　Masayuki Otani,　Takatsugu Ashida,　Kaoru hirota

*)　マイコム株式会社研究開発部　**)　法政大学工学部電気工学科計測制御専攻
MYCOM INC.R&D Div.　Dept. of Instrument & Ctl.Eng., College of Eng. HOSEI Univ.

Abstract: Fuzzy controlled model helicopter system is presented. A fuzzy inference board with 48bit input and 16bit output is used as an inference engine, where input information is given by a CCD image input system.

1．緒言

ヘリコプタは他の航空機と異なり、空中で静止できるホバリング機能を持っているが、その制御は複雑で、熟練した操縦者の経験に頼っており、従来の方法ではその自動化は困難だった。しかし、最近東工大菅野研究室等で、ヘリコプタのファジィ制御の研究が進んでいる。本デモンストレーションでは、電動ラジコンヘリコプタを用い、画像処理を併用してホバリング制御を行なった。

2．ホバリング制御システムの構成

本実験に用いたシステムの概要を図１に示す。

使用機器

○画像処理部：
　画像処理ボード(TARGA M8) TRUE_ART製
　ＣＣＤカメラ　２台
　Ｍｏｎｉｔｏｒ

○計算機：
　32Bitﾊﾟｰｿﾅﾙｺﾝﾋﾟｭｰﾀ(20MHz) MYCOM製
　使用言語　Ｃ言語
　ＣＲＴ

○ヘリコプタ：　※写真１
　電動ﾗｼﾞｵｺﾝﾄﾛｰﾙﾍﾘｺﾌﾟﾀｰ(コンバート) KYOSHO製

○ファジィ推論ボード：　※写真２
　48bit入力16bit出力ファジィ推論ボード MYCOM製

3．ホバリング制御のアルゴリズム

シミュレーターに設置した模型ヘリコプタを、上部と側部の２台のＣＣＤカメラで観測し、画像処理によって得られた情報よりファジィ推論を行ないホバリングの制御を行なう。

ホバリング制御のアルゴリズムの概要を以下に示す。

1. 目標値を設定する。
2. 上部に設置したＣＣＤカメラからの画像情報より、前後・左右の傾き、機首の方向を検出する。
3. 側部に設置したＣＣＤカメラの画像情報より、高さを検出する。
4. 得られた情報より、ファジィ推論し操作量を決定する。
5. プロポへ信号を出力する。
6. 目標値と一致するまで２～５を繰り返す。
7. 終了命令を待つ。
8. 停止するまで２～５を繰り返す。

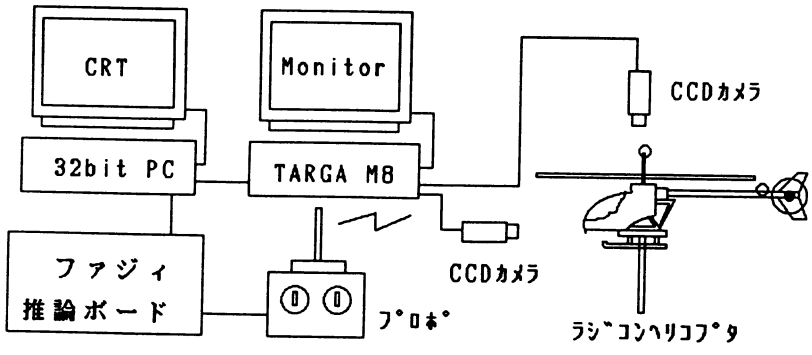


図１．　ホバリング制御システムの構成

4．画像による傾きの検出方法

図２に示すように、メインローターの中心に棒を立て、その先端にＬＥＤをとりつける。また、テイルブームにもＬＥＤをとりつける。傾きの無いときの、メインローターの中心の座標と傾いているときのＬＥＤの座標の差から、傾きθの大きさを検出する。また、テイルブームにつけたＬＥＤの座標より機首の方向を検出する。このとき、高さにより傾きの補正を行なう。

画像は256x256画素モードで白黒256諧調のものを２値化し、ＬＥＤの座標を求め必要情報を取り出す。ＣＣＤカメラはスイッチで交互に上部と側部の２台を切り替える。前後・左右の傾き、機首の方向、高さの情報をファジイ推論ボードへ送り、推論結果をプロポへ出力する。出力は、メインロータの回転数、テイルロータのスラスト、前後の傾き、左右の傾きの４つである。

参考文献

(1)航空工学講座（９）ヘリコプタ（第３版）
社団法人　日本航空整備協会　発行

(2)筒井善直　ヘリコプターの工学と操縦
酣燈社

(3)菅野道夫　ファジィ制御
日刊工業新聞社

問い合わせ先

*)　マイコム株式会社研究開発部
京都市右京区嵯峨広沢南下馬野町１２
０７５－８８２－３６０１

**)　法政大学工学部
小金井市梶野町３－７－２
０４２３－８１－５３４１　ex３０４

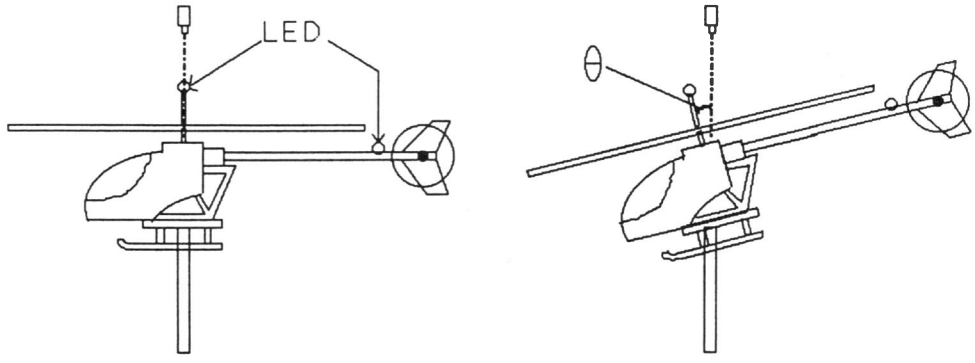


図２．　画像による傾きの検出

写真１．電動ラジコンヘリコプタ

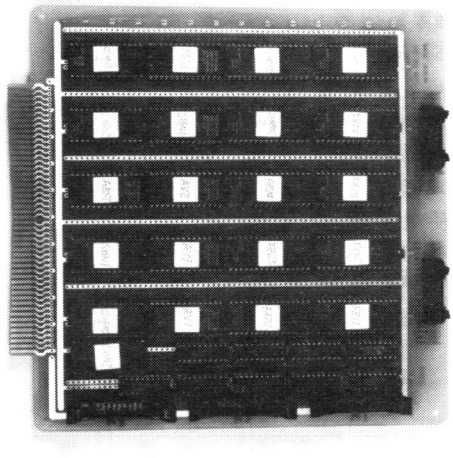


写真２．ファジィ推論ボード（ＭＹＣＯＭ製）

DM1-8

ファジィ推論を用いたダーツ投げマニピュレータシステム

Fuzzy Controlled Darts Manipulator

廣田 薫*) 井上 雅彦*) 永田 康紀*) 大谷 正幸**) 蜂巣 史良**) 芦田 隆次**)
Kaoru Hirota, Masahiko Inoue, Yasunori Nagata, Masayuki Otani, Shirou Hachisu, Takatsugu Ashida
*)法政大学 工学部
Faculty of Engineering, HOSEI University
**)マイコム株式会社研究開発部
MYCOM INC. R&D Div

Abstract : A fuzzy controlled darts manipulator system is presented. The positional information between the target and the darts are extracted through image processing and are fed into the fuzzy production system. The timing of throwing darts and throwing directions are decidid by the fuzzy inferrence.

1．緒言

ダーツ投げロボットに関しては、これまでにも逢坂、小野[1][2]によりファジィ制御法と学習制御法の制御性能の比較実験が行われている。その実験によればファジィ制御法は学習制御法とほぼ同等の制御性能が得られている。そこで制御方法をファジィ制御法に絞り実験を試みた。また[1][2]では縦方向制御のみであるが、今回は縦方向の距離の差と横方向の距離の差両方を用いて制御している。これらの情報は画像処理により得ることにした。

本デモンストレーションではダーツ投げマニピュレータシステムの実演を行う。

2．ダーツマニピュレータのシステムの構成

図1、図2にダーツ投げマニピュレータのシステムの構成図とアルゴリズムを示す。

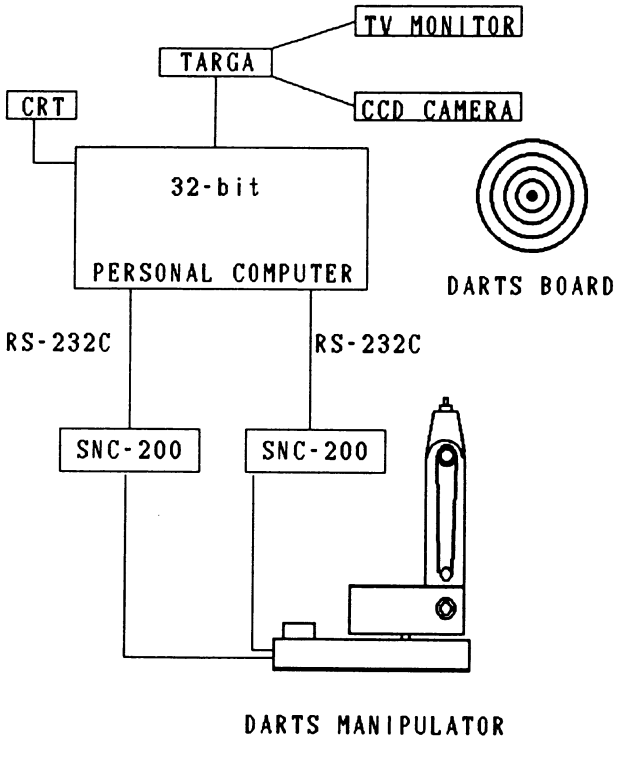


図1 ダーツ投げマニピュレータのシステムの構成

使用機器

画像部 ：画像処理ボード（TARGA M8）
Truevision INC.製
CCDカメラ
TV モニター

計算機 ：32-bitパーソナルコンピュータ 20MHz
IBM対応
（使用言語 C言語） MYCOM製
CRT

ロボット：ダーツ投げマニピュレータ
（3自由度の垂直多関節型
操作量：ウエストの角度、
アームのポジション、
ダーツを放すタイミング
最高到達距離2m）
2軸コントローラ
（SNC-200）×2
（使用言語 MYCOM G言語）
MYCOM製

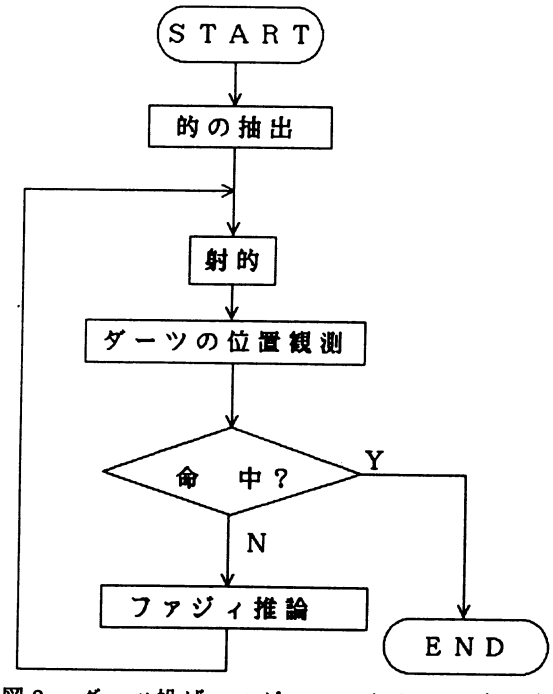


図2 ダーツ投げマニピュレータのアルゴリズム

1．的の中心座標の抽出
2．射的
3．ダーツの位置の観測
4．的に命中しているか判別
5．ファジィ推論により次回の操作量決定
6．3に戻る

3．ダーツ投げマニピュレータの動作

3－1．的の中心座標の抽出

ＣＣＤカメラによりダーツボードを撮り込む。ダーツボードは円形で白と黒の同心円環となっている。この画像は256x256画素で各8-bit（白－255,黒－0）の濃淡値で表されている。そこでダーツボードの中心部の座標（以後的と呼ぶ）を求める。

3－2．射的

1回目は予め決められた値で投げる。2回目以降は3－5の推論部で推論された値を用いて投げる。

3－3．状態観測

3－1で示したようにダーツボードは白と黒の同心円環となっているためダーツの色を中間色とし、撮り込んだ画像情報を3値化することによってダーツボードとダーツの区別をつけ、ダーツの先端の座標を求める。

3－4．判定

この時点でダーツの先端座標と中心座標とが一致していれば操作完了、一致していなければ3－3で得られた情報を推論部に引き渡す。

3－5．推論部

的の中心座標とダーツの先端座標を基にマニピュレータへの操作量（ウエストの回転角度、アームのポジション、ダーツを放すタイミング）をファジィ推論を用いて推論する。ここで推論された操作量を次へ引き渡す。

3－6．3－2に戻る。

4．実験と結果

写真1～4にダーツ投げマニピュレータの動作を示す。

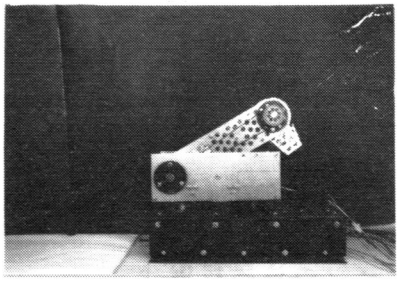


写真1　　マニピュレータの動作1

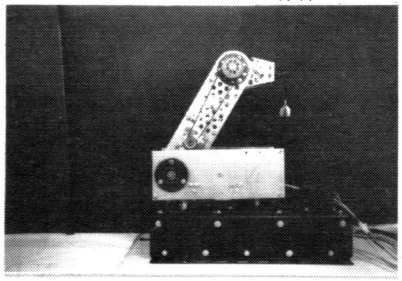


写真2　　マニピュレータの動作2

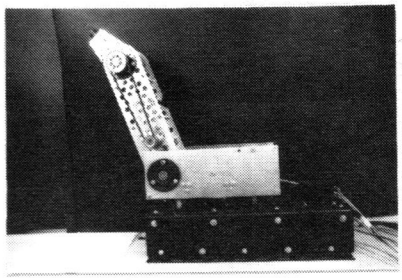


写真3　　マニピュレータの動作3

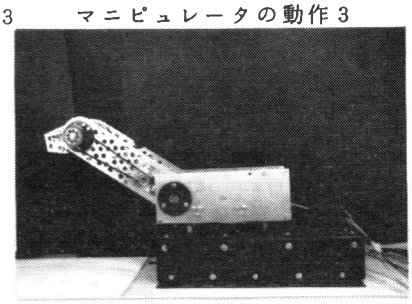


写真4　　マニピュレータの動作4

ダーツ投げマニピュレータにより実験を試みた結果、写真(5)～(8)のように約4回目の射的により的に当たるようになった。

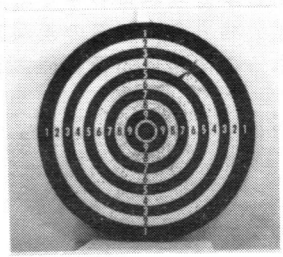


写真5　着弾地点1

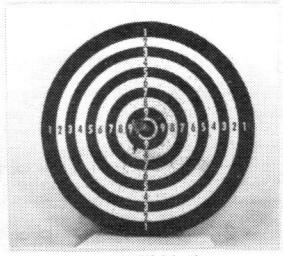


写真6　着弾地点2

写真7　着弾地点3

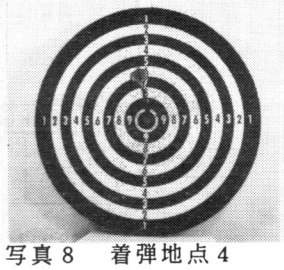


写真8　着弾地点4

5．結論

ファジィ推論に画像処理を併用して、ダーツ投げマニピュレータシステムを構築した。尚現在、制御部に小型ファジィコントローラ（ＭＹＣＯＭ社　ＦＣＡＳ）を使用することを検討中である。

参考文献

(1)逢坂一正、小野敏郎：ダーツ投げロボットのファジィ制御、第31回自動制御連合講演会No.3026(1988)
(2)逢坂一正、小野敏郎：ダーツ投げロボットのファジィ制御に関する一実験、システム制御情報学会論文誌Vol.2,No.10,pp.357～359(1989)
(3)江崎享億：絵でわかるダーツ入門、日東書院

問い合わせ先
法政大学工学部，郵便番号184，東京都小金井市梶野町3-7-2，0423-81-5341(内線304)

DM1-9

汎用オペレーションシステム上で稼動するファジィ制御システム

FUZZY CONTROL SYSTEM CONSIST OF A PERSONAL COMPUTER WITH MS_DOS

柳原弘彦　　祝原栄治

Hirohiko YANAGIHARA　　Eiji IWAIHARA

オーシーエンジニアリング（株）技術部

OC ENGINEERING CO.,LTD.

Abstract : ORPX-Fuzzy control system is consisted of a personal computr with MS-DOS and input/output instruments such as a programable logic controller or analogue boards. Fuzzy production rule can be described or modified easily with screen editor on the market.
This system had developed on basis of experiences for kiln control at cement plant.

1．　はじめに

近年、プログラマブルコントロール（以下シーケンサと称す）、パーソナルコンピュータ（以下パソコンと称す）の進歩はめざましいものがあり、これらのハードウェアを活用したシステムとして、ＯＲＰＸ－Ｆｕｚｚｙシステムは開発された。実際には、ノンプログラミングのコントロールシステムであるＯＲＰＸシステムにオプション機能として、インストールされることにより、ファジィ制御は実現される。

ＯＲＰＸ－Ｆｕｚｚｙの開発はセメントキルン制御を対象に開発された経緯を持つものである。

セメントキルンは、制御の難かしいプロセスの代表とされ、種々の制御方式が試みられてきたが、オペレータの操作に依存する面が多かった。

１９８０～８２年にかけて、F.L. Smidth 社がセメントキルンのファジィ制御の実用化に成功したとの情報から、われわれも開発に着手し、８５年９月より、営業運転での使用を開始した。

これらの結果を踏まえ、汎用用途に対応できるよう現在の機能を持つシステムに整備し、８８年１月より販売を開始した。

2．　本システムの仕様

本ソフトウェアの基本仕様を表１に示す。使用可能なパソコンは、ＭＳ－ＤＯＳの使用できるパソコンであり、メインメモリーとして、プログラム容量５００ＫＢとマウスなどのドライバー容量が必要である。プロセスとのデータの入出力はシーケンサを介しておこなうことを基本とし、シーケンサとパソコン間は通信回線でリンケージしている。その他要求によっては、パソコンへＰＩ/Ｏボードをセットし、ダイレクトにデータを入出力する方式やＲＡＭディスクの使用など、システムに合った構成を採用している。

3．　本システムの特長

本システムは、比較的少ないルールで精度の高い推論を高速で行ない、また制御ルールの構築を行ないやすいものとするため、以下の特長を有している。

3.1　マルチページ処理

定常状態と非定常状態とでは、制御戦略そのものが異なる場合が多く、ファジィルールも違ったものとする必要がある。このため最大16ページ（ファイル）までのファジィルールを切換て使用することができる。

表１　ＯＲＰＸ－Ｆｕｚｚｙ基本仕様

推論形式	ＭＡＸ－ＭＩＮＩ法
非ファジィ化法	重み付け平均化法
ファジィ変数の形	前件部（連続釣鐘形） 後件部（グレード値）
ファジィラベル	前件部（５種類） 後件部（７種類）
制御ルール	ＩＦ～ＴＨＥＮ形式 約２００ルール
出力アルゴリズム	速度型
入出力点数	入力６０点，出力１６点

3.2　マルチループ処理

全制御ループを最大10ループまでの制御周期の異なるブロックに分て記述することができる。

3.3　入力変数（前件部変数）

1ページに対して、最大60変数まで記述が可能であり、各変数は制御周期に対応した過去4回前までのデータをファジィルール内で使用できる。さらに、これらの変数（過去のデータを含む）や定数を使用し、演算処理をおこない、新たにファジィルール内で使用する変数を作成できる。

変数は連続釣鐘形のメンバーシップ函数で表現される。具体的には、(1)式で表現され、中心値χ_eとχ_rの上限値と下限値を指定し、形状を決定する。

$$P = \exp\left[-k(\chi-\chi_e)/(\chi_e-\chi_r)^2\right] \quad \text{-----(1)}$$

P：ファジィ適合度
k：形状係数
χ：変数値
χ_e：中心値
χ_r：上限値（下限値）

3.4　制御ルール

ファジィルールは、入子型IF文の記述をＡＮＤ関係で許し、ファジィ集合の表現以外に、クリスプ集合の表現も、併記できる。また、２つ以上の関係式を結合させる”ＡＮＤ”，”ＯＲ”や関係式の適合度を反転させる”ＮＯＴ”の論理演算子を使用できる。

前件部ではＮＢ，ＮＭ，Ｚ，ＰＭ，ＰＢの５種類のファジィラベルが使用でき、後件では前記にＮＳ，ＰＳを加えた７種類のファジィラベルが使用できる。前件部、後件部の命題数に特に制限はない。

3.5　出力変数（後件部変数）

1ページに対して、最大16変数まで記述が可能であり、非ファジィ化は(2)式に示す重み付け平均化法を採用している。

$$\Delta U = (\Sigma \omega_i \cdot K_i)/\Sigma \omega_i \quad \text{------(2)}$$

ΔU：出力増減値
ω_i：適合度
K_i：出力グレード値
i：ルール数

出力値は速度型として演算され、同一出力変数を複数ループで記述することも可能であり、(3)式に示すように出力値は、各ループ演算値の加算として求められる。

$$y_{n+1} = y_n + \Delta U_1 + \Delta U_2 + \quad \text{------(3)}$$

y_{n+1}：今回出力値
y_n　：前回出力値
ΔU_1：№１ループの算出した出力増減値

4．　システムの構築方法

本システムの構築は、プロセス入出力の定義とファジィ制御則の定義をおこなうことにより実現される。これらの定義は、ＯＲＰＸシステム用に開発した問題向言語の書式に従い、汎用エディタで記述し、テキストファイルを作成し、その後提供される問題向言語用コンパイラにより、テキストファイルはデータファイルに変換される。ＯＲＰＸ－Ｆｕｚｚｙシステムは、このデータファイルを参照し制御を実行する。

ファジィ制御則記述例

```
FUZZY   :  FUZDAT , 1 ;

 LOOP   :  FZLP1   ;

  INTERVAL   : 2 ;

  VARIABLE   :

        AT(3) = TO1     ;
        SV(1) = TO1SV   ;

  INDIRECT_VARIABLE   :

        DT = AT-SV     : PB(  0, 10, 10),
                           Z(-10,  0, 10),
                          NB(-10,-10,  0);

        CT = AT-AT1    : PB(  0,  3,  3),
                           Z( -3,  0,  3),
                          NB( -3, -3,  0);

  MANIPULATOR :

        EV = VO1 : PB(10), Z( 0),NB(-10);
        FV = VO2 : PB( 5), Z( 0),NB( -5);

  RULE :

        IF DT=PB and CT=PB then EV=NB;
        IF DT= Z and CT= Z then EV= Z;
        IF DT=NB and CT=NB then EV=PB;

        IF DT>5 or DT<-5 then
           IF DT=PB then FV=NB;
           IF DT= Z then FV= Z;
           IF DT=NB then FV=PB;
        ENDIF

 ENDLOOP;
END
```

MS_DOSは、マイクロソフト社の登録商標です。

項目索引

A

Absorption refrigerator 373
Acceleration control 395
Adaptive 231
Adaptive fuzzy control 219
Adaptive/reactive planning 37
Adjointness 75
Advertising expenditure 295
A first order lag system with dead time 193
Algorithm 291
Ambiguity 501
Approximate classification 381
Approximate reasoning 83, 235, 243
Aquatic factor 365
Area effect 485
Artificial emotion 389
Artificial intelligence 477
Assembler 109
Associative memory system 93
Attached procedure 247
Autonomous mobile robot 45
Autonomous robot 37
Auto-tuning 197

B

Back propagation error learning 539
Back-propagation algorithm 381
Backtracking 441
Backtrack control 263
Backward chaining 255
Bang-bang control 399, 419
Basic probability 511
Blackboad 441
Bridge rating system 511
Bridge structure 377
Bulldozer 201

C

Case-based reasoning 211
Centroid method 239
Choquet integral 147
Choquet's integral 155
Cluster analysis 505
Cognition analysis 303
Cohesion addition control 23
Color harmony 481, 485
Combined method 239
Compiler 109
Concept 215
Concrete bridge 511
Conflict resolution 263
Conformable linear functional 155
Conjunction 215
Connectivity 299
Connective degree of a fuzzy graph 299
Context 327
Contradiction 215
Control 201, 373
Control rule 189
Control system with two degrees of freedom 369
Current mirror circuit 403

D

Decision making 319, 323
Decision table 531
Deconvolution 457
Defuzzifier methods 83
Dendrogram 311
Dependent attribute 205
Digital control systems 357
Discriminant analysis 381
Diversion rate model 519
DNA sequence analysis 307
DSP application 395
DSS 101
DSS(decision support system) 151
Dual measure 205
Duality 75
Dynamic memory 211
Dynamic programming 399
Dynamic state model 389

E

Earthquake 227
Economics 473
Electric resistance welding 15
Emotional factor 481
Empirical equcation 23
Environment 319
Environment recognition 45
Environmental system 465
Evaluation 327
Expert shell 441, 445
Expert system 49, 101, 377, 473
Exponential function 239
Extended fuzzy measure space 155

F

Failure possibility 497
Feature extraction 461
Feature structure 169
FEM 523
Fisher's information 143
Flood control 19
Flower 287
Forcasting 295
Force control 395
Forward chaining 251
Frame system 259
Fuzzification 113
Fuzzy 327
Fuzzy Adaptive control 15
Fuzzy algorithm 395, 461
Fuzzy backward reasoning 431
Fuzzy-bayes decision rule 315
Fuzzy break circuit 403
Fuzzy concept 125
Fuzzy control 9, 15, 19
189, 223, 227
231, 235, 373
407, 535, 543
Fuzzy controlled arm robot 33
Fuzzy controller 23, 63
193, 219, 411
Fuzzy control rules 63
Fuzzy correspondence 183
Fuzzy data 143
Fuzzy data base 165
Fuzzy decision variables 449
Fuzzy drive control 45
Fuzzy entropy 83, 131
Fuzzy environment 399
Fuzzy expert system 45, 105
259, 263, 267
Fuzzy expert systems
for medical diagostic 97
Fuzzy face chart 505
Fuzzy feedforward control 369
Fuzzy frame 247
Fuzzy graph 303, 311
Fuzzy hardware 113
Fuzzy identification 179
Fuzzy if-then rules 175
Fuzzy index 341
Fuzzy inference 79, 93, 271
385, 423, 489
Fuzzy inference board 283
Fuzzy inference method 407
Fuzzy inference processer 117
Fuzzy inference system 243
Fuzzy information 211
Fuzzy information retrieval 307
Fuzzy integral 151, 205
Fuzzy inverse problem 183
Fuzzy ISM 427
Fuzzy knowledge representation 247
Fuzzy labeling 543
Fuzzy logic 67, 287
Fuzzy logic processor 113
Fuzzy LP 457
Fuzzy matching 341
Fuzzy matching function 307
Fuzzy matrix 291
Fuzzy max 139
Fuzzy measure 67, 147, 323
Fuzzy membership functions 335
Fuzzy model 27, 361, 473
Fuzzy modeling 57, 105, 395, 535
Fuzzy number 131
Fuzzy number model 159
Fuzzy observations 143
Fuzzy parameters 449, 453
Fuzzy pattern matching 251, 255
Fuzzy predictive model 27
Fuzzy production system 251
Fuzzy programming language 71
Fuzzy prolog 71
Fuzzy reasoning 23, 57, 165
183, 201, 219
251, 255, 435
473, 519, 531
Fuzzy relation 183
Fuzzy relational equation 183, 319
Fuzzy reliability analysis 497
Fuzzy retrieval 165, 341
Fuzzy set 83, 179, 275
331, 345, 373
377, 477, 493, 523
Fuzzy set operation 493
Fuzzy set operators 121
Fuzzy set theory 481, 485, 511
Fuzzy state memory 403
Fuzzy structural modeling 349
Fuzzy systems 75, 353
Fuzzy temporal reasoning 223
Fuzzy theory 251, 255, 303, 311

G

Global stability 353
GMDH 539
Gödel implication 135
Granite tunnel 527

Graph theory 303
Grid network generation 523

H
Handwritten character 345
Hardware 275, 279
Heater outlet temperature 369
Hierarchical fuzzy model 539
Homology search 307
Human interface 389
Hydrogen production unit 369

I
Identification of possibilistic distribution 175
Ignorance target recognition 431
Image retrieval 341
Image understanding 287
Imprication 79
Indifferent zone 315
Inequality relation 139
Inheritance 247
Instance generalization 125
Instruction analysis 303
Integrity assessment 377
Intellectual evaluation foreign exchange dealing 151
Intelligent control 37
Intelligent warning system 105
Intelligible 501
Interactive decision support system 105
Inter-and exter-polation 179
Interpolation 283
Interval arithmetic 291
Interval method 319
Interval valued fuzzy 431
Intuitionistic logic 235
Inverse dynamics 535
Inverse kinematics 535
Iterative fuzzy modeling 539

K
Kernel 299
Knowledge acquisition 49, 105, 477
Knowledge base 19, 465
Knowledge editor 259, 267
Knowledge representation 473, 489, 493

L
Labeled graph 341
Language 327
Laws of excluded middle 121
Learning 531
Learning capability 543
Learning control 423, 535
Linear model 239
Linear resolution 71
Linebalancing 477
Linguistic approximation 331
Linguistic hedge 331
Linguistic probability terms 335
Linguistic model 159
Linguistic model 169
Local stability 353
Logic calculus 75
Logic-in-memory 117
Logic programming 71
Logical consequence 71
Loss of information 143
Lyapunov's direct method 353

M
Mamdani's implication 235
Man·machine interface 201
Man·machine system 201
Margin rank 291
Maximum likelihood estimation 143
Membership function 113, 121, 179 197, 215, 423
Membership function method 275
Microcomputer 373
Micro-programming 279
Min-max-gravity method 9
Mobile robot 531
Modal logic 67
Modus ponens 79
Motion control 395
Motor 231
Multi-attribute classification 205
Multiattribute utility function 147
Multi-component spectra 457
Multi-fold fuzzy reasoning 435
Multiobjective linear fractional programming 449
Multiobjective nonlinear programming 453
Multiple regression analysis 505
Multi-stage fuzzy reasoning 435
Multi-step fuzzy reasoning 441, 445
Multi-variable 179

N
Natural language interface 165
Necessity 79, 135 139, 449, 453
Neural expert system 49

Neural network 49, 57, 63
197, 377, 381, 385
Noised pattern 385
Nonlinear A/D converter 113
Nonmonotonic reasonig 389
Numerical data 159
Numerical probability 335

O
Object oriented 493
Object-oriented paradigm 489
Obstacle avoidance 531
Optical method 407
Order constraint 125
Order relation 125
Ordered set 331
Oriented graph 299
Orthogonal condition 315
Overlapping Coefficient 323

P
Paired comparison 349
Parallel processing 279
Pattern recognition 345, 381
385, 415, 523
Perceptual-motor system 37
Personal liking 481, 485
Phase-plane 357
PID and fuzzy combining control 369
PID control 231
PID controllers 193
Plant Factory 287
Possibilistic discriminant analysis 175
Possibilistic linear system 527
Possibilistic regression model 295
Possibility 135, 139, 449, 453
Pre-chlorine dosage 365
Predictive control 27, 45
Preference relation 147
Probabilistic dependence 121
Probabilistic operators 121
Probability of fuzzy events 315
Problem solving model 389
Process control 27
Process model 27
Product-sum-gravity meathod 9
Product-sum-gravity method 407
Production rule 235
Production system 255, 259, 263
Psychology 215
Pump and gate cooperation 219
Pumping station 219

Q
Qualitative information 497
Quality evaluation 287
Questionnaire 527

R
Raising funds model 101
Ranking fuzzy numbers 135, 139
Real-time operation 19
Reduction of information systems 97
Relation between keyword 469
Reserved judgement 315
Retrieval support 469
Rigid disk drive 419
Rock mass classification 527
Rough sets 97
Rule block 243

S
Scaling factor 189
Scenario 151
Scene understanding 211
Scheffé's model 349
Search method 441
Seek control 419
Seismic waves 227
Self tuning 15
Self-tuning mechanism 63
Self-tuning method 423
Semantics 67
Sensible 501
Sensory evaluation 349
Sequential algorithm 431
Servo control 231
Sewing shop 477
Shell structure 227
Shift hedge 331
SIMD 279
SIMD architecture 117, 411
Similarity measure 469
Simulation 365
Situation semantics 169
Sociogram 311
Sociometry analysis 311
Software 489
Solutions 319
Spatial reasoning 37
Stability analysis 353, 357
State space 389
State transition 101
Storage reservoir 19
Subadditivity 323
Subjective probability 335

Subjective uncertainty 511
Superadditivity 323
Supervised learning 49

T

Taxonomy 327
Time delay system 223
Time series data 461
T-norm 79, 519
Topology 125
Transitive coupling 427
T-sum operation 131
Tuning 189
Tuning method 193

U

Uncertain representation 501
Uncertainty 335
Uneven force 419
Unification 169
Universe rule 243
User interface 267, 445

V

Vagueness 469, 501
Vehicle control 239
Vibration 227
Video tape recorder 415
Virtual paging 283
Visual recognition system 415
Visual sensory judgment 415
VLSI 279
VME bus 271
Voice coil motor 419

W

Walk 299
Wallece-tree parallel multiplier 411
Water treatment 23, 365
Window system 267, 445

OTHERS

2-D random moving object 33
0-1 integer programming 165
α-cut method 275
(s, S) policy 399

著者名索引

A

Ageishi, Y. 上石 陽一
SA4-4 389

Akimoto, T. 秋元 武
FC1-3 295
DM1-5 557

Akiyama, T. 秋山 孝正
SC4-1 519

Anse, M. 安瀬 美知子
SB5-4 477

Araki, H. 荒木 宏之
FC1-2 291

Araki, K. 荒木 攻
SB5-4 477

Arikawa, H. 有川 晴彦
SC5-4 543

Arima, H. 有馬 秀俊
SA3-3 373

Asai, K. 浅居 喜代治
TC2-3 143

Asami, M. 浅見 真人
TC4-3 169

Asayama, H. 朝山 宏
FA2-2 193

Ashida, T. 芦田 隆次
FB4-4 283
DM1-7 561
DM1-8 563

B

B, Franz.
FA4-4 231

C

Chikaoka, H. 近岡 秀男
SC4-2 523

R. Corder
FB4-1 271

D

Doya, K. 銅谷 賢治
TB2-3 93

E

Ebata, T. 江端 智一
FB1-2 239

Ezawa, Y. 江澤 義典
FB2-3 255
FC4-2 331

F

Fujii, T. 藤井 忠直
TA1-3 19

Fujiwara, H. 藤原 英幸
FC1-1 287

Fujiwara, H. 藤原 博史
SB1-2 415

Fukami, S. 深海 悟
TC3-2 151
FB3-1 259
FB3-2 263
FB3-3 267
SB5-3 473

Fukushima, K. 福島 清司
DM1-4 555

Funamoto, D. 船本 大蔵
FA4-3 227

Furuhashi, T. 古橋 武
TA4-2 57

Furukawa, H. 古川 裕之
SB2-3 431

Furukawa, K. 古川 浩平
SC4-3 527

Furuta, H. 古田 均
SA4-1 377
SC4-3 527

G

Genno, H. 源野 広和
DM1-4 555

Gotoh, Y. 後藤 泰之
TA4-3 63

M. Grabisch
FA3-1 205

H

Hachisu, S. 蜂巣 史良
FB4-4 283
DM1-7 561
DM1-8 563

Hakata, T. 博田 忠邦
DM1-3 553

Han, S. 韓 生廉
FC3-2 319

Harumoto, M. 春本 光紀
FA4-3 227

Hasumoto, R. 蓮本 了遠
TA2-1 23

Hayashi, I. 林 勲
FA1-1 175
SB2-1 423
SB3-2 441
SB3-3 445

Hayashi, M. 林 雅彦
SB4-3 457

Hayashi, S. 林 真司
FA2-1 189

Hayashi, Y. 林 陽一
TA4-1 49
FA1-3 183

Hirose, Y. 広瀬 保嘉
SB2-3 431

Hirota, K. 廣田 薫
TA3-1 33
FB4-4 283
SB4-4 461
SB5-2 469
DM1-7 561
DM1-8 563

Hirouchi, T. 広内 哲夫
DM1-2 549

Hitomi, K. 人見 和弘
SA3-3 373

Hojo, T. 北條 達也
SA2-2 357

Honda, S. 本田 修一郎
SC4-2 523

Horikawa, S. 堀川 慎一
TA4-2 57

E. Horstkotte
TB4-1 109
FB4-1 271

I

Ichihashi, H. 市橋 秀友
SC5-2 535
SC5-3 539

Ida, M. 井田 正明
TC1-2 125

Ikeda, H. 池田 博
TB4-2 113

Ikoma, N. 生駒 哲一
SB4-4 461

Imasaki, N. 今崎 直樹
FA4-2 223

Imoto, H. 井本 博之
FC4-2 331

Imura, A. 井村 敦
TA4-1 49
FA1-3 183

Inamura, S. 稲村 聡
SC1-1 481
SC1-2 485

Inoue, H. 井上 洋司
SC4-3 527

Inoue, M. 井上 雅彦
DM1-8 563

Inoue, T. 井上 高宏
TB4-3 117
SA5-3 403
SB1-1 411

Inoue, Y. 井上 由文
SC2-1 489
SC2-2 493

Inuiguchi, M. 乾口 雅弘
TC2-1 135
TC2-2 139

Iokibe, T. 五百旗頭 正
TA1-2 15

Ishibuchi, H. 石渕 久生
TB3-1 97
FA1-1 175
SA4-2 381

Ishihara, Y. 石原 好之
FB1-2 239

Ishitobi, Y. 石飛 康浩
TC4-2 165

Itoh, K. 伊藤 公一
TA3-2 37

Itoh, O. 伊藤 修
TA2-1 23
FA4-1 219

Iwai, S. 岩井 壮介
TA3-2 37
TC1-2 125

Izumi, K. 和泉 孔二
TB1-3 75

K

Kaguei, S. 影井 清一郎
FC1-2 291
SB4-3 457

Kainuma, M. 甲斐沼 美紀子
SB5-1 465

Kakui, M. 角井 将史
FB2-1 247

Kaneda, M. 兼田 真由美
TB3-3 105

Katai, O. 片井 修
TA3-2 37
TC1-2 125

Katukura, H. 勝倉 裕
FC3-3 323

Katsumata, A. 勝亦 敦
FB4-2 275
FB4-3 279

Katsumata, Y. 勝又 保雄
FC2-2 303
FC2-4 311

Kawamura, H. 河村 廣
FA1-2 179

Kawanishi, T. 川西 利昌
FA4-3 227

Kawase, S. 川瀬 真
SA2-3 361

Kikuchi, H. 菊池 浩明
TB1-2 71

Kitagaki, I. 北垣 郁雄
FC4-1 327

Kitamori, T 北森 俊行
TS-1 3

Kodono, Y. 古殿 幸雄
TC2-3 143

Kojiri, T. 小尻 利治
TA1-3 19

Konishi, N. 小西 信明
SA1-1 341

Kosuda, T. 小須田 徹夫
SA3-1 365

Koyama, H. 小山 宏
FB3-1 259
FB3-2 263
FB3-3 267

Kume, Y. 久米 靖文
TC2-1 135
TC2-2 139

Kurio, T. 栗尾 孝
TB3-3 105

M

Mabuchi, S. 間渕 重昭
TC1-1 121

Machida, M. 町田 元也
TC3-3 155

Maeda, H. 前田 博
TC4-2 165

Maeda, M. 前田 幹夫
TA3-3 45

Maeda, Y. 前田 靖
TA3-3 45

Maeda, Y. 前田 陽一郎
SC5-1 531

Maehara, K. 前原 啓二
TC2-3 143

Maekawa, M. 前川 正弘
SA3-3 373

Masui, S. 増井 重弘
FA2-4 201
FC1-1 287
SA2-2 357

Masunari, I. 益成 一郎
SC3-3 511

Matsubara, Y. 松原 行宏
TB3-2 101

Matsuda, S. 松田 聡
SA5-1 395

Matsuda, S. 松田 信義
TB3-1 97

Matsui, K. 松井 一憲
DM1-10 --

Matushita, Y. 松下 裕
FC3-3 323

Miyake, T. 三宅 輝久
FC2-3 307
SA1-1 341

Miyakoshi, M. 宮腰 政明
TB1-1 67

Miyahara, H. 宮原 秀夫
FB2-1 247

Miyakawa, H. 宮川 裕之
DM1-2 549

Miyamoto, A. 宮本 文穂
SC3-3 511

Miyamoto, S. 宮本 定明
FC2-3 307
SA1-1 341

Miyoshi, T. 三好 力
FB3-1 259
FB3-2 263
FB3-3 267

Mizumoto, M. 水本 雅晴
TA1-1 9
SB3-1 435
SC5-4 543

Morikawa, H. 森川 英典
SC3-3 511

Morimoto, M. 森本 正昭
FC1-3 295
DM1-5 557

Morimoto, M. 守本 正範
TA2-1 23

Morinaga, T. 森永 智昭
FA2-2 193

Morioka, M. 森岡 正臣
FC2-1 299

Morita, T. 森田 恒幸
SB5-1 465

Mukaidono, M. 向殿 政男
TB1-2 71
TB2-1 79
FA2-3 197

Murai, T. 村井 哲也
TB1-1 67

Murakami, S. 村上 周太
TA3-3 45

Murakami, Y. 村上 由美子
SA4-4 389

Murase, Y. 村瀬 雄一郎
FA4-1 219

Murofushi, T. 室伏 俊明
TC3-1 147
TC3-3 155
DM1-6 559

N

Nagamachi, M. 長町 三生
TB3-2 101

Nagasawa, S. 長沢 伸也
SA1-3 349

Nagata, Y. 永田 康紀
DM1-8 563

Nagaya, K. 長屋 敬一
FA2-4 201

Naito, E. 内藤 榮一
SB3-2 441

Nakagawa, K. 中川 浩二
SC4-3 527

Nakajima, N. 中嶋 直紀
FB2-3 255

Nakajima, N. 中島 信之
FB1-1 235

Nakamori, Y. 中森 義輝
TA2-2 27
TB3-3 105
SB5-1 465

Nakamura, K. 中村 和男
FB1-3 243
SC3-1 501

Nakamura, K. 中村 健
SA4-4 389

Nakanishi, S. 中西 慎治
TB3-3 105

Nakanishi, S. 中西 祥八郎
TA4-3 63
SA4-3 385
SC1-1 481
SC1-2 485

Nakata, H. 中田 浩史
SA1-2 345

Nakayama, K. 中山 和彦
FC2-3 307

Nishino, J. 西野 順二
DM1-6 559

Nojima, K. 野島 和行
TB2-1 79

Nomoto, K. 野本 弘平
SB2-3 431

Nomura, H. 野村 博義
SB2-1 423
SB3-2 441
SB3-3 445

Nomura, J. 野村 淳二
TB3-3 105

O

Odanaka, T. 小田中 敏男
SA5-2 399

Oe, M. 大江 守之
FC3-3 323

Ogawa, A. 小川 淳
SA3-3 373

Ogi, H. 小木 元
FB1-3 243

Ohashi, Y. 大橋 由昌
SB2-3 431

Ohishi, K. 大石 潔
SA5-1 395

Ohsato, A. 大里 有生
FC1-2 291

Ohtani, H. 大谷 裕生
SA4-1 377

Ohuchi, A. 大内 東
SB2-2 427

Oka, K. 岡 活範
SB1-2 415

Okahashi, Y. 岡橋 善一
SB1-2 415

Okuda, T. 奥田 徹示
TC2-3 143

Okuma, S. 大熊 繁
TA4-2 57

Onisawa, T. 鬼沢 武久
SC2-3 497

Otani, M. 大谷 正幸
FB4-4 283
DM1-7 561
DM1-8 563

Oyamada, S. 小山田 茂
SA4-4 389

Ozawa, J. 小沢 順
TC4-1 159

S

Sadahira, M. 貞平 匡史
SB3-3 445

Sakawa, M. 坂和 正敏
SB4-1 449
SB4-2 453

Sano, M. 佐野 学
FA2-2 193
SA1-2 345
SC4-2 523

Sasaki, M. 佐々木 守
TB4-3 117
SA5-3 403
SB1-1 411

Sasaki, T. 佐佐木 綱
SC4-1 519

Sato, H. 佐藤 寿邦
SB4-3 457

Sawaragi, T. 椹木 哲夫
TA3-2 37
TC1-2 125

Sekiguchi, T. 関口 隆
FC3-2 319

Sekiya, T. 関谷 庸男
DM1-7 561

Shao, C. 邵 春福
SC4-1 519

Shiina, K. 椎名 乾平
FA3-3 215

Shiizuka, H. 椎塚 久雄
SC3-2 505

Shimbo, M. 新保 勝
TB1-1 67

Shimizu, A. 清水 昭雄
TB2-2 83

Shingu, K. 新宮 清志
FA4-3 227

Shirai, Y. 白井 雄二
TB4-3 117
SA5-3 403
SB1-1 411

Shiraishi, N. 白石 成人
SA4-1 377

Sugeno, M. 菅野 道夫
TC3-1 147
TC4-1 159
TC4-3 169
FA3-1 205
FA3-2 211
SA2-1 353
DM1-6 559

Suzuki, K. 鈴木 一如
TA2-2 27

Suzuki, N. 鈴木 規之
SB1-2 415

Suzuki, S. 鈴木 昌次
SC4-3 527

T

Tabe, T. 田部 勉
SB5-4 477

Takada, K. 高田邦雄
DM1-11 --

Takagi, H. 高木 啓史
FA4-4 231

Takagi, T. 高木 友博
TB2-3 93
TC3-2 151
FB3-1 259
FB3-2 263
FB3-3 267
SB5-3 473

Takagi, T. 高木 敏幸
TA4-3 63
SA4-3 385
SC1-1 481
SC1-2 485

Takemura, K. 竹村 和久
FC4-3 335

Tamaki, H. 玉木 博之
SC3-2 505

Tamano, K. 玉野 和保
SA5-4 407

Tanaka, H. 田中 英夫
TB3-1 97
FA1-1 175
SA4-2 381

Tanaka, K. 田中 一男
FA2-2 193
SA1-2 345
SA2-1 353
SC4-2 523

Tanaka, T. 田中 民雄
FC1-1 287

Tani, A. 谷 明勲
FA1-2 179

Tani, T. 谷 哲次
SA3-2 369

J. Teichrow
TB4-1 109

Terano, T. 寺野 寿郎
FA2-4 201
FC1-1 287
SA2-2 357

Tobi, T. 鳶 敏和
DM1-1 --

Todaka, T. 戸高 敏之
FB1-2 239

Togai, M. 戸貝 正喜
TB4-1 109
FB4-1 271
DM1-10 --

Toki, Y. 土岐 良元
DM1-10 --

Tokunaga, H. 徳永 秀和
FB4-2 275
FB4-3 279

Tokura, M. 都倉 光生
SB1-3 419

Tsuchikawa, H. 土川 浩史
SA5-1 395

Tsuda, E. 津田 栄
FC2-2 303
FC2-4 311

Tsugura, H. 津倉 洋
SA3-1 365

Tsukamoto, Y. 塚本 弥八郎
TC1-3 131

U

Uchikawa, Y. 内川 嘉樹
TA4-2 57

Uemura, Y. 植村 芳樹
FC3-1 315

Ueno, F. 上野 文男
TB4-3 117
SA5-3 403
SB1-1 411

Umano, M. 馬野 元秀
FB2-1 247
FB2-2 251
FB2-3 255
FB3-1 259
FB3-2 263
FB3-3 267
FC4-2 331
SB3-2 441

Unehara, K. 采原 敬三
TA4-3 63
SA4-3 385

Usui, M. 臼井 正和
FA4-1 219

W

Wakabayashi, N. 若林 則章
SB1-3 419

Wakabayashi, T. 若林 高明
SB2-2 427

Wakami, N. 若見 昇
SB2-1 423
SB3-2 441
SB3-3 445

Watada, J. 和多田 淳三
FC1-3 295

Watanabe, H. 渡辺 秀則
TA3-1 33

Watanabe, T. 渡辺 俊彦
SC5-2 535

Y

Yaegashi, K. 八重樫 清美
SA4-4 389

Yagi, T. 八木 建史
FB1-2 239

Yagyu, T. 柳生 辰夫
SB5-3 473

Yamagishi, K. 山岸 馨
TA2-1 23

Yamaguchi, T. 山口 享
TB2-3 93

Yamamoto, S. 山本 創造
SC2-1 489
SC2-2 493

Yamanaka, T. 山中 猛
TA2-2 27
SC5-1 531

Yamaoka, M. 山岡 正人
FA2-3 197

Yamasaki, H. 山崎 久代
SB3-3 445

Yamashita, H. 山下 元
FC2-2 303
FC2-4 311

Yanagihara, H. 柳原 弘彦
DM1-9 565

Yanagihara, N. 柳原 二郎
SA2-3 361

Yano, H. 矢野 均
SB4-1 449
SB4-2 453

Yasunobu, S. 安信 誠二
FB4-2 275
FB4-3 279
SC2-1 489
SC2-2 493

Yokoyama, K. 横山 一也
FB1-3 243

Yoneda, M. 米田 稔
TC3-2 151

Yoshida, H. 吉田 裕見
SB5-2 469

Yoshida, S. 吉田 修一
SB1-3 419

Yoshioka, M. 吉岡 雅人
DM1-5 557

Yosikawa, T. 吉川 徳重
SC4-2 523

Z

Zhang, W. 張 偉京
FA3-2 211

第6回 ファジィ システム シンポジウム 講演論文集

１９９０年９月６日発行

発行　日本ファジィ学会（ＳＯＦＴ）
〒231　神奈川県横浜市中区山下町89-1
シイベルヘグナービル４階
国際ファジィ工学研究所内
電話 045-212-8253
編集　第６回ファジィシステムシンポジウム実行委員会
実行委員長　向殿　政男（明治大学）
プログラム委員長　中西祥八郎（東海大学）