一般講演論文

9月8日（月）

自己組織化マップによる顧客ポートフォリオ分析
Customer Portfolio Analysis by using Self-Organizing-Maps

多田薫弘
Kunihiro Tada
マインドウエア
Mindware

Abstract--- In this paper, the relevance pattern about on-line mail order companies' consumer was investigated. The score matrix was decomposed using SVD. And the target customers shared by competitors, were defined on the SOM..

1. ネット通販の利用者アンケート調査

顧客シェアを推定する手がかりとなるデータを収集するために,ネット通販トップ50社についてWeb上で利用者アンケートを行った．ネット通販トップ50社は，日経MJ紙の2002年10月17日号の記事をもとに選定した．その結果，1418件の有効回答を得た．アンケートの設問項目は，下記のとおり．

■質問1　過去1年間に利用した通販・カタログ販売・オンライン・ショップなどの合計金額.

1. 0円
2. 5万円以下
3. 10万円以下
4. 20万円以下
5. 20万円以上

■質問2　通販・カタログ販売・オンライン・ショップなどの利用頻度.

1. 年に1回程度，またはそれ以下
2. 半年に1回程度，または年に2回程度
3. 2～3ヶ月に1回程度
4. 毎月1回程度
5. 毎月複数回

■質問3　オンライン・ショップ事業者（トップ50社）各社ごとのへの関与度.

1. 知らない
2. 社名は知っている
3. 利用してみたい
4. 1回利用
5. 複数回利用

なお，以上に加えて性別と年齢も質問した．結果，回答者は男女の数に偏りがあったが，SOM 学習時にこれを均衡させるように学習回数の調整を行うことができる.(ただし下記掲載のマップではこれを行わない。）調査の主たる目的は質問 3 のデータをSOM でマップ化し，ネット通販各社への関与度のパターンを平滑化することにより，顧客シェアの近似とみなされる指標を得ることである.

2. 顧客重要度と顧客シェアの計算

質問3は，回答者のネット通販各社との関わり度合いを5段階評価で回答する形式になっている．本研究では，回答の5段階は（各社からみた顧客の）等級を示していると考えて，アンケート得点を自然対数による「重みづけ得点」に変換し，戦略的指標の算出に使用した.

各回答者ごとの顧客重要度（購買力）を次のように計算する.

顧客重要度（購買力）　$P_j = 10 * \log(\frac{\sum x_i}{50 * e^{-1}})$

ただし，x_iは各社に対する重みづけ得点

すなわち,これはすべての通販事業者に対して「知っている」と答えた場合を基準として，重み得点の合計を比較するという意味である.

表2　重みづけ得点への変換

	知らない	知っている	利用したい	1回利用	複数回利用
アンケート得点	1	2	3	4	5
重みづけ得点	$e^{-2} := 0.1$	$e^{-1} := 0.4$	$e^{0} := 1$	$e^{1} := 2.7$	$e^{2} := 7.4$

顧客シェア　$S_{ij}=(\frac{x_i}{\sum x_i})*100$

すなわち，これは特定の回答者における各事業者の重みづけ得点のその回答者における比率である．

3. 特異値分解マップ

2.で述べた「重みづけ得点」の行列を，特異値分解により「回答者の特徴ベクトル」と「通販事業者の特徴ベクトル」に分解する．これは従来のコレスポンデンス分析と同様な意味で，回答者と通販事業者を同列に比較する目的である．

特異値分解は，データ行列 X を，UDV' という 3 つの行列の積に分解する．D は UV の固有値を対角成分とした対角行列である．本件の場合，UD（または $UD^{1/2}, \sqrt{n}\cdot UD$）を回答者の特徴ベクトルとし，$10V$（または $D^{1/2}V', VD/\sqrt{n}$）を通販字事業者の特徴ベクトルとして，SOM(Viscovery®)に入力する．

結果として，回答者マップと通販事業者マップの 2 つのマップが得られるが，この 2 つのマップは本質的に似た構造を持っており，回答者マップと通販事業者の特徴ベクトルをマッチングさせることもできるし，その逆も可能であるという性質を持っている．

回答者マップを作成するときには，特異値分解で得た回答者の特徴ベクトルをマップの順序づけに寄与させるが，それと同時に「重みづけ得点」や「顧客重要度」,「顧客シェア」などの変数も連結させて，順序づけには寄与させないで（重要度を"0"に設定して）入力しておくと，これらの変数を要素マップとして視覚化することができる．なお通販事業者マップは，通販事業者の特徴ベクトル V を Viscovery® に入力する．

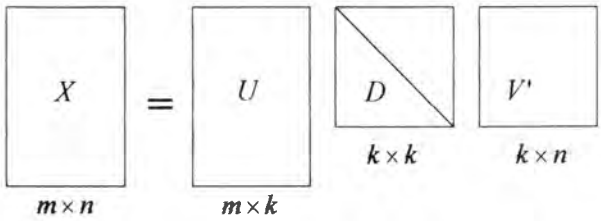


図 1　特異値分解の概要

図 2　回答者マップの学習データ

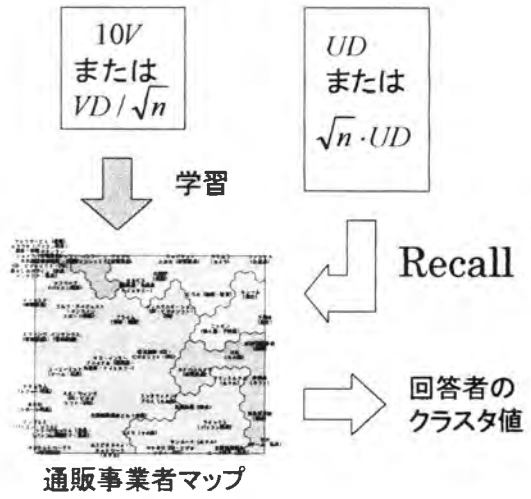


図 3　争奪顧客層のクラスタリング

図 4　通販事業者のランキング・マップ

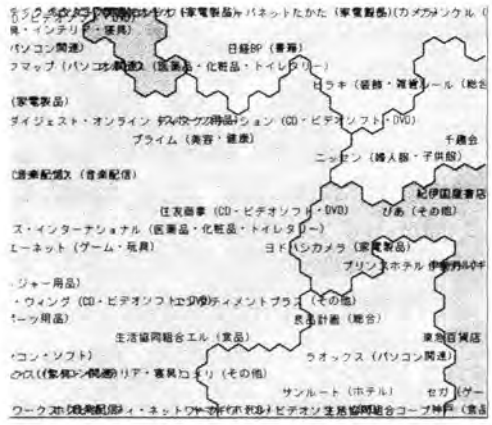


図 5　通販事業者の競合マップ

4. マーケティング力のベンチマーク

特異値分解で得た通販事業者の特徴ベクトルをSOM（Viscovery®）に入力し，SOM-Ward法により通販事業者のクラスタリングを得ることができる．このクラスタリングは，類似した顧客を持っている通販事業者どうしの競合を示すと考えられる．SOM-Ward法での最大有意度のクラスタ数は"3"（図4）であるが，さらにクラスタ数を増やすと，より細分化された競合会社のグルーピング（図5）となる．以下は，クラスタ数を"6"として，各社を比較することとする．

上記の通販業者のマップの各クラスタに，特異値分解で得た特徴ベクトルをマッチングさせることにより，各競合会社のグループごとにターゲット顧客（争奪している顧客）を特定できる．

またアンケートの質問3の回答から各社のマーケティング力を示す3つの指標（知名度・潜在顧客率・リピート率）を計算する．すなわち，「知名度」は，得点"2"以上の人数を人数の合計で除したものであり，「潜在顧客率」は得点"3"の人数を人数の合計で除したもの，「リピート率」は得点"5"の人数を得点"4"と"5"の合計で除したものである．この3つの指標を回答者全体で計算したものと，通販事業者のターゲット顧客で計算したものとで比較する．つまり，この開きが大きいほど，その通販事業者のマーケティングが有効であるということになる．

図6にセシール・ニッセン・千趣会のベンチマークを示す．1418人が回答者全体で，464人でUDと$10V$，209人が$\sqrt{n}\cdot UV$と$VD/\sqrt{n}$のマッチングである．これによりセシールが他社と比較して，潜在顧客率・リピート率において極めて優れた特性を有していることがわかる．これに対してニッセンは知名度においてセシールと並んではいるが，他の2つの指標ではセシールに大きく及ばない．

このグループは全体的にリピート率が高く顧客満足度が大きいことが想像できる．しかしながら，全体とターゲット顧客層との差でみるとセシールだけがはっきりとした指向性を持っている．したがってセシールではターゲット顧客をより的確に識別した効率的なマーケティングが行われているが，ニッセン・千趣会では，ターゲット顧客が十分に識別されていないと考えられる．

5. 戦略顧客の識別

2.で重みづけ得点から各顧客の重要度（購買力）と顧客シェアを計算した．マップの上で，購買力の高い顧客において自社の顧客シェアが高いことが理想となるが，通常，そうなることは少ない．したがって，顧客重要度と顧客シェアの双方を使って，自社にとっての戦略的顧客を定義する必要がある．

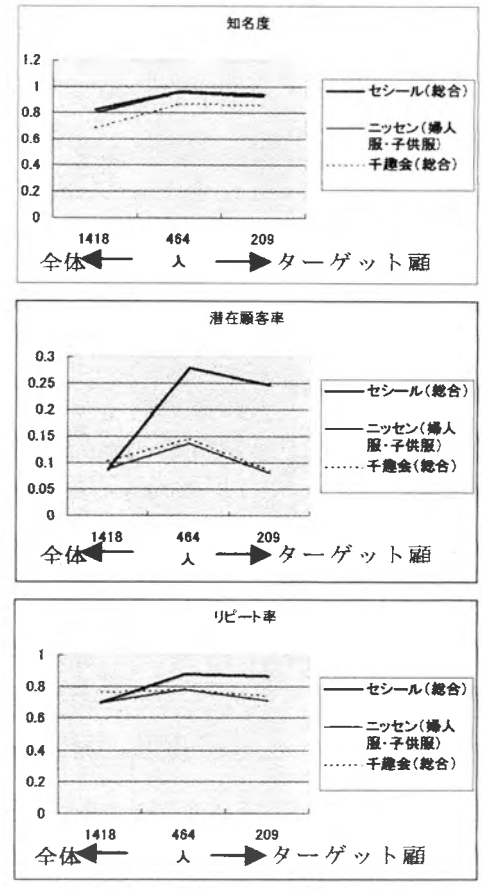


図6　マーケティング力の比較

また，ある顧客において自社の顧客シェアが高くても，強力な競合会社も同様に顧客シェアが高ければ，相対的な自社の優位性は薄れる．顧客シェアはあくまでも他社との相対的な比較の上で評価しなければならない．ここで，ある顧客が自社の製品を買うか競合他社の製品を買うかは，確率的な競争であると考えると，戦略論的にはランチェスタの第2法則の対象となるので，戦力は2乗で比較するべきである．

したがって，顧客シェアを2乗して自社と他社の比を求め，その平均をその顧客における「自社の競争力」と定義する．さらに自社競争力と顧客重要度を足して，顧客の「戦略優先度」と定義する．

平均自社相対競争力　$C_j = 10\cdot\log\left(\sum c_{ij} \Big/ n-1\right)$

対他社競争力　$C_{ij} = x_o^2 \Big/ x_i^2$

ただし，x_0は自社の重み付け得点

こうして得たマップの要素マップ（一部）を図7に示す．最終的に「戦略優先度」のマップの値の高い（赤く表示された）ノードが戦略的顧客に対応する．マップを見てわかるようにこれはマップの広い領域にわたっている．したがって，購買行動は均質ではないと判断できる．

図8の散布図で赤い楕円の点が，図9でラベリングされたノードに対応する．このように散布図ではわからない多様性がSOMのマップの上では直感的に把握される．

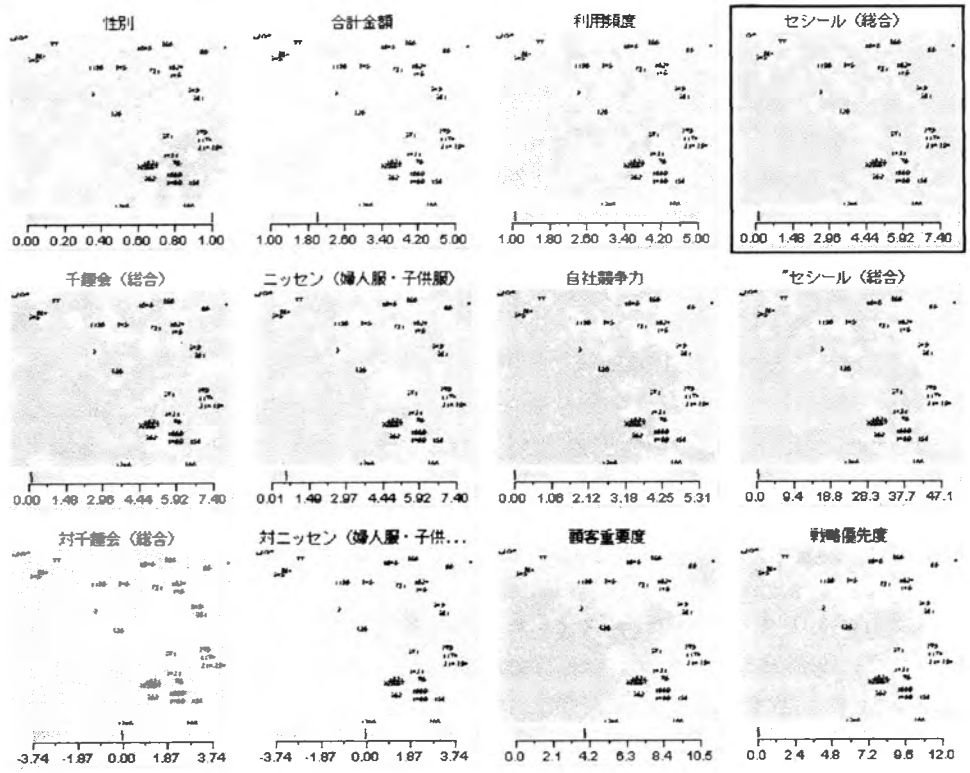


図7　戦略指標の要素マップ

6. 結論

特異値分解で得た特徴ベクトルによるマップは，線形の初期化によるマップのアスペクト比の決定において，一般的に正方形に近づきやすく，良好なマップが得られやすい．

また視覚化したいデータ要素（変数）は，マップ作成時に重要度を"0"に設定してSOM(Viscovery®)に入力することで，マップの順序づけには寄与させずに視覚化することができる．ただし，この場合はクラスタリングには注意が必要である．

異値分解で得たレコードの特徴ベクトルと変数の特徴ベクトルは，SOMのマップ上でマッチングが可能で，これにより従来にはなかった情報処理・分析が可能となる．このマッチングには内積型SOMが有利と考えられるが，通常のSOM（バッチSOM）でも計算上の操作によってマッチング可能である．

SOMはデータ集合AとBに十分な数の共通したレコード要素（たとえば同一人物）がある場合，どちらか一方にしかない変数要素を他方に連合（Associate）することができる．この性質を利用して，アンケート調査でしか得られない戦略的指標を購買履歴データからしか得られない顧客行動モデル（CBM）に取り込むことが原理的に可能である．

本研究では，データの連合の可能性を示したが，実際の購買履歴データからのCBMマップには適用されていない．今後の実証に期待したい．

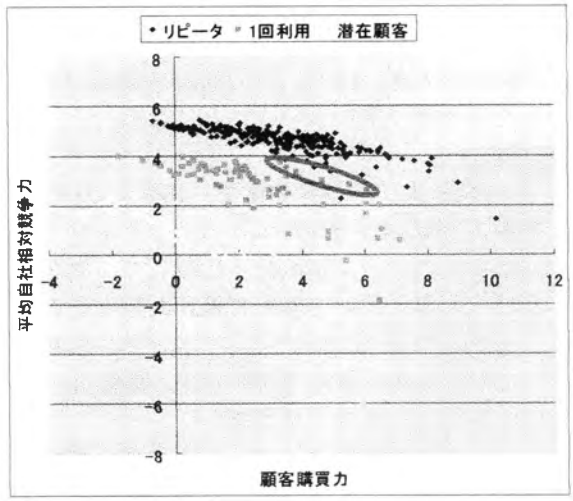


図8 平均自社相対競争力と顧

参考文献

[1]T.コホネン著，徳高平蔵他訳“自己組織化マップ”シュプリンガーフェアラーク東京，1996年，東京

[2]Gerhard Kranner, “Viscovery® Profiler version1.2 User's manual”, 2001年, Vienna.

連絡先
〒703-8243　岡山市清水2-3-10
合資会社マインドウエア
TEL. 086-234-7321　FAX. 086-234-7313
E-mail: tada@mindware-jp.com

自己組織化マップを用いた
地方公共団体における公共施設整備と財政状況の関連分析

An analysis of relationship of the construction of public institutions
and the financial status in the local autonomy using self-organizing feature map.

長谷川幸彦[*1]	安藤則明[*2]	伊藤則夫[*3]	白木渡[*4]
Yukihiko Hasegawa	Noriaki Andou	Norio Itou	Wataru Shiraki
*1 青谷町役場	*2 気高町役場	*3(有)シー・エー・イー	*4 香川大学工学部
Aoya Town office	Ketaka Town office	C.A.E Corporation	Kagawa University

Abstract: In recent years, aggravation of the financial status in the local autonomy is becoming serious. Although construction of public institutions is indispensable in order that residents may live a comfortable life. However, for finances, it is a big burden. Therefore, objective recognition of these relations is very important for a measure of a local autonomy.

In this study, the relation of a existing public institutions and a financial status is analyzed using a self-organizing feature map, and the present condition of a local autonomy is grasped.

1. はじめに

近年、地方公共団体の財政状況の悪化が深刻な問題となっている。公共施設整備事業は地域住民にとって必要不可欠であるが、地方公共団体財政にとっては大きな負担ともなる。従って、これらの関係を客観的に認識することは地方公共団体の運営にとって非常に重要な問題である。

本研究では、公共施設の整備と財政状況の関連について、自己組織化マップ(SOM)を用い分析することで、一般住民及び地方公共団体職員が容易に理解できる形で情報提供することを目的とし、地方公共団体が置かれている現状把握を行う。

SOMでは、多次元にわたる情報を低次元のマップ上に示すことが可能であり、本研究の目的に対して非常に有効な手法と考えられる。

2. 指標の選定

2-1 評価指標の前処理

本研究では、対象を全国の市とし、全国各市の財政状況、公共施設整備状況の指標を「類似団体別市町村財政指数表」[1](以下、指数表と呼ぶ)より収集した。今回使用するデータ数は全国660市のうち指数表で類似団体別各種平均値の算出対象としている573

表 1 公共施設整備状況指標および財政指標

カテゴリーⅠ	A:道路改良率、B:道路舗装率、C:永久橋比率
カテゴリーⅡ	D:都市計画区域内人口1人当たり都市公園等面積
カテゴリーⅢ	E:し尿衛生処理率、H:下水道等普及率
カテゴリーⅣ	F:ごみ焼却・高速堆肥化処理率
カテゴリーⅤ	G:上水道等普及率
カテゴリーⅥ	I:保育所幼稚園施設充足率、J:中学校非木造面積比率 K:小学校屋体不足学校比率、L:中学校非木造面積比率 M:中学校屋体充足学校比率
カテゴリーⅦ	N:会館等収容定数; O:体育館面積、P:図書館蔵書数
カテゴリーⅧ	Q:病院・診療所病床数
財政状況	R:経常収支比率、S:財政力指数、T:実質収支比率 U:将来に渡る一人当たり実質的な財政負担

表 2 データの上・下限値

各種指標の基本統計量	A %	B %	C %	D m²	E %	F %	G %	H %	I %	J %	K %	L %	M %	N 人	O m²	P 冊	Q 床	R %	S	T %	U 千円
平　均	56.6	81.1	98.1	11.3	98.7	77	95.7	53.9	125	97.6	82.5	98.1	63.2	23.1	131.4	2885.5	16.9	85.1	0.66	3.48	376
分　散	291	237	14.1	133	47.3	320	72.1	867	783	28.2	305	28.9	925	371	8025	3E+06	84.6	48.2	0.05	7.73	33,480,
最　小	13.4	14.7	67.4	0.4	22.8	0	34.7	0	51.7	56.5	0	40.2	0	0	0	0	0.4	57.8	0.1	-16	-21
最　大	97.1	100	100	152	100	99.4	100	100	292	100	100	100	100	248	627	29201	50.7	117	1.47	12.3	1,454
標準偏差(σ)	17.1	15.4	3.75	11.5	6.87	17.9	8.49	29.4	28	5.31	17.5	5.38	30.4	19.3	89.59	1699.9	9.2	6.94	0.23	2.78	183
上限値(採用値)	100	100	100	46	100	100	100	100	209	100	100	100	100	81	400	7,985.0	44.5	106	1.34	11.8	925
下限値(採用値)	5.4	34.9	86.9	0.0	78.1	23.3	70.2	0.0	41.4	81.6	30.1	82.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	64.3	0.00	-4.9	-173

市とする。

指数表に収録されている指標は表 1 のとおりであり、公共施設整備状況指標については指標の持つ性質から 8 つのカテゴリーに分類できる。以後、本論文では各指標を、それぞれ表 1 に示した A～U のアルファベットで呼ぶことにする。なお、特異なデータを排除するため、各評価指標には平均値に標準偏差の 3 倍の値を加減した値を目安として、表-2 のような上下限値を設けた。

2-2 財政状況把握のための指標

地方公共団体において、財政の運営状況を判断するにはいろいろな見方があるが、次の 3 つの財政指標に着目し評価を行うのが一般的である[2]。

(1) 実質収支比率: 財政の運営が堅実であり、収支の均衡を保っているかを示す指標。黒字または赤字を意味する。

(2) 経常収支比率: 財政の構造が経済の変動や行政内容の変化に対応できる弾力性のある状態にあるかどうかを示す指標。これが大きいということは、企業でいう固定費が大きいことと同義である。

(3) 財政力指数: 住民生活の向上や地域経済の発展に即応できる適正な行政水準が確保されているかを示す指標。1に近くあるいは1を超えるほど財源に余裕があるとされる。

本研究においては、財政状況把握のための指標として上述の 3 指標のほかに、さらに式(1)で定義される「将来にわたる一人当たりの実質的な財政負担」を加え 4 項目を用いた。

将来にわたる一人当たりの実質的な財政負担
=(地方債現在高+債務負担行為現在高
-積立金現在高)/人口 (1)

2-3 公共施設整備状況把握のための指標

全国各市における公共施設整備状況の指標は表-1 の A～Q の 17項目ある。しかし、SOM において関連の深い要素を複数入力すると、その要素を強調する効果があると言われているため[3]、各カテゴリーを代表する指標を1つずつ選択して、8 つの指標のみを使用することとした。

各カテゴリーを代表する指標を選択するために、ニューラルネットワークの一手法である BP 法を用いて公共施設整備状況指標と財政状況指標との関係を調べた。

入力・中間・出力各層のニューロン数を 17-5-1 として、公共施設整備状況の 17 指標を入力し、4 つの財政状況指標の 1 つを教師値として学習を行った。こうして得た 4 種類の BP ネットワークの入力～中間層間の重みの 2 乗和を調べたものが図 1 である。図 1 には正および負の重みの総和も合わせて示している。

BP 法では、入力層に入力された情報に重みを乗じた値が中間層に伝達される。従って、入力～中間層間の重みが 0.0 に近ければ情報は上層に伝達されず、重みの絶対値が大きい入力要素ほど出力に及ぼす影響が大きいということができる。そこで、各カテゴリーを代表する指標として重みの 2 乗和が最大の指標を選択することとした。

このようにして選択した公共施設整備状況指標を表 1 において太字で示している。ただし、カテゴリーⅠ、Ⅲについては 2 乗和最大の指標ではないが、指標の性質を考慮して有意と考えられる道路改良率および下水道等普及率を採用した。

3. 整備状況の分析

まず、整備状況のみに着目し、2-3 節で選択した A,D,F,G,H,M,N,Q の 8 つの整備状況指標に対してウォード法によるクラスター分析を行った。

クラスター分析の結果、573 市は 3 つのクラスターに分けられることがわかった。各クラスターにおける整備状況指標の平均値および標準偏差は表 3 のとおりである。表 3 を見ると、A,D,F,G,N,Q の6指標については大きな差は見られないが、H の下水道等普及率および M の中学校屋体充足学校比率ではクラスターごとにかなりの相違が認められる。

クラスター1 は下水道等普及率が高いが、中学校屋体充足学校比率は低い。このクラスターに属する市は北海道、東北地方の太平洋岸、中国地方の瀬戸内沿岸などに多く見られる(図 2(a))。クラスター3 は中学校屋体充足学校比率が高く、下水道等普及率はやや低い。このクラスターに属する市は東北地方の日本海側および北陸地方などに多く見られる(図 2(c))。クラスター2(図 2(b))は2つの指標のいずれも低く、公共施設整備があまり進んでいないグループと考えることができる。

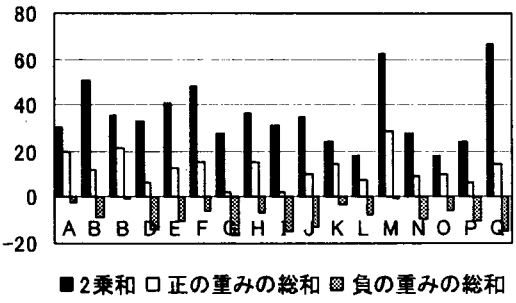


図 1 BP ネットワークの重み

表 3 クラスターごとの統計量

	クラスタ	度数	A	D	F	G	H	M	N	Q
平均	1	174	62.0	13.3	77.5	98.0	78.3	18.5	20.5	18.0
	2	262	50.9	10.0	76.9	93.2	34.9	26.5	24.4	17.7
	3	137	58.0	9.6	79.5	97.9	56.1	75.4	23.3	15.1
標準偏差	1	—	16.5	12.1	19.7	3.3	17.6	16.4	16.5	9.5
	2	—	16.2	7.0	12.9	9.2	23.9	22.7	16.2	8.7
	3	—	17.1	6.3	10.6	3.1	25.8	20.3	15.6	9.4

(a) クラスター1　(b) クラスター2　(c) クラスター3

図 2 クラスターごとの都市分布

4. 財政状況の分析

各市の財政状況の健全度を評価するために、SOM による分析を行った。SOM の競合層は 19×19、入力は 2-2 で説明した 4 つの財政指数である。学習回数は 1000 回とした。

図 3 は、学習後のマップで学習に使用した 4 つの指標のうちどの要素に対する重みが最も大きいか、あるいは小さいかをニューロンごとに調べたものである。

図 3(a) 左下隅の色の薄い領域では本来小さくあるべき経常収支比率または将来にわたる実質的な財政負担額が大きく、上側の色の濃い領域では大きくあるべき実質収支比率または財政力指数が正しく大きい。従って、**図 3** (a)の下側の領域に配置される団体は財政状況においてなんらかの問題があるといえる。

また、**図 3** (b) 左下隅の色の薄い領域では本来大きくあるべき実質収支比率または財政力指数が小さく、上側の色の濃い領域では小さくあるべき経常収支比率または将来にわたる実質的な財政負担額が小さい。この図でも、やはり、下側色の薄い領域に配置される団体は財政状況においてなんらかの問題があるといえる。

図 3 (a)と図 3 (b)を重ね合わせると、マップが図 3 (c)のように 3 つのグループに分割される。このうち、マップ左下隅の色の薄い領域は、大きくあるべき指標が小さく、逆に小さくあるべき指標が大きい領域であって、財政状況が不良であるグループといえる。そして、上側の色の濃い領域は、小さくあるべき指標が小さく、また、大きくあるべき指標が大きい領域であって財政状況は良好なグループといえる。両者に属さない中間的な色の領域は注意が必要なグループと考える。

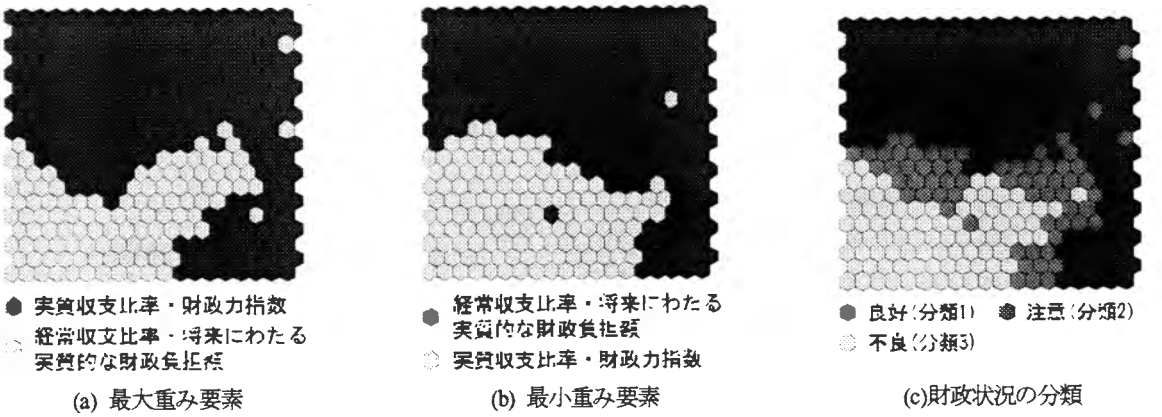
5. 公共施設整備状況・財政状況の関連分析

3節および4節において、全国各市の公共施設整備状況および財政状況をそれぞれ別々に評価し、分類を行った。本節では先の分析結果に基づき、SOM を用いて公共施設整備状況と財政状況の関連分析を行う。

競合層を 19×19 とし、8 つの公共施設整備状況指数、4 つの財政状況指数、さらに、所属するクラスター番号および財政健全度ランクの 2 項目を加えた合計 14 項目を入力して SOM の学習を行った。このとき、新たに導入したクラスター番号および財政健全度ランクの 2 項目については正規化幅を他の要素より大きく設定した。これは、3 パターンの公共施設整備状況と財政健全度の 3 つのランクで分類される 9 つのグループの並びがマップ上で明確になるように配慮したものである。

このようにして学習したマップに**表 5** に示した基準でラベリングを施すと**図 4** の様になる。なお、**表 5** の括弧内の数値は各グループに所属する市の数を示している。

表 5 および**図 4** を見ると、現在、財政状況が良いといえる団体は 573 団体中 372 団体あり、約 65%を占めている。その中で整備が遅れていると思われるクラスター2 の団体(③)は 153 団体であり財政状況が良好なグループの約 4 割を占めている。



(a) 最大重み要素　(b) 最小重み要素　(c)財政状況の分類

図 3 財政状況マップ

表 5 マップのラベリング

		財政状況		
		1:良好	2:注意	3:不良
整備状況	クラスター3	① (106)	④ (17)	⑦ (14)
	クラスター1	② (113)	⑤ (27)	⑧ (34)
	クラスター2	③ (153)	⑥ (52)	⑨ (57)

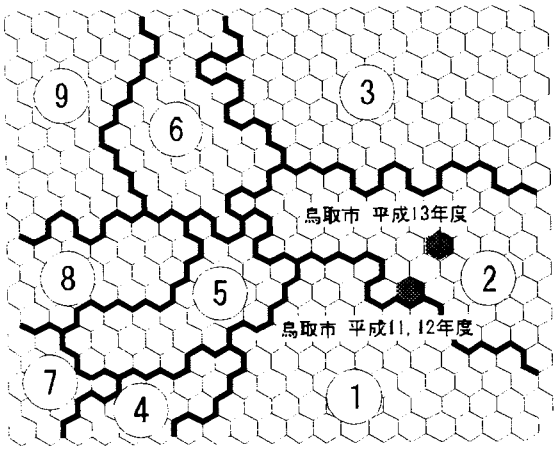


図 4 公共施設整備状況と財政状況の関連マップ

これらの団体では、今後、公共施設の整備を進めていくことになるが、それが財政状況の悪化に結びつくことのないよう、計画的に事業を進める必要があると思われる。

財政状況が不良な団体の集まり⑦,⑧,⑨のうち⑦,⑧は公共施設の整備を急速に進めた結果、財政が悪化したものと考えられ、今後は公共施設事業の実施より、既存の施設の維持管理および行政コストの削減に努め、財政を安定させる努力の必要があると考えられる。

⑨の団体については、財政状況、公共施設整備状況を再点検し抜本的な改革が必要と思われる。そのためには、その団体が置かれている状況を具体的に住民に説明し、行政および住民が共通の認識の元で、共に公共団体再建の努力をする必要がある。

いずれにしても、すべての地方公共団体は、①の集まりをめざし、将来計画を立て、常に状況を認識しながら運営に当たって行く必要がある。また、現在①の集まりにある団体は、他の方向に向かうことのない様に注意しなければならない。

6. 鳥取市の状況

筆者は、鳥取県青谷町に所属しているが、青谷町は平成 16 年 10 月をめどに鳥取市と合併する予定になっている。

鳥取市の平成 11 年度～13 年度までの公共施設整備指数と財政指数は**表 4**のようになっている。これを関連マップ上で見ると**図 4**にグレーで示した位置になる。平成11,12,13年度とも②の領域にあり、財政状況は良好であるといえる。

6. まとめ

本研究では、財政状況と公共施設整備状況を関連づけ、地方公共団体が置かれた状況を SOM により視覚に示した。これにより、一般住民及び地方公共団体職員が現状を容易に把握でき、今後の地方公共団体の運営方針を検討する際、有効な判断材料を得ることが出来る。

表 4 鳥取市の公共施設整備・財政指数

	平成 11 年度	平成 12 年度	平成 13 年度
A	67.6	67.9	68.4
D	11.4	16.3	17
F	88.9	88.9	89.1
G	99.9	99.8	99.8
H	71.2	74.6	77.2
M	-	-	100
N	-	-	27.9
Q	23	22	22
R	71.2	73.1	76.2
S	0.68	0.67	0.67
T	1.5	1.5	1.4
U	496,891	554,589	559,466

現在、多くの地方公共団体でバランスシート、行政コスト計算書の作成が実施、または検討されている。このデータを利用することで財政と公共施設整備の関連がさらに明確に把握でき、各地方公共団体の特徴を反映したマップの作成が可能になると思われる。

一方で、限られた財源を有効に活用し、住民満足度の高い行政サービスを提供するため、住民ニーズの的確な把握、地方公共団体の客観的な行政評価、および住民との協働が円滑に行えるような手法についても研究を進める必要がある。

謝辞

本研究を実施するにあたり、湖山構造研究会の会員諸兄には様々な助言をいただいた。厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

1) (財) 地方財務協会: 類似団体別市町村財政指数表(CD－ROM付), 平成15年3月
2) 出井信夫、池谷 忍: 自治体財政を分析・再建する, 大村書店, 2002 年 11 月
3) 伊藤則夫: ニューラルネットアシスタント応用例題集, 有限会社シー・エー・イー, 2002 年 8 月

連絡先

〒689-0501 鳥取県気高郡青谷町青谷 667
青谷町役場
長谷川幸彦
TEL: (0857)85-0011 FAX: (0857)85-1049
E-mail: hasegawa-y@town.aoya.tottori.jp

経済シミュレーションへのSOMの利用

Application for economic simulation with SOM

坂井　優
Yu Sakai
関西学院大学　総合政策研究科
Kwansei Gakuin University

Abstract: This study is method of simulation analysis with Economic data using SOM. Applications for that are observation of time series data as checking result of simulation in detail. And using SOM method for classification or data transformation is concerned with a program of simulation. Thus we want to discuss new method for economic simulation with SOM, if possible.

はじめに

経済データを用いて分析を行うために例として、兵庫県の経済状況をあげる。坂井他（2000）などにおいて、都道府県の政治・経済状況を表したデータを分類した研究があった。政府が地方公共団体(都道府県)に対して支払った移転支出がどのような基準で配分されているかを、政治的変数も考慮しながら自己組織化マップで分類を行い、それぞれのクラスタの特徴を線形回帰分析で考察した。本稿でもそれを踏まえながら、行政規模を市町村レベルにし、自己組織化マップによる分類と単純なモデリングによってのシミュレーションの可能性、見えてくるものを探る。
本稿のデータは兵庫県が発行する「兵庫県統計書」平成13年度版および、統計課による「市区町別データ」を利用した。

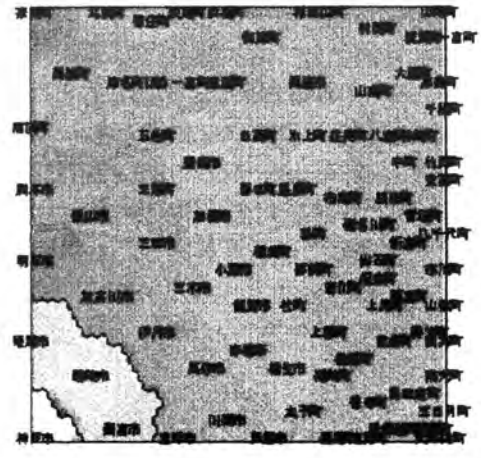
使用データ

ここでは労働のデータを用いた市町村の分類を行う。利用したデータは、{就業者数、完全失業者数、非労働力人口、雇用者数、役員数、雇人のある業主数、雇人のない業主数、家族従業者数、自市区町で従業している就業者数、他市区町村への通勤者数、従業地による就業者数、他市区町村からの通勤者数、農業就業者数、林業就業者数、漁業就業者数、鉱業、建設業、製造業、電気・ガス・熱供給・水道業、運輸・通信業、卸売・小売業、飲食店、金融・保険業、不動産業、サービス業、公務}それぞれの人数データが公表されているので、全てを比率に基準化して自己組織化マップを描くことにする。

基本モデル

前節で述べたデータに基づいて、兵庫県内の市町を分類した。その結果を図1に示す。

図1　大分類



その結果３つのクラスタが現れた。３つのクラスタに分類したクラスタは、それぞれ便宜的に左下から神戸市だけの「大都市型」、「都市型」「その他型」と名づける事にする。つまり神戸市を中心とする「大都市」から、順に「都市」「その他」と配置される事を期待し、モデルを設計する。図１で最も大きいクラスタをさらに細分化すると５つに分類され、比較的都市に近いグループが分かりやすくなってくる。（図２）

図２　細分類

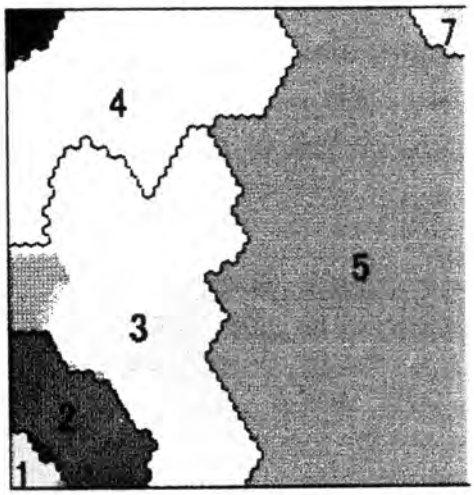


図２の3～7のクラスタが、図１の大きいクラスタ内から新たに分類されたクラスタである。性質を概観すると３は２に近く、都市型の性格を持ちうるクラスタであると考えられる。４のクラスタは、比較的第一次産業の比率が高いクラスタである。５は全ての割合が低く、3, 4 のいずれのクラスタに近いか、この時点では判断しがたい。６及び７のクラスタは、特別に林業、鉱業の比率が高い町である。

モデリングの目的としては、都市化の進展を考慮することにする。すると、ここで主に 1, 2, 3, 5 と放射状に広がるクラスタに焦点をあわせればよい。つまり 5→3→2→1 の方向へ各市町の持つデータ構造がシフトする傾向が見られれば、都市化が進展していると考えることが出来る。

結論

同じ市町を対象とした場合、今回の利用データ以外に無作為に雑多なデータを選択して分類を行っても、ほぼ今回と同じようなクラスタに分類される。その結果、各市町の状況を把握するだけの目的ならば、変数となる情報を絞り込まず、できるだけ多めに採用した方が変数を最小限に減らすよりも混乱が少ない。

今回の分析では、フィルタリングによって大きいクラスタを再分類する方法を用いると、形状的には、大分類のクラスタと同じ形に現れた。それは同時に、初めのモデルが頑健であることも意味する。ここから、他年のデータを用いるなどすると、計量経済学に用いられるシミュレーションの手法に匹敵するものと考えられる。その土台となるモデルが、単純な設定で構築できることは非常に有意義である。

参考文献

徳高平蔵、藤村喜久郎、山川烈 監修（2002）『自己組織化マップ応用事例集　SOM による可視化情報処理』海文堂出版

田平正典(2003)『地方公共支出の最適配分』多賀出版

山崎福寿、浅田義久編（2003）『都市再生の経済分析』東洋経済新報社

兵庫県「兵庫県統計書」
「市区町別データ」
http://web.pref.hyogo.jp/toukei/sikutop.htm

連絡先

〒669-1337
兵庫県三田市学園 2-1
関西学院大学　総合政策研究科

坂井　優
psdc1003@ksc.kwansei.ac.jp

自己組織化マップ(SOM)による特高受電設備における電力需要予測

Prediction of Load Power Change at the Extra-High Voltage Substation by Self-Organizing Map (SOM)

乾　正博*, 小林　琢磨**, 赤坂　剛***, 大木　誠**, 大北　正昭**
M. Inui*, T. Kobayashi**, T. Akasaka***, M. Ohki**, M. Ohkita**

* 松下産機システムエンジニアリング株式会社
** 鳥取大学工学部電気電子工学科
*** 株式会社島津製作所
* Matsushita Industrial System Engineering Co. Ltd
** Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Tottori University
*** Shimazu Corporation

[*Abstract*] In the extra-high voltage substations, it is necessary to predict load power change accurately to improve their operating efficiency and reliability. This paper investigates an application of the Self-Organizing Map (SOM), to the prediction of load power change at the extra-high voltage substations. The SOMs are constructed by learning data of recording load powers. Using the SOMs, load power patterns during a day are predicted well separately. To improve the prediction accuracy, the date of maximum and minimum atmospheric temperature is added to the above data of load powers. This paper also proves the effectiveness of our method with numerical results.

[Index terms] Self-Organizing Map(SOM), Extra-High Voltage Substation, Prediction of Load Power Change

1．まえがき

一般の受電設備における電力需要の予測は、設備の効率的な運転、並びに契約電力値の抑制と超過防止による電力コストの低減のために不可欠である。一例として、夏季における一日の電力需要値の推移を事前に知ることができれば、過負荷による設備の異常な温度上昇の事前防止、寿命延長、故障発生の抑制、並びに負荷の平準化対策による効率的な保守運用が実現できる。さらに、電力会社との契約電力の超過防止対策を早期に実施することが可能となり、同時に契約電力の抑制も期待できる。しかし、電力需要は季節、曜日などの周期的変動に加えて気象条件が複雑に関連しており、予測は困難な問題とされてきたが、近年、統計的手法を用いた予測手法[1]の提案、並びに関連性のあるデータの相関関係を学習できるニューラルネットワーク技術を用いた研究[2]～[4]も進められている。

今回、自己組織化マップ(Self-Organizing Map 以下SOM と記述) [5]～[7]を用いて、特高受電設備における電力需要の予測を行い、設備の運用に必要な予測精度が得られる見通しを得たので報告する。

2．受電設備の運転データの収集

図１に示す特高受電設備において、表１の運転データを収集した。本受電設備は特定の一需要家内の負荷に対して電力供給を行っていることから、予測手法の適用性検証に適している。これらの運転データの一例を、図２に示す。

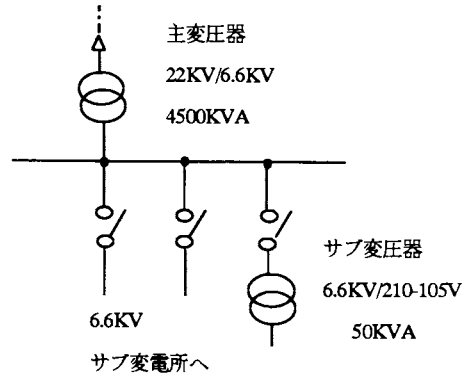


図１　特高受電設備の系統図

表１　変電所の運転データ

収集データの内容	電力需要値	0～3000kW
	気温	0～100℃
	湿度	0～100%
収集期間		2001年6月～9月
収集間隔		1時間

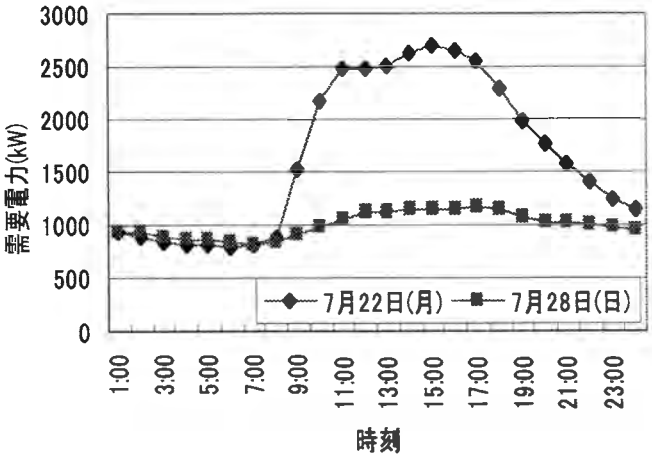


図2　運転データの一例

3．SOMの電力需要予測への適用

SOM は入力データにより特性づけられたユニットから構成されており、入力データのパターン特性により出力層で分類・表示されている。この SOM を用いて、予測時点までの既知データを入力することにより、以後の予測したいデータを得ることが出来る。これらの予測手順を整理すると次のようになる。

[Step1] 過去の実測データ(n次元)を学習することにより、SOM を作成する。この時、出力(競合)層で生成される参照ベクトルデータは、$m_i(T)$ ($i=1, 2, \cdot\cdot M$ 、 $j=1, 2, \cdot\cdot n$)となる。

[Step2] 予測したい日の既知データ P_j ($j=1,2,3,\cdots l, l<n$)を入力する。

[Step3] 入力された既知ベクトルデータ P_j と SOM 上のすべての参照ベクトルデータ $m_{ij}(T)$ を比較して、その差が最小となる、すなわち式(3.1)を満足する $m_i(T)$ を選択する。

$$\varepsilon(i) = \sum_{j=1}^{l} \left(P_j - m_{ij}(T)\right)^2 \longrightarrow \min \qquad (3.1)$$

[Step4] このようにして得られた参照ベクトルデータ $m_{ij}(T)$ ($j=l+1, l+2, \cdot\cdot n$)が、予測データとなる。

3.1 SOMによる電力需要曲線のパターン分類

特高受電設備にて収集した1時間毎の電力需要値について、データの数値変化の範囲を抑制するために式(3.2)を用いて正規化し、SOM 作成の入力データとした。また、電力需要の変化パターンは、図2で示したように平日と休日とで大幅に異なっていることから、今回は平日データと休日データに分類し、それぞれの SOM を作成して予測に用いた。

$$Xnr(i) = \frac{X(i) - X_l}{X_h - X_l} \qquad (3.2)$$

$Xnr(i)$ ： 1時間毎の正規化データ
$X(i)$ ： 測定データ
X_l ： 全測定データの最低値
X_h ： 全測定データの最高値

さらに、学習はこれらの正規化データと電力需要の変化に強い相関性のある最高気温と最低気温を用いて1日間毎に行なうようにした。また、学習は SOM_PAK (Version3.1)を使用し、その学習条件は、経験的に学習率係数 $\alpha(t)$ の初期値 $\alpha(0)$：0.02、近傍領域 $N_c(t)$ の初期値 $N_c(0)$：10、学習回数10万回、マップサイズ：40x60=2400 を選択した。図3に作成した SOM の一例を示すが、マップ上で1日毎に学習した6月から9月への電力需要曲線の変化に伴い、六角格子の濃淡により分類されていることが確認できる。

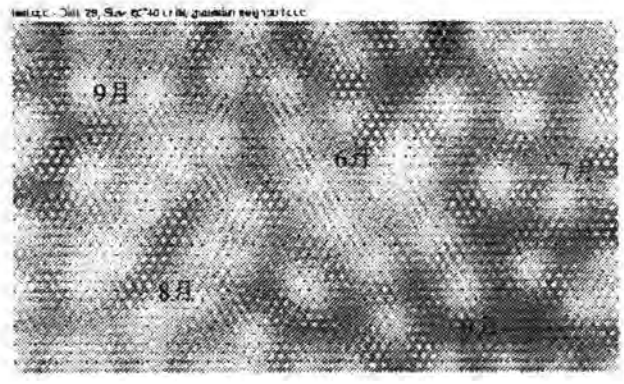


図3　SOM の一例（期間：2002 年6月～9月の平日）

3.2 電力需要の予測

（1）電力需要曲線と最大電力値の予測と評価

あらかじめ、学習データから評価日のデータを除いて SOM を作成しておき、これに評価日の早朝の実測データを入力することにより、以後の未入力データを予測結果として得た。今回、6月から9月の収集データを平日と休日に分類し、平日のデータから評価日とした7月22日(月)～26日(金)、及び8月5日(月)～9日(金)を除き、さらに休日のデータから評価日とした7月27日(土)～28日(日)、及び8月10日(土)～11日(日)を除いた入力データにより SOM を作成し、これに評価日の午前10時までの実測データを入力して、その後の電力需要の推移を予測した。平日における予測結果の一例を図4に示すが、電力需要の多い午後の時間帯に誤差の増加が認められるが、ほぼ実測値に比例した予測結果を得ており、SOM の適用による特高受電設備の電力需要予測の有効性を確認することができた。

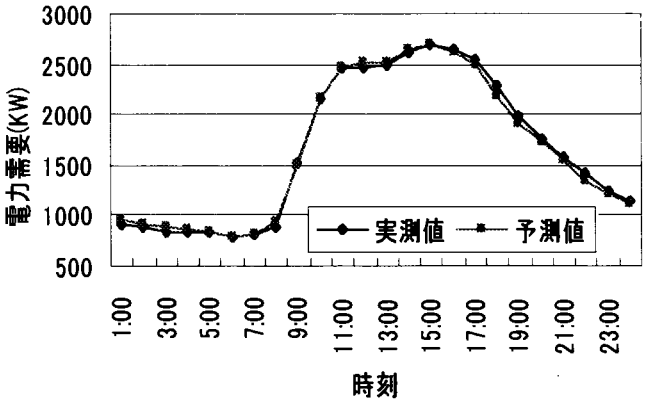


図4　電力需要の予測結果と実測値の推移例
(2002年7月22日、月曜日)

さらに、実測データに対する予測電力値の推移について評価した結果を表2に示す。この時の予測電力値の推移に対する評価値 "$E1$" は、実測値との平均誤差量(%)を示す式 (3.3) の関係によった。この評価値 "$E1$" は小さい程、予測精度が良いことを示している。

$$E1=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{\left|P_{im}-P_{ip}\right|}{P_{im}}\times 100 \quad (\%) \qquad (3.3)$$

N : データ数
P_{im} : 実測電力値
P_{ip} : 予測電力値

表2　SOMによる電力需要の予測結果と評価

評価項目		評価日 7月22日 (月:平日)	評価日 8月11日 (日:休日)
最大需要電力 (kW)	実測値	2689.6	1159.7
	予測値	2682.1	1233.2
	予測誤差(%)	−0.27	+6.34
最小需要電力 (kW)	実測値	789.0	820.7
	予測値	791.3	818.4
	予測誤差(%)	+0.29	−0.28
最大需要電力到達時刻 (時:分)	実測時刻	15:00	19;00
	予測時刻	15:00	18:00
	誤差時間	0:00	1:00
評価値:E1 (%)		2.28	2.34

(2) 不快指数値の追加学習による予測精度の向上

予測精度の向上を目的として、今までの実測電力データと気象台にて調査した最低気温と最高気温を加えた入力データに湿度情報が加味された不快指数値を加えてSOMを再作成し、同様に電力需要の予測を行った。これらの予測結果の一例を、図5〜6に示す。

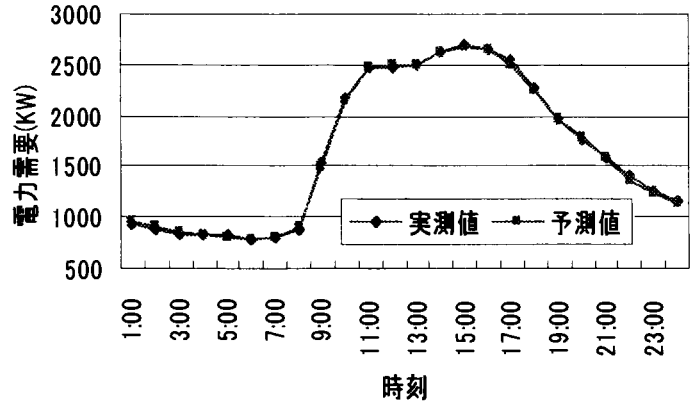


図5　不快指数値追加後の予測結果と実測値の推移
(1997年7月22日、月曜日)

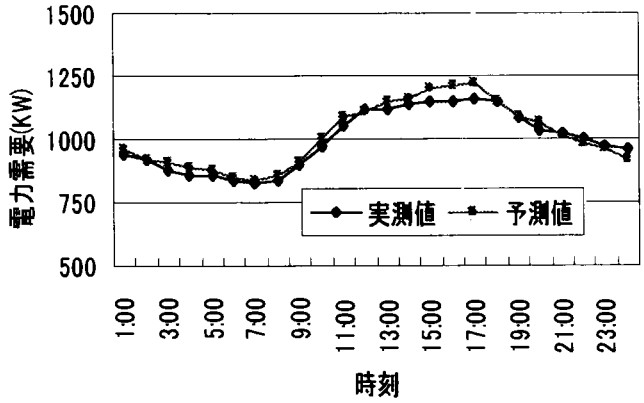


図6　不快指数値追加後の予測結果と実測値の推移
(1997年8月11日、日曜日)

この予測結果と実測値の推移を観察すると、予測結果が不快指数値の追加学習前と比較して実測値の推移により近接した誤差の少ない良好な予測精度が得られている。表3に不快指数値の追加後の予測電力値の推移について評価した結果を示す。

表3　不快指数値追加後の予測結果と評価

評価項目		評価日 7月22日 (月:平日)	評価日 8月11日 (日:休日)
最大需要電力 (kW)	実測値	2689.6	1159.7
	予測値	2679.6	1217.3
	予測誤差(%)	−0.37	+4.97
最小需要電力 (kW)	実測値	789.0	820.7
	予測値	781.6	830.1
	予測誤差(%)	−0.94	+1.14
最大需要電力到達時刻 (時:分)	実測時刻	15:00	19;00
	予測時刻	15:00	19:00
	誤差時間	0:00	0:00
評価値:E1 (%)		1.47	2.19

平日の最大需要電力の予測誤差は不快指数値追加前も数 kW(0.3%)程度に抑えられているが、評価値については不快指数値の追加により 2.28%から 1.47%に大幅に改善できている。休日については使用電力も少なく、高い予測精度は要求されないが、不快指数値を追加しても改善効果は少ない。これは休日の人為的な電力需要の減少、休日の学習データ不足などの要因によるものと推察している。また、最小需要電力と最大需要電力到達時刻についても不快指数値との相関性は低く、追加による改善効果は認められない。

4．電力管理システムへの適用

数十分から数時間後の電力需要値の高精度な予測が可能となれば、契約電力の超過防止や抑制など特高変電所での電力管理の効率化に役立てることが期待できる。今回、提案した SOM による電力需要予測手法の電力管理システムへの適用について検討した。すなわち予測精度の向上を目的として入力データに不快指数値を追加した SOM を作成し、午前 0 時から 10 時までの既知データ、並びに以降の 1 時間毎に追加した既知データを入力して得た各時刻の 1 時間後の予測電力需要値と現在行われている電力管理における予測電力需要値を比較した。従来の予測手法は、直近の使用電力量の変化率が以後も継続するものとして演算して予測電力需要値を求めているため、予測時限が長いと予測誤差が増大し、正確な電力需要管理が困難となる問題がある。これらの手法別の予測結果と実測値の推移比較についての一例を図 8 に示すが、従来手法に比べて SOM による予測手法の優位性は明らかである。

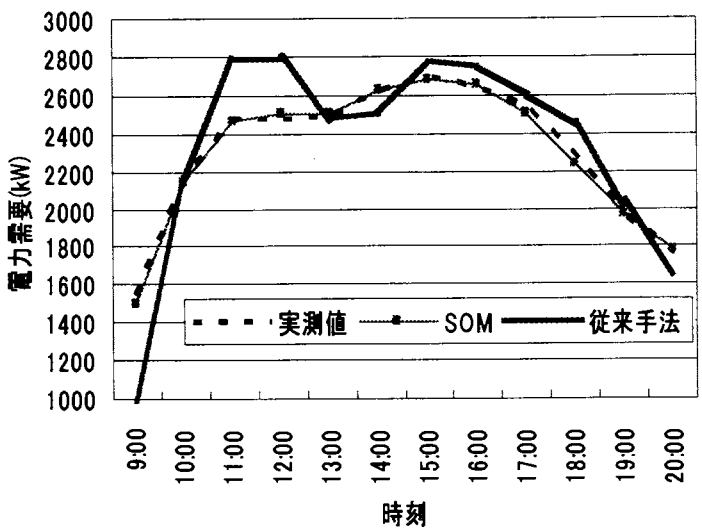


図8 SOM と従来手法による予測結果と実測値の比較
(1997 年 7 月 22 日、月曜日)

5．あとがき

多次元データの分類に効果的な技術として知られている自己組織化マップ(SOM)を用いて、一般の特高受電設備での日々の電力需要のパターンを 2 次元のマップ上に表現し、分類可能であることを示した。さらに、作成した SOM を用いて電力需要の予測を行い、気温情報に加えて不快指数情報を追加学習することにより、受電設備の運用と保守に十分な予測精度を得ることができた。また、変電所での電力管理システムへの適用の可能性について検討し、現在行われている予測手法と比較して予測誤差の大幅な低減が期待できることを確認した。さらに今回、提案した SOM を用いた予測手法では、電力需要とその変化要因の関係、月日と時間の経過などに関係なく、運用保守に必要なレベルの精度で、だれでも簡単に、機械的に、予測を行うことができる。しかし、電力需要は負荷設備の変化などにより経年的に変化するため、使用するＳＯＭも新しいデータにて、定期的に更新していく必要がある。このためのＳＯＭの自動更新、並びに精度向上を目的とした新たな入力変数の設定などの課題、使用するデータの種類と規模、及びＳＯＭの規模等の違いに対応した学習方法の最適化による改善の余地が残されており、さらに高精度な予測手法への改良を目指して行く所存である。

＜参考文献＞

[1] 灰田、武藤：「変数変換を用いた最大需要予測手法」平成 5 年電気学会電力技術研究会, PE-93-24, 1993.

[2] 加藤、須貝他：「GA を利用したリカレントニューラルネットによる翌日最大電力需要予測」電学誌 B,Vol.115,No.8, pp875~882, 1995.

[3] 植木、松井他：「ニューロ・ファジー応用最大電力予測システムの開発」電学誌 B,Vol.115,No.9,pp1038~1045,1995.

[4] 牧野、島田他：「ニューラルネットによる電力需要予測とその予測誤差低減手法の提案」電学誌 B,Vol.115,No.11, pp1304~1313,1995.

[5] T. Kohonen：「Self-Organizing Maps」(2 nd ed) Springer- Verlag, (1997).

[6] 徳高、岸田、藤村：「自己組織化マップの応用」海文堂 (1999).

[7] 乾、杜、大木、大北：「自己組織化マップ（ＳOM）を用いた配電用変電所の電力需要予測」日本ファジィ学会誌, Vol.14, No.2 pp.165 -175 (2002).

SOMを用いた住環境音の感性性能評価

Evaluation of Kansei performance on residential sound using SOM.

白木渡* 井面仁志* 壇上希代子** 伊藤則夫***
Wataru Shiraki Hitosi Inomo Kiyoko Danjyo Norio Itou
*香川大学工学部 **明石被服興業(株) ***(有)シー・エー・イー
Kagawa University Akashi Hifuku Co. C.A.E.Corporation

Abstract: In 2000, the performance indication system for houses was started. It has nine checking items for evaluating house performances such as safety, durability, maintenance, livability, and so on. The performance for residential sound is also considered as one of these nine items. However, the performances for most sound sources have not been quantified. In this study, a quantification method using Kansei Engineering and SOM approach is proposed. The effectiveness is verified through simple Kansei experiments.

1. はじめに

子供の飛び跳ね音など共同住宅の各住戸間で日常的に発生する騒音問題は、住民が快適な生活を送る上での深刻な問題となっている。平成 12 年には、消費者が住宅の性能を客観的に判断できるものさしを提供するとして、住宅性能表示制度が施行された。住宅性能表示制度では、安全性、維持管理など 9 つのチェック項目が設定されており、その中で、音環境に関する性能として足音などの重量物の衝撃音にあたる重量床衝撃音、軽量物の落下音にあたる軽量床衝撃音、そして住戸間の壁、あるいは開口部のサッシによる空気伝搬音の遮断性能を示す透過損失係数について規定されている。

これらの指標はすべて、特定の試験機器により発生させた騒音を、一定の条件下で受信した場合の音圧レベルに基づいて定義されている。音圧レベルは音の大きさを表す1つのパラメータであるが、快・不快といった人々の音に対する感覚は音の大きさのみによって評価できるものではない。そこで、本研究では、感性工学手法により人々の音に対する感性を把握し、さらに音に関する種々のパラメータと感性の関係を明らかにする。

2. 音の感性要素

音の感覚的印象は「音の大きさ」、「音の高さ」、そして「音色」の 3 つの要素で表現される。本研究で用いる音の感性要素は次のようなものである。[1],[2]

(1) ラウドネス(Loudness): 人間の聴覚によって知覚される音の大きさをいう。
ラウドネスは定常ラウドネス(Stationary Loudness)と非定常ラウドネス(Non-Stationary Loudness)から求められる。

(2) シャープネス(Sharpness): 音色に関わるパラメータで音の甲高さ(鋭さ)を表す。

(3) ラフネス(Roughness): 音の粗さを表す。

(4) 変動強度(Fluctuation Strength): 音の大きさがゆっくり変動しているときに感じる感覚を表す。

(5) Minimum/Maximum Value: 周波数ごとの定常ラウドネスの最小値および最大値。

3. 音の感性評価実験

3.1 サンプル音の準備

本研究では、まず、一般的な家庭の普段の生活の中で頻繁に起こりうる物の落下音について調べることにした。

茶わん、コップ、硬貨、本、おもちゃなど比較的軽量のものを普通のテーブルの高さに当たる床上 70cm の高さから天然木化粧複合フローリングに自由落下させ、その際に発生した音を水平距離 3m、床上 130cm の位置に設置したマイクによって録音した。床上 130cm は成人が椅子に座った状態を考慮して決めた高さである。

落下物は陶器、ガラス、金属、木材、プラスチックなどを素材とする 35 品目で重量は 1～830g である。

3.2 感性アンケート

表 1 感性ワード

No	感性ワード	No	感性ワード	No	感性ワード
1	きれいな－汚い	11	きめの細かい－粗い	21	楽しい－つまらない
2	金属性の－深みのある	12	かすれた－満ち足りた	22	引き締まった－たるんだ
3	やわらかい－固い	13	締りのない－芯のある	23	集中できる－気の散る
4	美しい－美しくない	14	調和のとれた－不調和な	24	潤いのある－潤いのない
5	騒々しい－静かな	15	丸みのある－とげとげした	25	あっさりした－しつこい
6	融け合った－ばらばらな	16	繊細な－荒れた	26	好感の持てる－好感の持てない
7	明るい－暗い	17	鮮やかな－ぼけた	27	広がりがある－広がりがない
8	耳に残る－耳に残らない	18	おとなしい－激しい	28	生き生きした－生き生きしていない
9	冷たい－暖かみのある	19	重い－軽い	29	まとまった－まとまっていない
10	地味な－派手な	20	輝きのある－輝きのない	30	華やかな－華やかでない

表 1 因子分析結果

因子	感性ワード		寄与率(%)	累積寄与率(%)	因子名
1	丸みのある－とげとげした 引き締まった－たるんだ	等 13 形容詞対	46.87	46.87	やわらかさの因子
2	繊細な－荒れた きめの細かい－粗い	等 7 形容詞対	24.90	71.77	粗さの因子
3	広がりがある－広がりがない かすれた－満ち足りた	等 6 形容詞対	10.48	82.26	乾きの因子
4	まとまった－まとまっていない 融け合った－ばらばらな	等 4 形容詞対	5.13	87.39	不調和性の因子

音に関する書籍[3],[4]から、音の評価にふさわしい、対となる形容詞62組を抽出した。そして、これらの形容詞対を用いて少数の被験者を対象とした予備実験を行い、相関が高かったもの、わかりにくいと評価されたものをのぞき、**表 11** に示す30対の感性ワードを選択した。

感性アンケートでは、1度に2人ずつの被験者にヘッドホンを介してあらかじめ録音しておいたサンプル音を聞かせ、**表 11** の感性ワードに対して5段階のSD尺度による評価を求めた[3]。被験者の総数は20名(男性10名、女性10名)で、年齢は21～23歳である。

感性アンケートの結果により、因子分析を行った結果が**表 1** である。これにより、落下音に対する人々の感性は4つの因子に集約できることがわかる。そして、**表 1** で第1因子の寄与率が50%に近いことから、落下音は主にやわらかさの因子に属する感性ワードによって評価されていることがわかる。

4. 数量化Ⅰ類による感性評価

各サンプルプル音が持つ Loudness, Stationary Loudness, Sharpness, Roughness, Fluctuation Strength, および Minimum/Maximum Value の7つの感性要素の値を大・中・小の3つのランクに分けてこれを要因とし、感性アンケートにより1つの感性ワードが得た得点の平均値を外的基準として数量化Ⅰ類による分析を行った。

図 1 は感性ワード「明るい－暗い」と感性要素の関係を示したものである。重相関係数は0.84で、この感性が7つの感性要素によってよく説明されているといえる。

偏相関係数を見るとSharpnessが0.77、Fluctuation Strengthが0.65、そしてStationary Loudnessが0.61と大きく、音の「明るい－暗い」を評価するうえでこの3つの要素の影響が大きいものと考えることができる。

図 1 から、Sharpnessあるいは Stationary Loudnessが小さければ「暗い」と感じられ、Fluctuation Strengthが小さいと「明るい」と感じられることがわかる。

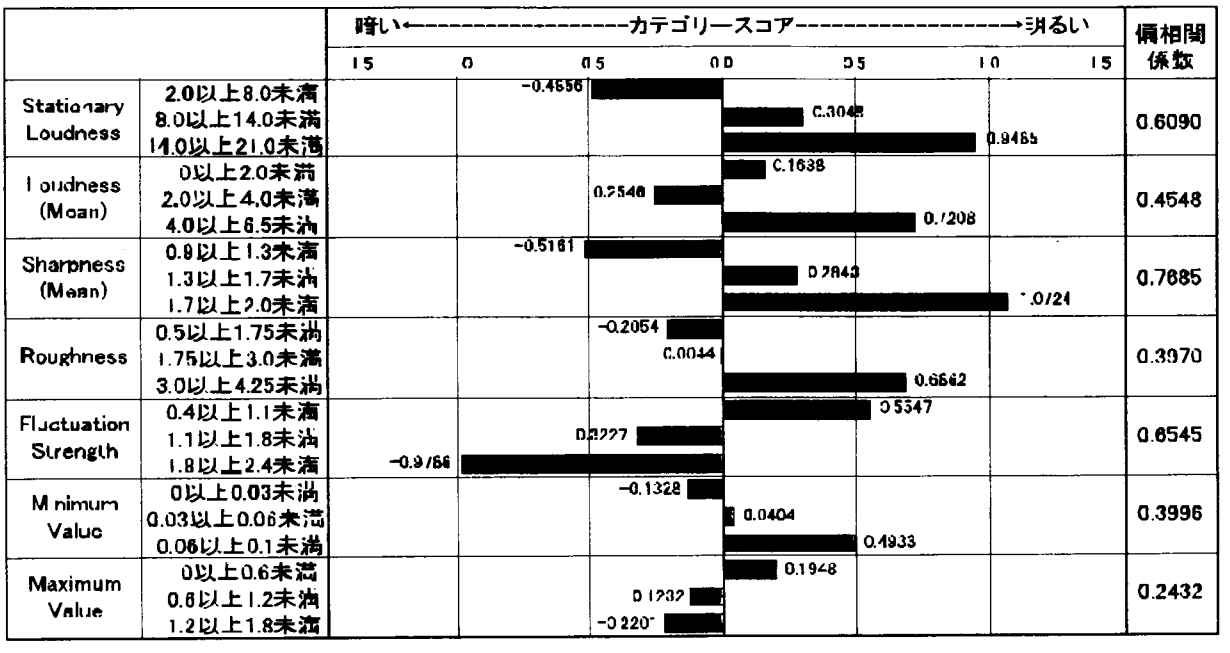


図 1 カテゴリースコア「明るい－暗い」

4. SOMによる感性評価

7つの感性要素に1つの感性ワードの得点を加えた8要素を入力としてSOM学習を行った。この際、感性ワード得点の正規化幅を他の要素より大きくすることで、サンプル音がマップ上で感性ワード得点順に配列されるように工夫している。

図 2は感性ワード「明るい－暗い」を学習したマップである。図 2(a)でわかるように明るい音がマップの上辺に、そして暗い音がマップの下方に配置されている。

図 2(b)～(h)は各感性要素の重みの分布を示したものである。数量化Ⅰ類で偏相関係数が最も大きかったSharpnessについてみると重みの大きいニューロンはマップの上辺に位置しており**(図 2(d))**、Sharpnessが大きいと明るいという数量化Ⅰ類の結果と一致している。Stationary LoudnessおよびFluctuation Strengthでは重みの大きいニューロンは主として右辺にあるが**(図 2(b), (f))**、特に大きいものはStationary Loudnessでは右上隅に、Fluctuation Strengthでは下辺にあり、これも数量化Ⅰ類の結果と矛盾はない。

図 2(b),(d)を見るとStationary Loudnessが大きいものとSharpnessが大きいものでは位置にずれがあり、それぞれの感性要素が大きいゆえに明るいと感じられる音は異なっていることがわかる。Sharpnessが大きく明るいと感じられる音は将棋の駒、木製のおもちゃ、硬貨などがある。そして、Stationary Loudnessが大きく明るいと感じられる音には陶器の湯のみ、金属製の灰皿および缶などがある。

このように、SOMを用いれば落下物の種類により「明るさ」に関する感性が異なること、さらにその違いをSharpnessやStationary Loudnessという音の感性要素により分析可能である。

5. あとがき

本研究において、一般家庭にある様々なものの落下音が人々にどのようなイメージを与えているかを調べ、さらに、音に関する種々のパラメータと人が音に対して持つイメージの関係を調べた。その結果、音のイメージに対してSharpness, Fluctuation Strengthなどの影響が大きいことがわかった。

本研究をさらに進めていくことで、人々に不快感を与える音の性質を把握でき、これらの音をカットできるような素材および工法の選定あるいは開発につなげることが可能となる。

参考文献

[1] 松下インターテクノ:Lecture Note 音質評価－メトリクス－,2001

[2] 松下インターテクノ:Lecture Note 心理音響－定性的記述,2001

[3] 福島邦彦他:視聴覚情報処理,森北出版,2001

[4] 長町三生:感性工学のおはなし,日本規格協会,1996

連絡先

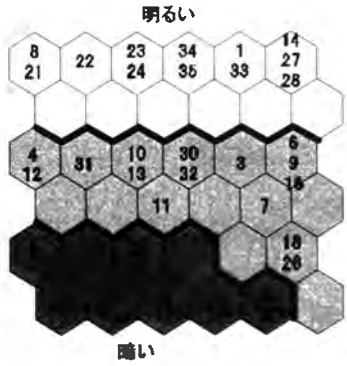
〒761-0396 香川県高松市林町2217-20

香川大学工学部 白木 渡

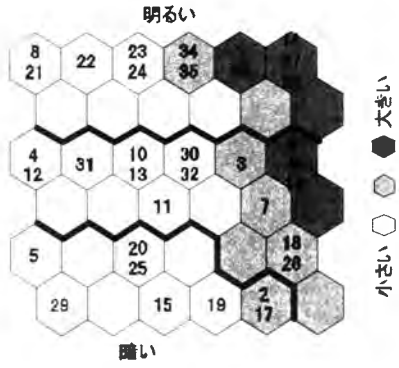
電話: 087-864-2243

FAX: 087-864-2243

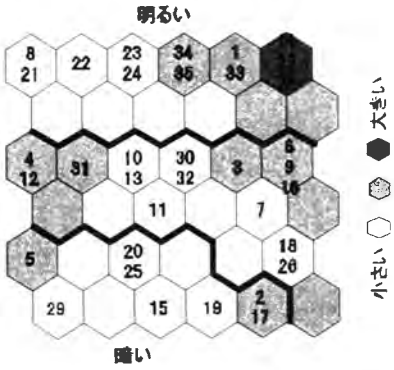
E-mail: shiraki@eng.kagawa-u.ac.jp



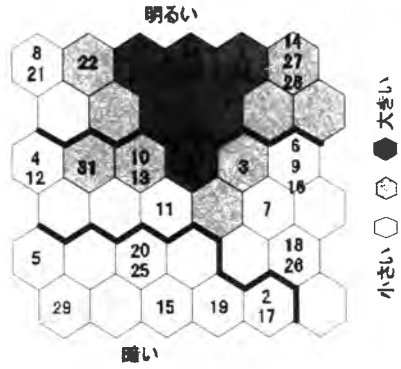
(a) 明るい－暗い



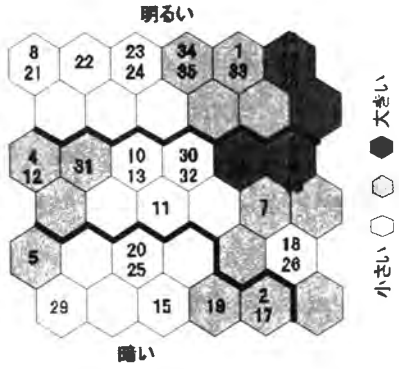
(b) Stationary Loudness の重み



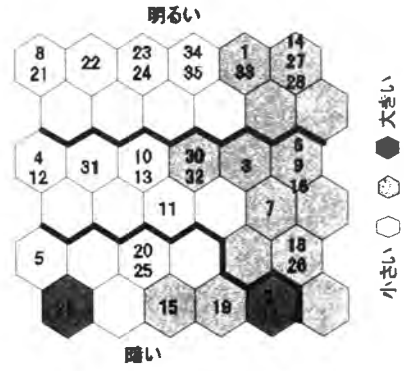
(c) Loudness の重み



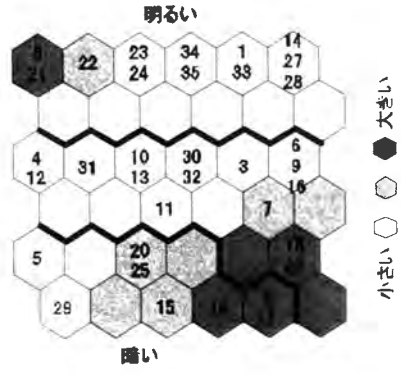
(d) Sharpness の重み



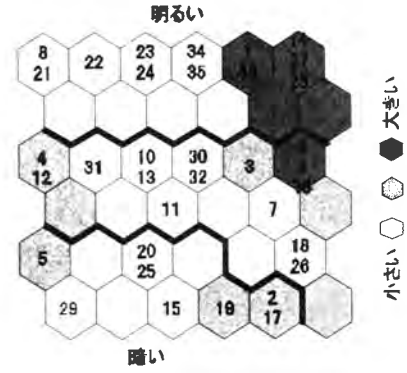
(e) Roughness の重み



(f) Fluctuation Strength の重み



(g) Minimum Value の重み



(h) Maximum Value の重み

図 2 「明るい－暗い」のマップ

自己組織化マップ(SOM)による上水道の配水量予測

Prediction of Water Supply at Waterworks by Application of Self-Organizing Map

小林琢磨 乾正博 中森弘晃
T.Kobayashi M. Inui H.Nakamori,
鳥取大学 松下産機システムエンジニアリング株式会社 奈良県桜井市水道局
Tottori Univ. Matsushita Industrial System Engineering Waterworks Bureau in Sakurai-City, Nara Prefecture

ラズマン・ビン・イスマイル 大木誠 大北正昭
R.B.Ismail, M. Ohki, M. Ohkita
Panasonic AVC ネットワーク クアラルンプール マレーシア 鳥取大学 鳥取大学
Panasonic AVC Networks Kuala Lumpur Malaysia SDN. BHD Tottori Univ. Tottori Univ.

Abstract

In the water supply service of the waterworks, it is necessary to predict water supply change accurately to improve their operating efficiency and reliability. This paper investigates an application of the Self-Organizing Map(SOM), an effective technique for classification of multi-dimensional data, to the prediction of water supply change at the local substations. The SOMs are constructed by training data of weather parameters and value of waters supply. Using the trained SOMs, water supply patterns during a day are predicted well separately. To improve the prediction accuracy, the date of another weather parameters is added to the data of water supply. In a short-term prediction, the water supply during each four hours in a day are predicted by the SOM trained by the data during each 12 hours. This paper also proves the effectiveness of our method with numerical results.

[Index terms]

Self-Organizing Map(SOM), Waterworks,Prediction of water supply,
Improvment of the prediction accuracy

1．まえがき

現在、上下水道は本格的な維持管理の時代に入り、中小都市における整備や改築、更新が進むと運転管理とともに、施設及び設備の保全管理も大きな課題となってくる。運転の自動化については導入が進められてきたが、保全管理については現場職員の技能に依存しているのが実情である。また、地方の市町村においては技術職員の数も少なく無人化や少人数管理へのニーズも高く、今後はこれら維持管理に対応した制御、計測技術も重要となってくる。

本論文においては、多次元データの分類に効果的な技術として知られている自己組織化マップ(SOM)を用いて、水道局での配水量曲線を平面上に可視化することによりパターン毎に分類可能であることを示し、さらに作成したSOMに蓄えられた過去の配水量データの頻度分布情報から配水量曲線の予測が行えることを示す。また配水量予測が可能となれば送水ポンプの効率運転や水の安定供給が可能となり、今後、水道局において重要な役割を果たすと考えられる。

本稿では自己組織化マップ(SOM)[1]を用いて配水量予測のシミュレーションを行い、精度の高い結果を得られる見通しを得たので報告する。

2．上水道設備の現状

2.1 上水道設備の問題点

本稿でのモデルとなる上水道設備における水の流れについて説明する。水道水が家庭に届くまでに、ダム等から取り入れられた原水は、水の製造工場である浄水場へ送られ、種々の設備や薬品で浄化され安全な飲み水にかえられる。浄化された水は浄水場を出て、ポンプにより配水池に蓄えられ、そこから自然流下により各家庭まで届けられる。水は1日中送り続けられ、複数台の送水ポンプが使用される。配水タンクの水位は急激な負荷

増加に対応するため常に、適当な値に保たれる。
送配水系のながれを図1に示す。

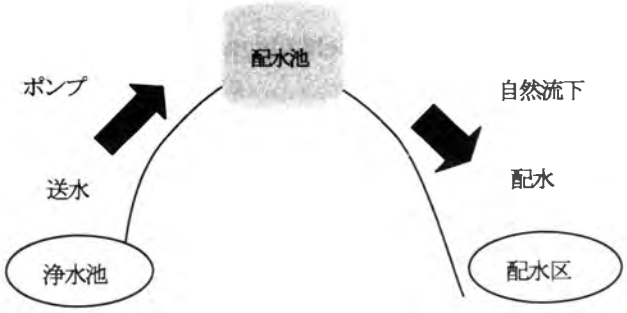


図1　送配水系のながれ

2.2　制御技術

上下水道分野の制御は、機械単位の制御から、各過程での制御、プラント全体の制御、さらにプラント間の協調、連携を図る広域運用へと広がっている。上水道においては、広域水運用計画の立案と運用が必要となり、下水道であればポンプ場と処理場との連携、雨水に対する広域連携などが必要となってくる。

ここで図2、3に、ある上水道系での晴の日と、雨/曇の日の送水量、配水量、配水タンクの水位関係を示す。送水量が配水量より多くなった場合、配水タンクの水量は多くなるため水位は上昇する。また、今回検討する配水地は住宅街を中心とする地区であり、図 2,3 からもわかるように配水量のピークは 9:00～10:30 頃と 19:30～22:00 頃に生じると推定される。これは各家庭が水を多く利用する時間と一致しているといえる。

上水道設備は、取水－浄水－送配水の各過程からなり、各過程において浄水の安定供給と安全な水質の維持という観点から、できる限り負荷変動の少ない運転管理が要求される。またポンプ動力費などの運用コストを低減させるため、夜間電力の活用と夏季における消費電力のピークカットを考慮した運用も有効である。気象情報などを入力データとして得た配水量予測ができれば送水量の制御、運用コストを削減する最適な送水運用の立案が可能となる。

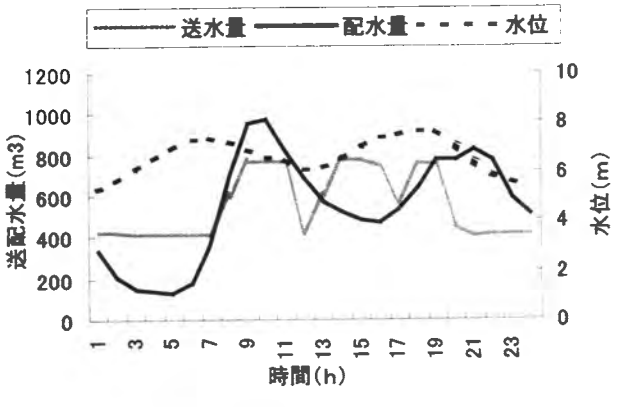


図2　送配水量と水位（8月7日　晴）

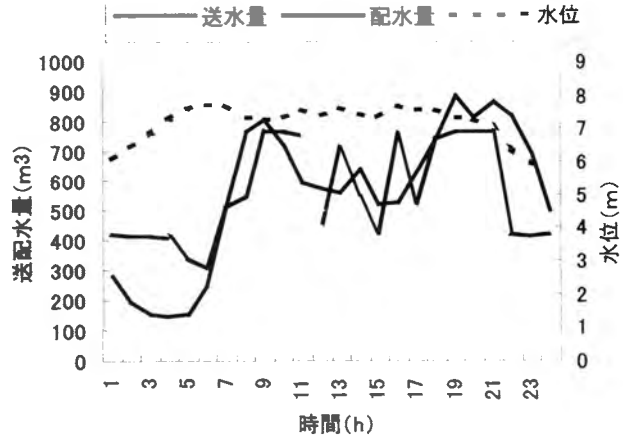


図3　送配水量と水位（8月11日　雨／曇）

3．SOMのアルゴリズム

コホネンは、生物の神経細胞、主として脳の情報処理の仕方を、簡単に式(1)のように表現した。

$$\mathbf{m}_i(t+1)=\mathbf{m}_i(t)+h_{ci}(t)[\mathbf{x}(t)-\mathbf{m}_i(t)] \qquad (1)$$

神経細胞(ノード) i が、時刻 t で処理している情報量を $\mathbf{m}_i(t)$ とする時、外部から入力信号 $\mathbf{x}(t)$ が入力されると、この細胞はこれを学習して、次の時刻 $t+1$ にはこれにより近い情報量 $\mathbf{m}_i(t+1)$ を持つようになる。

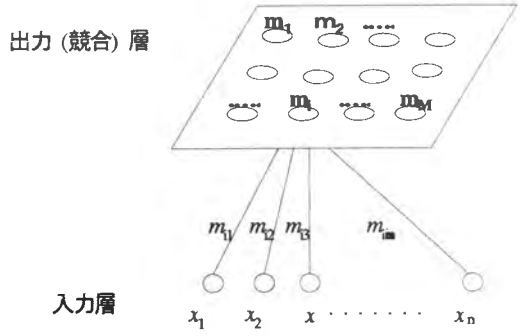


図4　SOMの構造

学習は式(1)により行う。また入力ベクトル $\mathbf{x}(t)$ を用いて、ユークリッド距離 $|\mathbf{x}(t)-\mathbf{m}_i(t)|$ を最小にする参照ベクトル $\mathbf{m}_i(t)$ を探し、$\mathbf{m}_c(t)$ とすれば、式(2)が得られる。

$$|\mathbf{x}(t)-\mathbf{m}_c(t)|=\min|\mathbf{x}(t)-\mathbf{m}_i(t)| \qquad (2)$$

この参照ベクトル $\mathbf{m}_c(t)$ を持つユニットを勝者ユニットと呼ぶ。近傍関数 $h_{ci}(t)$ は勝者ユニット $\mathbf{c}$ の回りに近傍領域を定義する。近傍領域内にあるユニット内のベクトルは、入力ベクトルの方向に少し動くことにより学習する。この動作を繰り返し行う。近傍領域のサイズを、学習の初期には大きく取っておき、学習が

進むと徐々に縮小し、最後には勝者ユニットのみ学習させるようにする。このようにして、SOMはn次元の入力ベクトル$\mathbf{x}(t)$を受け取り、出力(競合)層で視覚的に見られるように2次元に配列される。

4. 配水量予測

4.1 SOMの作成

今回、SOMの学習は1時間毎に平均処理した正規化データと配水量の変化に強い相関性のある天候係数を用いて1日間毎に行うようにし、入力層の次元を計25次元とした。また、学習はSOMのプログラムをパッケージングしたSOM_PAKを使用し、その学習条件としては、経験的に学習率係数α(t)の初期値α(0):0.02、近傍領域$N_c(t)$の初期値$N_c(0)$:5、学習回数50万回、マップサイズ:30x20=600を選択した。図4に作成したSOMマップの一例を示す[2][3]。

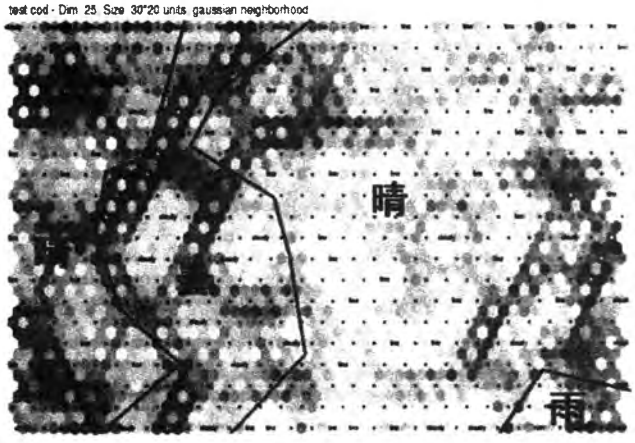


図5　SOMマップの一例

4.2 天候係数

図2~3に示したように1日の配水量変化は、天候の違いに大きく依存しており、さらに雨の日が続いた後の、晴れの日の配水量は多くなるなど生活の変化に密接に関係している。このことからSOMの学習データに天候情報を加えて配水量の予測精度の向上を試みた。

以下に2種類の天候パラメータを用いる方法1,2について考える。方法1では、天候情報は午前中の天候状態に対して雑音部分を取り除き信号成分のみを取り出すアルゴリズムとして知られているカルマンフィルターを用いて数値化した値を用いる。それぞれの数値を表1に示す。しかしカルマンフィルターにて算出した値は午前中の天候変動のみを考慮しており0.9~1.0と数値変化の幅が小さいことから、重みを大きくするために0.45~1.0までの範囲数値変化を拡大したものを学習データとして用いた。これを以下では方法2とする。方法2での天候パラメータの値を表2に示す。

表1　方法1による天候係数

晴	晴/曇	晴/雨	曇	曇/晴	曇/雨
1.00	1.00	1.00	0.93	0.93	0.93
雨	雨/晴	雨/曇			
0.90	0.90	0.90			

表2　方法2による天候係数

晴	晴/曇	晴/雨	曇	曇/晴	曇/雨
1.00	0.95	0.90	0.80	0.75	0.70
雨	雨/晴	雨/曇			
0.60	0.55	0.50			

4.3 配水量の予測

あらかじめ、学習データから評価日のデータを除いてSOMを作成しておき、これに評価日の早朝0時から6時までの実測データを入力することにより、以後の未入力データを予測結果として得た。今回、7月から9月の収集データから、評価日として8月7日(月)~13日(日)を除いた85日分の入力データによりSOMを作成し、これに評価日の午前6時までの実測データを入力し、その後の配水量の予測を行った。6時までを入力データとしたのは7時以降の配水量が増加しているためである。予測結果の一例を図4に示すが、予測結果と実測値の推移を観察すると、配水量の多い18時、19時の時間帯に誤差の増加が認められる。

また、2回目の配水量のピークとして18時以降が考えられるが、6時までを入力データとして予測した場合に夕方での配水量予測の誤差が大きかったため、夕方の予測として17時までを入力データとして予測を行った。17時までを入力した場合の結果を図5に示す。図6、7からもわかるように午前0時から午後17時までを入力した場合の方が、午後17時以降において誤差が減少していることがわかる。午前0時から6時までを入力した場合の最大誤差は13.7%であったが、午前0時から17時までを入力した場合、最大誤差は8.0%に減少した。

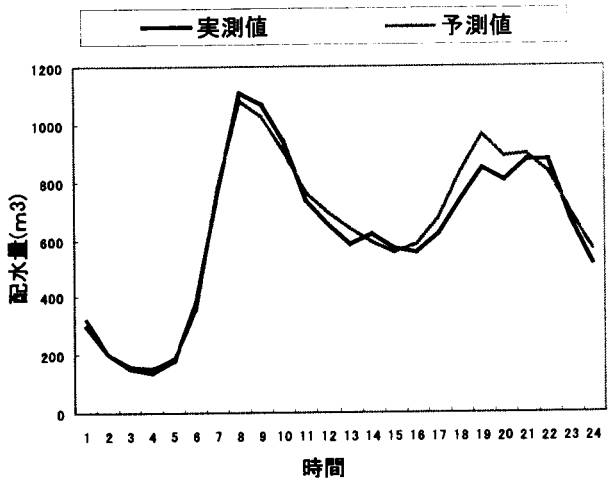


図6　6時までを入力した場合

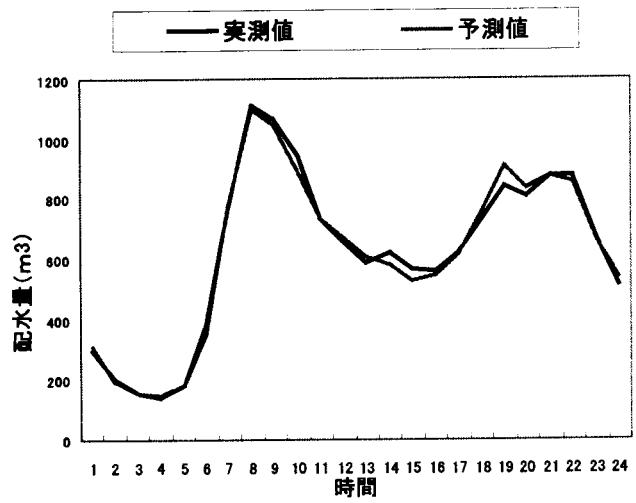


図7　17時までを入力した場合

表3　天候係数を変えた場合の誤差

日付	天気	1日の平均誤差[%]	
		方法1	方法2
8月7日(月)	晴	4.3	2.7
8月8日(火)	晴	5.6	1.8
8月9日(水)	曇/雨	3.22	2.42
8月10日(木)	晴	3.9	3.3
8月11日(金)	晴	3.62	3.11
8月12日(土)	曇/晴	6.2	4.86
8月13日(日)	曇	8.64	8.01

表3に方法2で予測した場合の平均誤差を示す。

それぞれの手法の予測精度の目安として式(3)を用いて平均配水量誤差Eを算出し表3に用いた。

$$E=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{|W_{im}-W_{ip}|}{W_{im}}\cdot 100\right) \quad (\%) \qquad (3)$$

N:データ数　W_{im}:実測配水量　W_{ip}:予測配水量

表3の結果から、いずれの評価日においても方法2の天候係数の数値変化を拡大して学習データとしたSOMによる予測誤差が少ない結果となった。このことから天候係数の重みを大きくした設定内容により予測精度が向上可能である。

なお、平日と休日を比較した場合、休日での予測誤差が大きい。これは休日での配水量減少と学習データ不足の要因によるものと推察している。以上のことから平日の予測では天候係数の最適化、並びに休日の予測では数年前の配水量データも付加した学習データの増強により、さらなる予測精度の向上が可能と考えられる。

5. あとがき

SOMを用いて上水道の配水量の予測を行い、天候情報を加えて追加学習することにより、上水道系の運用と保守に十分な予測精度を得る見通しを得た。

また、評価日を除いた7月から9月までの85日分のデータを用いて、平日と休日を分けずにSOMを作成したが、今後は過去の記録も含めた多くの学習データを用意し、さらに天候、あるいは平日と休日での分類を行い、近時パターンのみによるSOMを作成することにより、予測精度の向上が図れると考えている。

天候係数を0.45～1.00（ただし晴1.00、雨0.45）にした場合、カルマンフィルターで使用されている係数の場合に比べて予測誤差が軽減された。天候係数の与え方によって予測精度に明らかな差がみられるので、配水量は天候に大きく影響していると考えられる。今後は、配水量予測における天候係数の取り方の検討が必要であると考える。

さらに得られた予測結果から最適なポンプの運転計画を作成し、電力料金の軽減を図っていきたい。

[1] T.Kohonen：「Self-Organizing Maps」(2nd ed) Springer-Verlag, (1997).

[2] 乾　正博, 杜　紅, 大木　誠, 大北　正昭, “ファジィ制御とSOMの活用による配電用変電所母線電圧の維持と送電損失の低減”, 日本ファジィ学会誌, Vol 14, No. 2, pp. 176～189. 2002年4月.

[3] 乾　正博, 杜　紅, 矢田貝　明弘, 卜部　多加志, 大木　誠, 大北　正昭, “自己組織化マップ(SOM)を用いた配電用変電所の電力需要予測”, 電気・情報関連学会中国支部連合大会, pp. 376～377, 2001年.

連絡先

〒680－8552　鳥取市湖山町南4－101

鳥取大学　工学部　電気電子工学科　大北正昭

電話:0857-31-5699,FAX:0857-31-0880

e-mail:mohkita@ele.tottori-u.ac.jp

次元数の異なるデータに対するSOM学習方法の拡張に関する考察

A Consideration about the Expansion of SOM Learning Method with Several Dimensional Data

西 孝仁 Takahito NISHI 鳥取大学 Tottori University
三好 力 Tsutomu MIYOSHI 鳥取大学 Tottori University
増山 博 Hiroshi MASUYAMA 鳥取大学 Tottori University

Abstract: In ordinary SOM, a problem arises in distance calculation, and the learning does not work, the case that the number of the dimension is different between the data of each class. However, the method of Ito et al. had an inadequate examination in the filling method of a dimension that data does not exist. In this paper, we proposed the expansion of filling method, and experimented and considered where the optimal value of the parameters of the method exists.

1. はじめに

Kohonenの自己組織化マップ(Self-Organizing Maps: SOM)[1]は、競合学習により、高次元のデータを2次元のマップに写像し、クラスタリングを行う。しかし、各クラスのデータ間において次元数が異なっている場合、距離計算に問題が生じ、学習、クラスタリングを行えない。次元数を揃えるために単純に0などの任意の実数をデータの存在しない次元に代入しても、適切なクラスタリングが行えるとは限らない。この問題を解決する学習方法は伊藤ら[2]によって提案された。しかし、伊藤らの手法は、データが存在しない次元の補完方法において検討が不十分だった。そこで本研究では、伊藤らの手法を更に拡張した補完方法を提案し、提案手法のパラメータの最適値がどの範囲に存在するかについて実験、考察を行った。

2. 自己組織化マップ(SOM)

Kohonenの自己組織化マップとは、図1のモデルに示すように、主に2次元平面上で格子状に配置されたノード群からなる層(マップ)と、データの入力層によって構成されている。

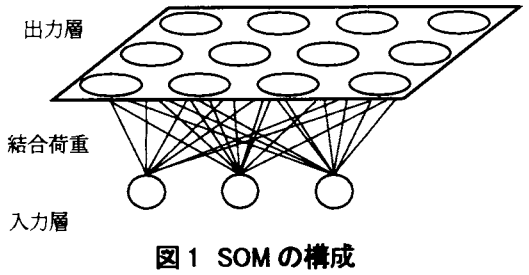


図1 SOMの構成

SOMでは、このように格子状に並んだノードが学習によって、入力データの特徴を分類する局所的近傍を持った特徴マップに自己組織化される。入力層は平面上の全てのノードと結合しており、入力データを平面上に配列された全てのノードに与えることが出来るようになっている。また、これ以外には独立した出力層というものは存在せず、平面上の全てのノードが出力となっている。このようにして、SOMは多次元ベクトルにより表されたデータを、その特徴を残し他のデータとの相互関係を保ったまま、2次元のマップに写像することが出来る。それによって、多次元のデータの関係が2次元平面上の距離として表され、視覚的に理解しやすいという利点を持っている。

3. 従来手法と問題点

SOMを用いて例1のようなデータのクラスタリングを行った場合、従来の学習方法ではクラス1とクラス2のように項目の一致したデータの学習は可能である。しかし、クラス3のようにデータの項目の一部が一致しないデータを同時に学習させることが出来ない。なぜなら、クラス1とクラス2は3次元のベクトルであるのに対し、クラス3のデータは2次元のベクトルとなり次元数が揃わず、データ同士のユークリッド距離が計算できないためである。

例1

[3.0,1.0,5.0]
[1.0,5.0,3.0]
[5.0,3.0,ϕ]
(ϕ:データが存在しない項目)

入力データのデータ数をi、次元数をjとし、各データのベクトルを次のように一般化し、表現する。

データ1 $[x_{11}, x_{12}, \ldots, x_{1j}]$
データ2 $[x_{21}, x_{22}, \ldots, x_{2j}]$
…
データi $[x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{ij}]$

伊藤らによって提案されたϕを算出する式を以下に示す。

$$\varphi_k = \beta(\max_i(x_{ik}) - \min_i(x_{ik})) + \max_i(x_{ik}) \quad (\beta > 1)$$

この式は「存在しないもの」を表現するために、他データの ϕ が存在する次元の最大値から更に正の方向へ値を遠ざけている。しかしこの手法では1方向に値を遠ざけるという作業しか行っていない。そして値を遠ざけるときの基準としているものは、他データの ϕ が存在する次元の最大値だけである。

4. 提案手法

4.1 提案手法1

提案手法1では値を遠ざける方向と、遠ざけるときの基準値の一般化を行った。k 次元目に代入したい数値を φ_k とし、次式により求める。

$$\begin{cases} \varphi_k = \beta(\max_i x_{ik} - \min_i x_{ik}) + s & \max_i x_{ik} \neq \min_i x_{ik} \\ \varphi_k = \max_i x_{ik} + C & \max_i x_{ik} = \min_i x_{ik} \end{cases}$$

$$(\beta, s \in R,\ l = 1,2,...,i,\ \text{s:基準値})$$

伊藤らの提案した手法において β の値の範囲は $\beta > 1$ であったが、今回提案する手法においては β の範囲を任意の実数とした。これによって基準から値を遠ざける方向を正の方向だけでなく負の方向にも遠ざけることが可能となる。基準値については、伊藤らが提案した手法は他データの ϕ が存在する次元の最大値しか基準値として設けていなかったが、提案手法では基準値は任意の実数とした。上記の点の改良によってより一般性が高くなると考えた。

この改良手法を用いたノード j と n 次元ベクトル $(x_1, x_2, ..., x_n)$ とのユークリッド距離 d_j の計算式を以下に示す。

$$d_j = \sum_{k=1}^{n} \alpha_k$$

α_k は入力データ x_k と出力層の各ノード w_{jk} の結合荷重との間の距離を指し、計算式を以下に示す。

$$\begin{cases} \alpha_k = (x_k - w_{jk})^2 & x_k \neq \phi \\ \alpha_k = (\varphi_k - w_{jk})^2 & x_k = \phi \end{cases}$$

φ_k はデータが存在しない次元を指す。φ_k の計算式を以下に示す。

$$\begin{cases} \varphi_k = \beta(\max(x_k) - \min(x_k)) + s & \max(x_k) \neq \min(x_k) \\ \varphi_k = C + \max(x_k) & \max(x_k) = \min(x_k) \end{cases}$$

$$(\beta, s \in R,\ \text{C:定数})$$

s は $\max_i x_{ik}$, $\min_i x_{ik}$, $(\max_i x_{ik} + \min_i x_{ik})/2$ のいずれか
$\max(x_k)$: 全データ中の k 次元の最大値
$\min(x_k)$: 全データ中の k 次元の最小値

4.2 提案手法2

各入力データのうち、データが存在しない次元数が m 個存在する時のデータが存在する次元数は $(j-m)$ 個となる。そこで入力データをもう1次元拡張し、$(j-m)$ を入力データの1つの要素として追加する。つまりデータが存在する次元数を有力データの1つの情報として見なすということとなる。この手法を一般化したものを以下に示す。

データ1 $[x_{11}, x_{12}, ..., x_{1j}, x_{1j+1}]$
データ2 $[x_{21}, x_{22}, ..., x_{2j}, x_{2j+1}]$
...
データ i $[x_{i1}, x_{i2}, ..., x_{ij}, x_{ij+1}]$
$(x_{1j+1}, x_{2j+1}, ..., x_{ij+1} = j - m)$

この手法を例 1 に適応した場合のデータは以下のようになる。

適応前	適応後
[3.0,1.0,5.0]	[3.0,1.0,5.0,3.0]
[1.0,5.0,3.0]	[1.0,5.0,3.0,3.0]
[5.0,3.0,ϕ]	[5.0,3.0,ϕ ,2.0]

この手法を、例 2 のようなデータに適応した場合、問題が生じる。

例 2

[3.0,ϕ ,5.0]
[3.0,1.0,ϕ]

この場合、拡張された次元に格納されるデータは全て 2 となり、拡張された次元は意味を成さなくなる。しかしこれは、ϕ に代入する数値を ϕ の存在する次元の他データの数値ではない数値にすればこの問題は回避できる。

この手法を適応させることで、入力データ間のユークリッド距離が近く入力データ間でデータの存在するデータが存在する次元数が異なっている場合のユークリッド距離を遠ざけることが可能になると考えた。

5. 実験結果および考察

5.1 実験 1:提案手法の有効性

実験1では、3 章で述べたような次元数が異なる場合であっても、提案手法1と提案手法2を用いることで、問題なくクラスタリングが可能かどうかについての実験を行った。提案手法1と提案手法2による自己組織化マップにおける、各クラスに属しているノードのマップ上での分布のうち、代表的なものを結果として以下に示す。

提案手法1を適応

クラス1[2.0,7.0,0.0,7.0] クラス2[0.0,3.0,3.0,0.0]

クラス3[2.0,7.0,0.0,9.0] クラス4[0.0,3.0,3.0, ϕ]

β =-3.0 の時

$s = \max_i x_{ik}$ の場合　　$s = \min_i x_{ik}$ の場合

$\varphi_4 = -18.0$　　$\varphi_4 = -27.0$

1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	0	0	0
3	3	3	3	1	1	1	0	0	0
3	3	3	0	0	0	0	4	4	4
3	3	3	0	4	4	4	4	4	4
3	3	3	0	4	4	4	4	4	4
0	0	0	0	4	4	4	4	4	4
2	2	2	2	4	4	4	4	4	4
2	2	2	2	4	4	4	4	4	4

4	4	4	4	4	0	2	2	2	2
4	4	4	4	4	0	2	2	2	2
4	4	4	4	4	0	2	2	2	2
4	4	4	4	4	0	2	2	2	2
4	4	4	4	4	0	3	3	3	3
0	0	0	0	0	1	3	3	3	3
1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
1	1	1	1	1	3	3	3	3	3

$s = \left(\max_i x_{ik} + \min_i x_{ik}\right)/2$ の場合

$\varphi_4 = -22.5$

2	2	2	2	2	0	4	4	4	4
2	2	2	2	2	0	4	4	4	4
2	2	2	2	2	0	4	4	4	4
2	2	2	2	2	0	4	4	4	4
2	2	0	0	0	3	0	0	0	4
1	1	3	3	3	3	3	3	3	0
1	1	1	3	3	3	3	3	3	0
1	1	1	3	3	3	3	3	3	0
1	1	1	3	3	3	3	3	3	0
1	1	1	3	3	3	3	3	3	0

図 2　実験結果 1.1

提案手法2を適応

クラス1[2.0,7.0,0.0,7.0] クラス2[0.0,3.0,3.0,0.0]

クラス3[2.0,7.0,0.0,9.0] クラス4[0.0,3.0,3.0, ϕ]

クラス1[2.0,7.0,0.0,7.0,4.0] クラス2[0.0,3.0,3.0,0.0,4.0]

クラス3[2.0,7.0,0.0,9.0,4.0] クラス4[0.0,3.0,3.0, ϕ ,3.0]

β =-3.0 の時

$s = \max_i x_{ik}$ の場合　　$s = \min_i x_{ik}$ の場合

$\varphi_4 = -18.0$　　$\varphi_4 = -27.0$

0	0	0	4	4	4	4	4	4	4
0	0	0	4	4	4	4	4	4	4
2	2	2	0	4	4	4	4	4	4
2	2	2	0	4	4	4	4	4	4
2	2	2	0	4	4	4	4	4	0
2	2	2	0	0	1	1	1	1	1
2	2	2	1	3	1	1	1	1	1
3	3	3	3	3	1	1	1	1	1
3	3	3	3	3	1	1	1	1	1
3	3	3	3	3	1	1	1	1	1

3	3	3	3	3	1	1	1	1	0
3	3	3	3	3	1	1	1	1	0
3	3	3	3	3	1	1	1	1	0
3	3	3	3	3	3	1	1	1	0
3	3	3	0	0	0	4	4	4	4
2	2	2	0	4	4	4	4	4	4
2	2	2	0	4	4	4	4	4	4
2	2	2	0	4	4	4	4	4	4
2	2	2	0	4	4	4	4	4	4
2	2	2	0	4	4	4	4	4	4

$s = \left(\max_i x_{ik} + \min_i x_{ik}\right)/2$ の場合

$\varphi_4 = -22.5$

0	0	3	3	3	3	3	3	3	0
0	0	3	3	3	3	3	3	0	2
0	0	3	3	3	3	3	0	2	2
1	1	3	3	3	3	3	0	2	2
1	1	1	3	3	3	3	0	2	2
1	1	1	1	0	0	0	2	2	2
1	1	1	1	0	4	4	0	0	2
1	1	1	1	0	4	4	4	4	0
1	1	1	0	0	4	4	4	4	4
1	1	1	0	4	4	4	4	4	4

図 3　実験結果 1.2

図 2、図 3 において、1 から 4 の数字はノードの属する各クラスを表しており、0 はどのクラスタにも属さないノードを示している。実験結果 1.1 と 1.2 を見ると、提案手法1と提案手法2のどのマップにおいても出力層で全てのクラスが確認され、クラスタを形成しており、問題無くクラスタリングされている。

従って実験1より、提案手法1、提案手法2を用いて正しく学習がなされたことが確認された。

5.2 実験 2:パラメータ β の最適値

実験2では、提案手法におけるパラメータ β の最適値がどのあたりにあるかを調べるための実験を行った。

ϕ に代入される数値が ϕ の存在する次元の他データと非常に近い値を取った場合、ϕ の存在するデータと存在しないデータの間の距離が近くなる。データ間の距離が近いと、ϕ の有無を代入する数値で表現できない、という理由から上記のような数値を取るのは好ましくない。

一方、ϕ に代入される数値が ϕ の存在する次元の他データから非常に遠い値を取った場合、学習終了後のマップにおいて ϕ の存在するクラスのクラスタが、ϕ の存在しないクラスのクラスタに比べて小さくなり、ϕ の存在するクラスの特徴がマップ上に反映されにくくなる、という指摘が伊藤らによってなされている。

よって、β と s の値は最適な数値を選択する必要がある。そこで、s の取り得る数値を、他データの ϕ が存在する次元の最小値、最大値、中間値の3個とし β の最適値について検討した。

この時、$|\beta| \le 1$ の場合、特に $\beta = 0, \pm 0.5, \pm 1.0$ の時 ϕ に代入される数値は上記で定めた基準値のうちの1つと同じ値となる。もし基準値となる数値を含むデータと ϕ を含むデータにおいて、数値的な違いが無く、ϕ が有るか無いかの違いしか存在しない場合、ϕ に代入される数値が基準値と等しい数値だと、2つのデータのクラスタリングは不可能となる。また、$0 < |\beta| < 0.5$ と $0.5 < |\beta| < 1.0$ に β を設定した場合、ϕ に代入される数値が ϕ の存在する次元の他データと同じ数値を取る可能性がある。このような問題が発生する危険性があるので $|\beta| \le 1$ はパラメータから除外した。

両提案手法を用いて学習させた時の出力層における、どのクラスタにも属さなかったノードの割合を手法ごとにまとめたグラフを図 4 と図 5 に示す。縦軸はどのクラスタにも属さなかったノードの割合、横軸は β の値となっている。そして、図 4 と図 5 は ϕ が4次元目に1個の時と2個の時のものを plot している。$|\beta| \le 1$ の範囲は除外した。

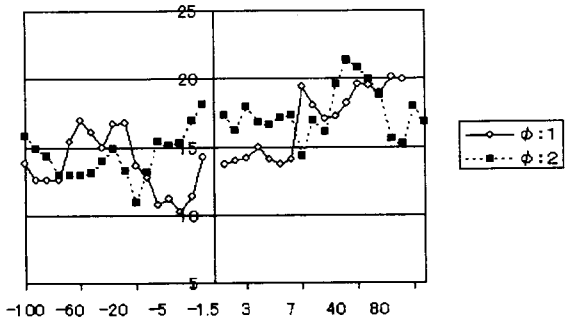


図 4 実験結果 2(提案手法1を適応)

図 4 を見ると、提案手法1において、ϕ の数に関係なく10%から21%の間で安定していると言うことが出来る。

次に、マップに形成されたクラスタの大きさを観察した。ϕ が1個の時、$10 \le |\beta| \le 100$ の範囲で ϕ の存在するクラスのクラスタが極端に小さいマップが30%-80%存在した。しかし、ϕ が2個の時、上記のようなマップはほぼ存在せず、ϕ の存在するクラスと存在しないクラスのクラスタがマップ上で多少離れて表示されたが、比較的良好なマップを得た。つまり提案手法1において ϕ が1個の時の β の最適値は $|\beta| < 10$ に存在し、ϕ が2個の時は $|\beta| > 1$ であると言える。

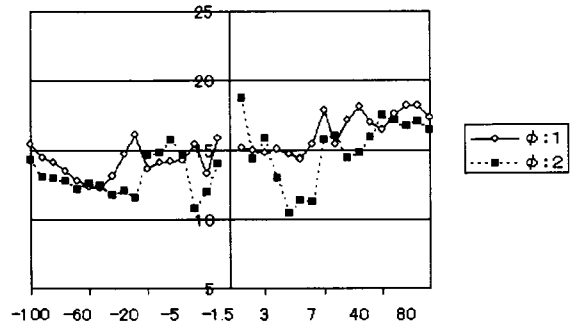


図 5 実験結果 2(提案手法2を適応)

図 5 を見ると、提案手法2において、ϕ の数に関係なく10%から19%の間で安定していると言うことが出来る。

こちらの方も、作成されたマップを観察した。ϕ が1個の時 β がどの範囲であっても ϕ の存在するクラスのクラスタはそれほど小さくならなかった。しかし、ϕ の存在するクラスと存在しないクラスのクラスタがマップ上で多少離れて表示された。ϕ が2個の時も、ϕ が1個の時と同様に ϕ の存在するクラスのクラスタはそれほど小さくならなかった。そして、ϕ の存在するクラスと存在しない同士クラスのクラスタがマップ上で多少離れて表示され、比較的良好なマップを得た。つまり、提案手法2においても $|\beta| > 1$ と言える。

伊藤らによって、β に大きな値を採用すると、マップ上で ϕ の存在するクラスのクラスタが他のクラスのクラスタよりも小さくなるという指摘があった。しかし実験の結果、ϕ の存在するクラスと ϕ の存在しないクラスが同程度であれば ϕ に代入される数値は ϕ の存在する同次元の数値を除いた任意の実数でよいことが解った。ただし、どちらかが極端に少ない場合は $|\beta| < 10$ 程度が望ましい。

6. 結論

一般的な SOM の学習方法では、入力データの次元数が異なっている場合は同時に学習させることが出来なかった。そこで、このような場合であっても学習ができるような手法を提案した。これは伊藤らによって提案された手法を一般化し、更にデータの存在する次元数も入力データの特徴の1つとして取り入れ、マップを適切なクラスタリングが行えるものに出来ないか、という観点から考えられたものである。

この手法は 5.1 と 5.2 の実験結果から、今回提案した手法が上記のような問題点を持つデータに対して有効であることが証明された。

しかし、実験結果より、改善されるべき新しい問題点がいくつか見当たった。

まずマップであるが、提案手法2において ϕ を算出する際に $\beta < 0$ を用いて ϕ を計算させた時のほうが、$\beta > 0$ の時よりも良好なマップを得る傾向が見られた。しかしその原因は解明できなかった。

次に、提案手法は1つのデータセットに対して、複数のマップを作成することが出来る。なぜなら、基準値や β のチューニングにある程度幅が広がったためである。複数個のマップのうち、どれが最も視覚的に分かりやすいものかを定量的に判断し、最良のマップを出力させる方法の提案の必要性が考えられる。

参考文献

[1] T. Kohonen, :
「Self-Organizing Map」, Springer (1997)

[2] Masahiro Ito, Tsutomu Miyoshi, Takahito Nishi, Hiroshi Masuyama: "Consideration of SOM Learning Method with Several Dimensional Data," Proceedings of International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, Tsukuba, Japan, 24P4-1 (2002).

自己組織化マップを用いた顔の表情認識

Recognition of Facial Expressions by Using Self-Organizing Map

矢野 和昭* 早人 慶子** 内野 英治**
Kazuaki Yano,* Keiko Hayato,** and Eiji Uchino**

*山口大学大学院自然共生科学専攻
*Division of Natural Science and Symbiosis, Yamaguchi University
**山口大学理学部
**Faculty of Science, Yamaguchi University

Abstract: This paper reports the experimental results of the recognition of facial expressions by a self-organizing map (SOM). In this experiment, SOM learns feature vectors of facial expression, which are extracted from images of face by 2-D DCT. The experimental results of the facial recognition rate for smile is 70 %. But, this method needs neither any normalization nor pre-processing of image, thus is simpler than the conventional methods.

1 はじめに

人間同士のコミュニケーションは，主に音声や顔の表情から感情を認知することで円滑に行われている．本研究では，離れた場所にいる人間同士の対話音声から感情情報が失われている場合でも，顔の表情認識から感情を判断することで，人間同士の円滑なコミュニケーションの実現を目指す．

顔の表情認識では，さまざまな前処理や認識モデルを用いた研究成果が今までに報告されている [1][2]．一般に用いられる手法は，アフィン変換などを施して顔画像を正規化し，前処理を施したものである．これら前処理の問題点は，目などの局所的な領域を切り出すなど，処理が複雑なことである．

本報告では，2次元の離散コサイン変換 (2-D DCT) を用いて，正規化されていない顔画像全体を特徴ベクトルで表現し，顔画像の特徴ベクトルを自己組織化マップ (SOM)[3] に学習させたときの認識実験について述べる．顔画像 smile の認識実験で得られた結果は，70 % の正解率であるが，顔画像を正規化しない本手法は，従来の方法に比べて簡単である．

2 顔画像の表情ベクトル

無表情画像 (neutral) と表情顔画像 (expression) との 2-D DCT 係数の差分の値を要素に持つ特徴ベクトルは，表情ベクトルと呼ばれる [1]．すなわち，表情ベクトルは，表情画像から無表情顔画像を引いた差分顔画像の DCT 係数を表している．

ある人物の neutral 顔画像と expression 顔画像 (anger, smile, sadness, surprise) の 2-D DCT 係数をそれぞれ $X_n(k_1,k_2)$,$X_e(k_1,k_2)$ とすると，$M \times M$ 次元の表情ベクトル Y は，次式のように定義される．

$$Y = \{X_e(k_1,k_2) - X_n(k_1,k_2)\} \tag{1}$$

ここで，$k_1,k_2 = 0,1,...,M-1$，係数 X_n, X_e は，256 階調グレースケールの 2 次元画像のピクセル値 $x(i,j)$ から求めた 2-D DCT 係数である．

3 SOM を用いた表情ベクトルの学習ベクトル量子化

SOM は，学習ベクトル量子化 (LVQ) を用いて，表情ベクトル $Y \in R^{M\times M}$ を学習する．SOM のユニットは 2 次元に配置され，ユニット i の参照ベクトル $m_i \in R^{M\times M}$ の初期値は，表情ベクトル Y からランダムに選択され与えられる．LVQ の処理では，顔の表情クラス (anger, smile, sadness, surprise) が教師情報として用いられる．

SOM の学習は，発火ユニット c を

$$c = \underset{i}{\operatorname{argmin}}\{\| Y - m_i \|\}$$

で決定し，以下のように行われる．

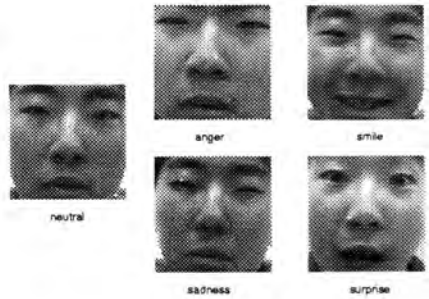


図 1: 無表情画像 (neutral) と表情顔画像 (anger, smile, sadness, surprise) のサンプル

表 1: 顔の表情に対する学習結果

顔の表情	正解率 [%]
anger	80
smile	100
sadness	80
surprise	60

(1) 表情ベクトル Y と参照ベクトル m_i が同じクラスに属するとき,

$$m_c(t+1) = m_c(t) + \alpha(t)[Y(t) - m_c(t)] .$$

(2) 表情ベクトル Y と参照ベクトル m_i が違うクラスに属するとき,

$$m_c(t+1) = m_c(t) - \alpha(t)[Y(t) - m_c(t)] .$$

(3) 更新するユニット i が発火ユニット c でないとき,

$$m_i(t+1) = m_i(t) .$$

4 実験結果

図 1 は，実験に用いた 100×100 ピクセルの顔画像のサンプルである．全ての顔画像は，図 1 のように，正規化処理をいっさい行わず，任意に切り出される．100×100 ピクセルの顔画像は，16×16 個の 2-D DCT 係数に変換され，無表情画像 (neutral) 以外の表情顔画像 (anger, smile, sadness, surprise) は，式 (1) の表情ベクトル $Y \in R^{16\times16}$ で表される．

表 1 は，LVQ アルゴリズムを用いて，5 人分の表情ベクトルを SOM に学習させた時の学習結果である．顔画像 smile は，他の顔画像にくらべて学習しやすく，顔画像 surprise は，学習しにくいことが分かる．

表 2 は，SOM の学習に用いなかった 10 人分の顔画像 smile の表情ベクトルを，SOM に認識させた時の実験結果である．SOM の学習に用いられた人物以外の顔画像 smile の認識では，正解率が 70%に低下する．これは，図 1 からもわかるように，顔画像の切り出し枠と顔全体との比率の違いが，正解率を低下させているものと考えられる．しかし，正規化処理を行わないことが本手法の特徴であるため，今後，この問題を解決していきたい．

表 2: 顔画像 smile に対する認識結果

顔の表情	正解率 [%]
smile	70

5 おわりに

本報告では，顔画像にアフィン変換などの正規化処理を行わず，そのまま 2-D DCT を施し，表情ベクトルを抽出し，自己組織化マップ (SOM) に学習させた．SOM による顔表情の認識実験での正解率が未だ低いため，正解率の向上が必要である．今後は，DCT の次元数と顔画像の切り出し枠の検討などを行い，正解率の向上をはかる．

参考文献

[1] Y. Xiao, N.P. Cahndrasiri, 田所 嘉昭, 尾田 政臣: "2-D DCT とニューラルネットワークを用いた顔画像の表情認識," 電子情報通信学会論文誌, **J81-A**, 7, pp.1077–1086, 1998.

[2] 富永 憲一, 安永 守利: "自己組織化マップ計算の高速化とその顔認識システムへの応用," 第 2 回自己組織化マップ研究会講演論文集, pp.49–54, 2001.

[3] T. Kohonen: "Self-Organizing Maps," Springer-Verlag, 1995.

連絡先

〒 794-2593
愛媛県越智群 弓削町下弓削 1000 番地
弓削商船高等専門学校 情報工学科
矢野 和昭（やの　かずあき）
TEL (0897)77-4664
FAX (0897)77-4691
E-mail *yano@info.yuge.ac.jp*

ガウス型カーネルを用いたSOM-TSP法の改良の試み

Proposal of SOM-TSP method by using Gaussian type kernel

大野豊，藤村喜久郎，徳高平蔵，大北正昭
Yutaka Ohno, Kikuo Fujimura, Heizo Tokutaka, Masaaki Ohkita

鳥取大学工学部電気電子工学科,
Department of Electrical and Electronic Engineering, Tottori University

Abstract Travelling Salesman Problem (TSP) is one of the combination optimization problems. In order to solve this TSP, *Angeniol etal* applied Self-Organizing Maps (SOM) by *Kohonen*. And, they showed that an enough, semi-best solution on practical use was able to be calculated in the realistic time interval. In this article, the method of using SOM by *Angeniol etal* was used for the base of analyzing TSP. However, the concept of adding swinging to the position of the city by using the Gaussian type kernel was there introduced. The effect is examined carefully.

1 はじめに

組み合わせ最適化問題の1つに巡回セールスマン問題 (Travelling Salesman Problem : TSP) がある．平面上に複数の都市が与えられているとき，1人のセールスマンがある都市を出発し，与えられた全てを1度だけ訪れ元の出発点に戻る場合の最短経路を求める問題である．この問題を解決するため，*Angeniol*[1] らは *Kohonen*[2] の自己組織化マップ (Self-Organizing Maps : SOM) をTSPに適用し，実用上十分な準最適解を現実的な所要時間で計算できることを示した．本稿では，*Angeniol*[1] らによるSOMを用いた方法を基礎としたTSPの解法に，ガウス型カーネルを用いて都市の位置に揺らぎを加えるという概念を導入し，その効果を検討する．

2 SOM-TSP法

今回は，この *Angeniol*[1] のアルゴリズムを部分的に改良したアルゴリズムを用いた．

変更点として，アルゴリズムの途中に都市を移動させる処理を付け加えた．*Angeniol*[1] の方法ではどうしても最適解を導き出せない場合がある．しかし，最適解が得られないからこのアルゴリズムに問題があるというわけではなく，このアルゴリズムには有効な点も多い．そこで，アルゴリズムを変えるのではなく他の何かを変えて得られる結果を改善しようと考えた．その方法として，都市を移動させ小さな雑音 (ランダムな揺らぎ) を作り出すことにより最適解を導き出せないかと考えた．

そこで，本稿では都市を移動させるのにガウス型カーネルを用いた．改良アルゴリズムのフローチャートを図1に示す．

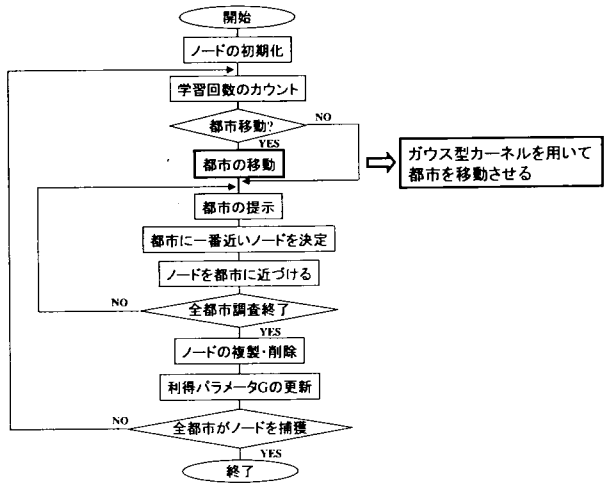


図 1: 改良アルゴリズム

3 ガウス型カーネル

図1の「ガウス型カーネルを用いて都市を移動させる」という部分では，学習回数を n 回，都市移動回数を k 回とすると，$n \leq k$のとき都市を移動させ，$n > k$ になると都市の座標は元の都市の座標とする．

都市を移動させる場合，まず現在の学習回数によって $\sigma(n)$ を決める {(1) 式 }．次にその $\sigma(n)$ によって

確率密度関数 $P(x)$ を 2 種類作成する {(2) 式 }. そしてそれらを x 座標, y 座標として $(0,0)$ を中心に作成したガウス型カーネルの中からランダムに選んだ点を都市座標に加えて都市を移動させる. ただし標準偏差を σ, 平均値を m とする.

$$\sigma(n) = \sigma \times \frac{k-n+1}{k} \quad (1)$$

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(n)^2}} exp\left\{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma(n)^2}\right\} \quad (2)$$

4 シミュレーション結果

ガウス型カーネルを用いた SOM-TSP 法の性能を評価するため, 以下の 2 種類の都市について *Angeniol* 法との比較を行う.

- 格子状 400 都市 (最適解 : 40000)
- アメリカ 532 都市 (最適解 : 86924)

いずれの都市も, 都市移動回数を 20 回と 40 回について初期標準偏差を 10〜60 と変化させながら, それぞれ乱数の種を 100 通り変えてシミュレーションを行った.

ただし, *Angeniol*法の平均値や最短経路は, 各都市についてそれぞれ 100 回シミュレーションを行って求めたものである.

図 2に格子状 400 都市 (都市間隔 100), 図 3にアメリカ 532 都市 (平均都市間隔 163.4) の座標を示す. そして, 表 1に各都市における最短平均値と最短経路を *Angeniol*法と比較してまとめた結果を示す.

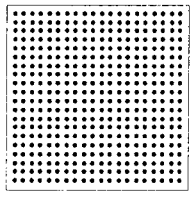


図 2: 格子状 400 都市

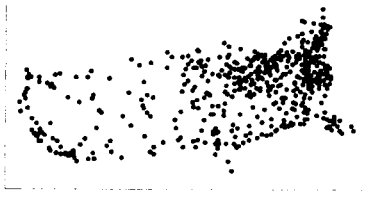


図 3: アメリカ 532 都市

表 1: 経路の比較
*( ) 内は最適解との誤差 [%]

都市数	*Angeniol*法	
	平均値	最短経路
400	41546 (3.87)	40994 (2.49)
532	93124 (7.13)	90659 (4.30)

都市数	本手法	
	最短平均値	最短経路
400	41254 (3.13)	40663 (1.66)
532	92836 (6.80)	90116 (3.67)

5 おわりに

表 1に示すように, 本手法を用いるといずれの都市においても最短平均値及び最短経路は共に *Angeniol* 法よりも良い値を得ることができた. よって本手法の有効性が示されたといえる.

しかし, アメリカ 532 都市においては最適解との誤差が大きく, まだ経路の最適化が不完全であるように思われる. これは, アメリカの西側と東側で都市の密度が違うのに, 1 つ 1 つの都市がそれぞれ同じ範囲に分布するガウス型カーネルを用いたためだと考えられる.

そこで今後の課題として, 都市の密度によって 1 つ 1 つの都市に対する σ の初期値を変化できるようにすることがあげられる.

参考文献

[1] B.Angeniol, G.de La C.Vaubois and J.Y.Le Texier: "Self-Organizing Feature Maps and the Travelling Salesman Problem" Neural Networks,1,pp.289-293, 1988.

[2] T.Kohonen, "Self-Organizing Maps", Springer-Verlag, 1995.

[問い合わせ]
〒 680-0945
鳥取県鳥取市湖山町南 4 丁目 101 番地
鳥取大学電気電子工学科
藤村喜久郎
TEL(0857)31-5243
FAX(0857)31-0880
E-mail fujimura@ele.tottori-u.ac.jp

自己組織化マップによる脈波判定システムの構築

Checkup System of Acceleration Plethysmogram using Self-Organizing Maps

○ 松下大輔[1]， 馬庭芳朗[2]， 青柳健[1]， 藤村喜久郎[1]， 徳高平蔵[1]， 大北正昭[1]
Daisuke Matsushita[1] Yoshio Maniwa[2] Takeshi Aoyagi[1] Kikuo Fujimura[1] Heizo Tokutaka[1] Okita Masaaki[1]

鳥取大学[1]
Tottori University[1]

公立おおや先端医学研究所[2]
Oyacho Pioneering Medical Laboratory[2]

Abstract
The pulse wave measurement is paid to attention as a method by which the stiffening degree and the age of the artery can be easily measured. However, it is difficult only for a general person to glance at the shape of waves of pulse wave and to understand what state I am. Then , a various research is done. An Acceleration Plethysmogram, which is the shape of waves by former the second shapes of waves are differentiated, is proposed in recent years, and the wavy evaluation method is announced. In this article, aims analysing acceleration pulse wave by self Organizing Maps(SOM),and becoming equal to doctor's analysis result.

1. 研究背景

脈波測定は動脈の硬化度や老化度を容易に測定できる方法として注目されている。しかし一般の人が脈波の波形を一見しただけでは自分がどのような状態なのか理解することは難しい。そこでこの問題をどのように解決するか様々な研究が行われている。近年は、元の波形を２次微分した波形である加速度脈波が提案され、その波形の評価法が発表されている。本論文では、自己組織化マップ(SOM)による加速度脈波の分析を行い医者の分析結果と同等になることを目標とする。

2. 脈波とは

脈波は中枢から末梢にいたる血管動態に関して多くの情報を含んでいる。心臓から送り出された血流が波動として末梢に伝達されると、心拍動、血行動態、細動脈系の性状変化など生理的条件によって修正され、波形のゆがみが生ずる。指先をセンサーに入れるだけで“今現在の動脈硬化の程度”が数秒で判る。

そのままの脈波では基線が安定せず、また波形の起伏に乏しく、変曲点を評価する事が困難であるといった問題があった。そこで波形を微分する方法が提案された。近年では２次微分した加速度脈波が提案され、その波形の評価法が発表されている。図１に血管の容積変化による容積脈波、１次微分した速度脈波、２次微分した加速度脈波を示す。

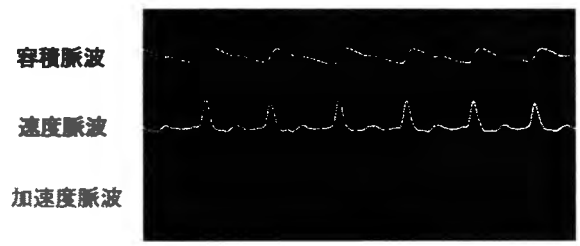


図１　脈波

3. 脈波マップの作成

3.1. 脈波データ

兵庫県の診療所で採取した279人分の加速度脈波のデータを用いた。これには医師により佐野式でA～Gの７つのグループのラベルがつけられている。佐野式の脈波分類は以下の図のようになる。

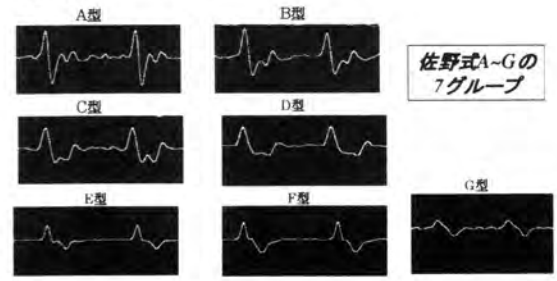


図２　佐野式脈波分類

3.2. 前処理

それぞれ被験者の加速度脈波の最大値を周期のはじめとして、５周期分切り出し。最大値から最小値を１０等分し、０から１に規格化する。

それに最大値と最小値までの間隔を加えた、計６０次元でマップを作成した。

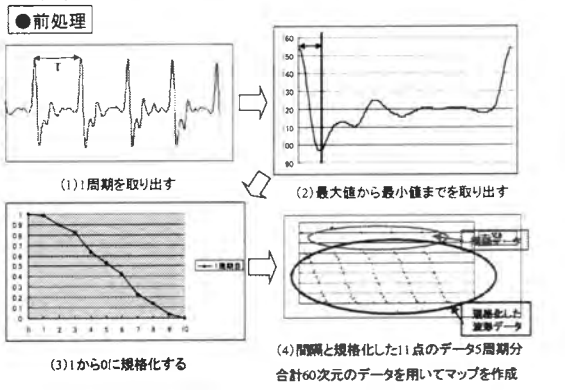


図３　前処理

3.3. 脈波マップ

図４に結果を示す。左上にA-Bグループ、中央にB-C-Dグループ、右下にE-Fグループが集まった。被験者のほとんどがB-C-DグループなのでB,C,Dグループを分類する必要があるので２層目マップを作ってB-C-Dグループの分類を試みる。

図４　脈波分類マップ

3.4. ２層目脈波マップ

２層目マップでは先ほどの１層目のマップで使用しなかったデータである最小値から第２最小値までのデータを使用してマップを作る。図５に２層目マップのイメージ図を示す。

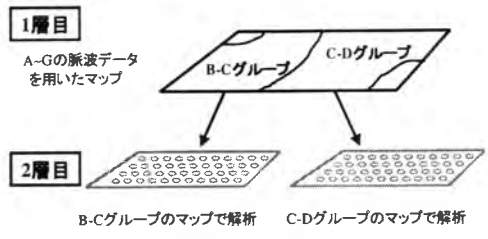


図５　２層目マップのイメージ図

１層目のB-Cグループの脈波をマップにかけると、図６のようにB-Cグループに分類することができた。

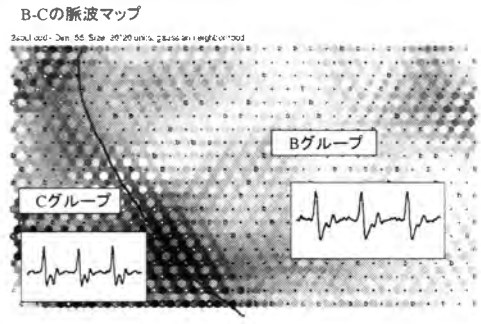


図６　B-C脈波マップ

4.おわりに

本研究では、自己組織化マップによる脈波データの分類と診断システムを作成した。加速度脈波からそれぞれ５周期分の最大から最小までの脈波データと間隔を用いたマップでは A-B グループ、B-C グループ、C-D グループ、E-F-G グループに分かれた。第２層目として第１層目で使用していない最小値から次の最小値までのデータを用い、B-C グループ、C-D グループのマップを作成することによりある程度 B と C、C と D にグループに分類できた。

今後の課題としては、更に精度の高いマップの作成や、血管年齢によるマップ作成、測定から診断まで行えるシステムの構築がある。

参考文献

[1] Teuvo Kohonen 著，中谷和夫 監訳：``自己組織化と連想記憶", シュプリンガーフェアラーク東京, 1993年２月.

[2] Teuvo Kohonen 著，徳高平蔵，岸田悟，藤村喜久郎 訳：``自己組織化マップ", シュプリンガーフェアラーク東京, 1996年６月.

[3] 徳高平蔵, 岸田悟, 藤村喜久郎：``自己組織化マップの応用-多次元情報の 2 次元可視化-", 海文堂, 1999年２月.

[4] 徳高平蔵, 藤村喜久郎，山川烈　監修：``自己組織化マップ応用事例集", 海文堂, 2002年10月.

[5] 高田晴子、鷲野嘉映,``加速度脈波と血管年齢,"教育医学第43巻第４号 pp.353-359,1998年６月

[6] 吉竹啓成,``自己組織化マップ(SOM)による脈波(P波,A 波)の分類,"鳥取大学工学部電気電子工学科平成13年度卒業論文,2002年

[連絡先]
〒680-0945
鳥取県鳥取市湖山町南４丁目１０１番地
鳥取大学工学部電気電子工学科
松下大輔
TEL (0857) 31-5243
FAX (0857) 31-0880
E-mail dai_suke1980@hotmail.com

自己組織化マップによる感性評価モデルの作成

Kansei Evaluation Model Developed by Self-Organizing Map

福岡健輔
Kensuke Fukuoka
金沢工業大学
Kanazawa Institute of Technology

大藪又茂
Matashige Oyabu
金沢工業大学
Kanazawa Institute of Technology

Abstract: In this study, *Kansei* evaluation model for handkerchiefs was developed using self-organizing map (SOM). This model is a numerical system to estimate the human emotion when someone watches handkerchiefs. Such a system has been made by other statistical methods. This paper shows the application of SOM to formation of *Kansei* evaluation model and the advantages compared with the conventional methods. Practical prediction of human feeling for handkerchiefs was carried out by using the model successfully.

1. はじめに

顧客は服などの商品のデザインを見たとき，何らかの印象を持つ．その例として，「かっこいい」や「派手だ」などが挙げられるが，顧客によって印象は様々である．このような印象は「感性」と呼ばれ，これを定量的に扱う感性工学という分野がある．この感性は，統計的な手法によって作成される数学的モデルを用いて予測することができる[1]．このモデルは，商品の開発や研究という分野にツールとして用いられ，「感性評価モデル」と呼ばれている．

通常，感性評価モデルは，数量化理論Ⅰ類[2]という統計的な手法によって作成される．小松らは，ファジィ数を導入した数量化理論Ⅰ類によって感性評価モデルを作成し，そのモデルを用いて，ハンカチのデザインを見たときに人間が抱く感性の予測に成功している [3]．この手法では，従来の数量化理論Ⅰ類では扱うことができなかった連続値をファジィ数で表現しており，明るさを表す明度などの数値をファジィ数として扱っている．これに対し，我々の研究では，明度などの連続値をファジィ数ではなく通常の連続値のまま扱って感性評価モデルを作成するため，自己組織化マップ（SOM）のアルゴリズムを用いることにした．SOM はサンプル間の関係をマップ上でわかりやすく視覚化し，認識するという特徴をもっている．本論文では，SOM を用いて感性評価モデルを作成し，それを使用して人間の感性を予測するまでの手法，および SOM を使用した場合の利点を示す．

2. 実験方法

2.1 実験の流れ

図 1 は画像による感性評価実験と，モデルを作成して感性評価値を予測するまでの手順を示したフローチャートである．

最初に，収集したハンカチ 34 枚をスキャナーに取り込み画像にする．そして，それらの画像を 9 人の被験者に見せ，感性評価を行ってもらう．それによって得られた感性評価値の 9 人の平均値を求める．また，各画像に関して特徴量ベクトルを作成する．以上の工程で得られたデータを SOM のアルゴリズムに入力し，マップを作成する．最後に，SOM のマップを使用して感性評価値の予測を行う．

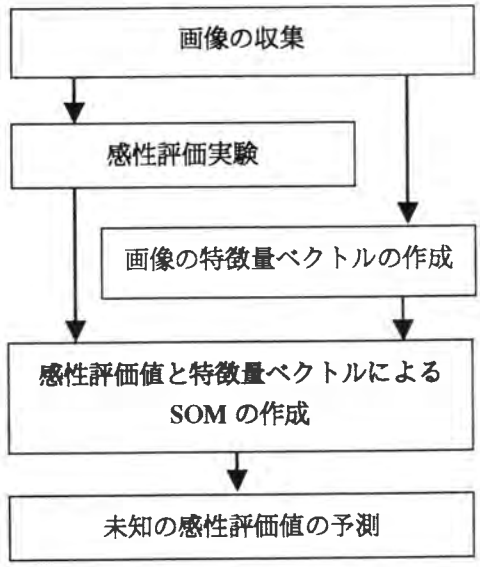


図 1　SOM による感性評価モデル作成の流れ

2.2 感性評価実験

感性評価実験には，34 枚のハンカチの画像を使用した．画像は，市販のハンカチをスキャナーに取込むことよって得られた 256×256 画素のビットマップである．これらの画像を CRT 上に表示し，被験者に見せ，評価してもらった．被験者は，いずれも男子学生である．評価の方法には QDA (quantitative descriptive analysis)を使用し，被験者が各画像に対して 9 つの形容詞対によって 5 段階の評価をした．

暗い　1　2　3　4　5　明るい

図 2　形容詞対による 5 段階評価

9 つの形容詞対のうち，被験者間で評価が一致したものだけを選定し，感性評価値の予測に使用した．評価が一致しているかどうかは，9 人の被験者間の相関で判断した．各形容詞対について，被験者 2 人の 34 枚の画像に対する評価値の相関係数を算出し，それをすべての被験者の組み合わせで行い，計 36 組の相関係数の平均値を求めた．この値が 0.5 以上の形容詞対を選定し，その対を表 1 に示した．

表 1　形容詞対の選定

形容詞対			被験者間の相関
明るい	－	暗い	0.67
女らしい	－	男らしい	0.62
軽い	－	重い	0.57
派手な	－	地味な	0.55
やさしい	－	きつい	0.50
鮮やかな	－	鮮やかでない	0.43
きれいな	－	きれいでない	0.33
暖かい	－	涼しい	0.31
落ち着く	－	落ち着かない	0.27

選定
削除

2.3 特徴量ベクトル

特徴の分類は，主に，蝶の標本画像の特徴量ベクトルを作成した日向らの論文を参考にして行った[4]．

使用したハンカチ画像の特徴量ベクトルの算出法は，表 2 から表 6 で示した．明度，彩度，色相は，以下の数式を用いて計算した[5]．

Y：明度

$$Y=0.3R+0.59G+0.11B,$$

H：色相

$$H=\tan^{-1}\left(\frac{0.7R-0.59G-0.11B}{-0.3R-0.59G+0.89B}\right),$$

S：彩度

$$S=\sqrt{(0.7R-0.59G-0.11B)^2+(-0.3R-0.59G+0.89B)^2},$$

ここで，RGB は画素の色の信号であり，R は赤，G は緑，B は青を示す．計算された Y，S の値は $0\sim256^2$ で，SOM に入力する際には各特徴量ごとに規格化した．模様という特徴量に関しては，模様の種類を目視で分類し，該当する次元を 1，そうでない次元を 0 とする質的データとした．その結果，34 枚の画像について，それぞれ 19 次元ベクトルが得られた．

表 2　19 次元の特徴量ベクトル

特徴	カテゴリ	値
明度 (Y)	低	画素数
	中	画素数
	高	画素数
彩度 (S)	低	画素数
	中	画素数
	高	画素数
色	黒	画素数
	灰	画素数
	白	画素数
	赤	画素数
	黄	画素数
	緑	画素数
	シアン	画素数
	青	画素数
	マゼンタ	画素数
模様	縞	0 , 1
	格子	0 , 1
	水玉	0 , 1
	花柄	0 , 1

表 3　明度 (Y) による画素の分類

明度 (Y)	カテゴリ
[0,85)	低
[85,170)	中
[170,255]	高

表 4　彩度による画素の分類 (S)

彩度 (S)	カテゴリ
[0,85)	低
[85,170)	中
[170,255]	高

表 5　無彩色の明度 (Y) による色の決定

彩度 (S)	明度 (Y)	色
[0,20)	[0,85)	黒
	[85,170)	灰
	[170,255]	白

表 6　有彩色の色相 (H) による色の決定

彩度 (S)	色相[deg] (H)	色
[20,255]	[75,135)	赤
	[135,195)	黄
	[195,255)	緑
	[255,315)	シアン
	[315,15)	青
	[15,75]	マゼンタ

2.4　SOM による感性評価値の予測

9 人の被験者の感性評価値の平均値を特徴量ベクトルに 20 次元目として加え，34 枚の画像それぞれについて 20 次元ベクトルを作成した．未知のハンカチの特徴量ベクトルは，20 次元目の値が欠損したベクトルとして扱われ，この次元が予測される感性評価値となる．また，5 つの形容詞対それぞれについて感性評価値を予測するため，マップは 5 枚作成される．

例えば，34 枚のハンカチのうち 1 枚を未知サンプルとみなした場合，他の 33 枚の 20 次元ベクトルによって，5 枚のマップを作成することになる．これらのマップに未知サンプルの特徴量ベクトルを 20 次元目が欠損したデータとして入力し，そのベストマッチノードの 20 次元目の値を感性評価値の予測値とする．

本研究では，34 枚のハンカチについて，それぞれ未知サンプルとして感性評価値の予測を行った．そして，予測値と実験値の相関を調べた．さらに，SOM の感性評価モデルとしての実用性を問うならば，さらに詳細な考察が必要となる．そこで，感性評価値と画像の特徴量のパラメータの関連性を相関によって調べ，感性評価値と相関のあるパラメータに重み付けを行った．重み付け係数 w は，以下の数式で算出した．

$$w = \frac{r}{1-r},$$

ここで，r は 34 枚の画像についての特徴量パラメータと感性評価値の相関係数である．

3.　結果と考察

図 3 は，予測値の実験値への相関を示している．すべての項目において，予測値と実験値の相関がみられ，予測が成功していることがわかる．また，重み付けを行った場合，行わなかった場合に比べて相関が高く，予測の精度が上がっている．

とくに，形容詞対“派手な-地味な”に関しては，重み付けをすることによって大きな予測精度の向上が

みられた．“明るい-暗い”“やさしい-きつい”“軽い-重い”“女らしい-男らしい”の項目に関しては，相関係数が 0.8 を上回り，十分かつ有効性のある予測精度であると判断した．本研究において，SOM によって感性評価モデルを作成することができるということが明らかになった．

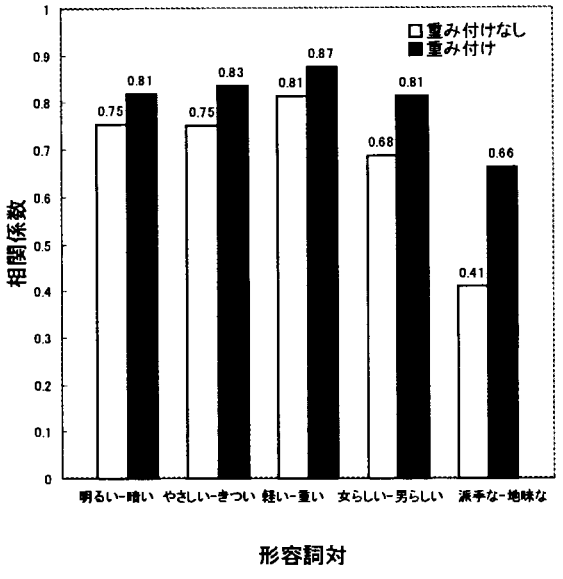


図 3　予測値と実験値の相関

4. 結論

第一に，SOM を使用して，ハンカチの感性評価値の予測に成功した．第二に，SOM による感性評価モデルは画像の感性評価の予測に有効であることが明らかになった．さらに，次元データへの重み付けは予測精度の向上に有効であることも判明した．以上のことから，SOM の感性工学への応用が期待される．

参考文献

[1] Hideo Jingu, “TIME SERIES JUDGMENTS IN *Kansei* EVALUATION”, *Kansei* Engineering International, Vol.2, pp.1-4, 2001.

[2] 林　知己夫, “数量化と方法”, 朝倉書店, 1993.

[3] 小松由香, 亀井且有, “感性工学にもとづくハンカチデザイン”, 電学論 C, 117 巻 7 号, pp.934-939, 1997.

[4] 日向 崇, 西川郁子, “自己組織化マップを用いた蝶類標本画像データベースの構築”, 日本ファジィ学会誌, Vol. 14, pp.74-81, 2002.

[5] 井上誠喜 他., “C 言語で学ぶ実践画像処理”, オーム社, pp105-106, 1999.

連絡先:

〒921-8501
石川県石川郡野々市町 7-1
金沢工業大学 工学部 人間情報工学科
大藪又茂
電話: 81-76-248-1100
FAX: 81-76-294-6711
E-mail: oyabu@neptune.kanazawa-it.ac.jp

ロボットアームの現在の姿勢を考慮した自己組織化システムによる手先位置制御

Robot Manipulator Control Using Topology Representing Network According to Present Posture

山川 烈　　堀尾 恵一　　○上野 圭介
Takeshi Yamakawa　Keiichi Horio　Keisuke Ueno
九州工業大学大学院生命体工学研究科
Graduate School of Life Science and Systems Engineering
Kyushu Institute of Technology

Abstract: Since it is difficult calculate the inverse kinematics in robotics, it is effective to solve it by using learning algorithm. Robot manipulator control using Neural Gas Network (NGN) can lead the end effector to any target position precisely, but it is not always able to do in small joint angle displacement, because this algorithm learns one to one relationships between the end effector positions and the sets of joint angles. In this paper, we propose a new algorithm to solve the inverse kinematics in small joint angle displacement by using Topology Representing Network.

1 はじめに

ロボットアームの各関節角度から手先位置を求めることを順運動学，手先位置から各関節角度を求めることを逆運動学という．逆運動学は，手先位置だけでは各関節角度が一意に定まらない場合があるので容易に解くことができない．逆運動学を解く困難さは自由度が増大するに従い爆発的に増大する．また，解析的に逆運動学を解く場合，リンクの長さ等のパラメータは既知でなければならない．

これらの問題を解決するために，学習機能によって逆運動学を解く，Neural Gas Network(NGN) を用いた手先位置制御手法が提案されている [1][2]．この手法は，目的位置に対して，手先を高い精度で制御を行なうことが可能であるが，手先位置と，その手先を表す姿勢 (関節角) を 1 対 1 の関係にするように学習するので，ロボットアームの自由度が高い場合，効率的な関節角変位で手先位置制御が行なわれるとは限らない．これに対し，Topology Representing Network(TRN) を用いた手先の軌道計画が提案されている [3][4]．この手法では，Perceptual Control Manifold(PCM) の位相関係を学習し，その学習結果を用いてロボットの手先軌道計画を行う．PCM は，ロボットの手先位置空間と関節角空間を合わせた空間である．この手法では，目的位置付近までは手先を効率的に動かすことができるが，高精度な手先位置制御ができないという問題点がある．

本研究では，高精度かつ効率的な関節角変位で手先位置制御を行なう手法を提案する．

2 TRN を用いたロボットアームの手先軌道計画

TRN の構成を図 1 に示す．TRN は，N 個のユニットを有し，ユニット i は重みベクトル $\boldsymbol{w}_i$，$\boldsymbol{u}_i$ で表現される．また，重みベクトル $\boldsymbol{W}_i = (\boldsymbol{w}_i, \boldsymbol{u}_i)$ を定義する．$\boldsymbol{w}_i$ と $\boldsymbol{u}_i$ は，手先座標と関節角に対応する．

学習時には，現在の手先位置とその関節角を学習ベクトル $\boldsymbol{I} = (\boldsymbol{X}, \vec{\theta})$ として TRN に提示する．ユニットに対し，その重みベクトル $\boldsymbol{W}_i$ と学習ベクトルの距離の近い順序をつける．重みベクトル $\boldsymbol{W}_i$ を次式により更新する．

$$\boldsymbol{W}_i^{new} = \boldsymbol{W}_i^{old} + \varepsilon(t) g(k_i)(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{W}_i^{old}) \qquad (1)$$

ここで，$\boldsymbol{W}^{new}$ と $\boldsymbol{W}^{old}$ は，それぞれ更新後と更新前の重みベクトルである．また，$\varepsilon(t)$ と $g(k_i)$ は，それぞれ学習係数，順位係数である．学習係数は学習の進行とともに減少し，順位係数は，順位が小さいほど大きな値をとる．また，この学習の際に，距離の近い重みベクトルを持つユニット間にリンクを張ることによりユニットの近傍関係を生成する．

学習後の重みベクトルとユニット間のリンクを用いて，以下の手順で手先軌道計画を行う．スタートとなる手先位置と，目的となる手先位置 $\boldsymbol{X}'$ が指定された際，それぞれと最も距離の近い重みベクトルをもつユニットを始点ユニットと終点ユニットとする．始点ユニットから終点ユニットまでを最少のリンク数で結ぶ軌道を求め，その軌道に従い関節角を制御する．

この手法では，目的手先位置に最も近い終点ユニットまでしか手先を動かすことができない．始点ユニット

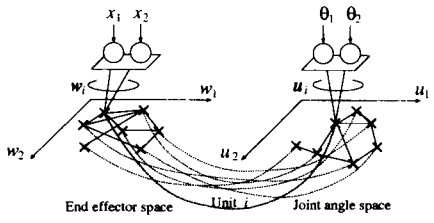


図 1: TRN の構成.

から終点ユニットまでの手先位置制御に関しては，効率的な関節角変位で手先位置制御が可能である．しかしながら，同じ手先位置を指す複数のロボットアームの姿勢が存在する場合があるので終点ユニットを手先位置だけで決定すると，必ずしも，始点ユニットから目的手先位置付近まで手先を動かす際に，効率的な関節変位で手先位置制御を行っているとは限らない．

3 提案手法

本研究では，高精度かつ効率的な関節角変位で手先位置制御を行なう手法を提案する．本提案手法の基本的な考え方は TRN に重み行列 (ヤコビアン) $\mathbf{A}_i$ を加えたものである．ここで，重み行列 $\mathbf{A}_i$ は，目的手先位置 $\boldsymbol{X}$ と重みベクトル $\boldsymbol{w}_i$ との差を線形近似で関節角の差に変換する行列である [1]．提案手法の改良点は 2 つある．一つは，学習時の入力ベクトルと重みベクトルの距離算出法である．もう一つは，実行時に複数の勝者候補ユニットを採用することである．

3.1 学習アルゴリズム

TRN による手先軌道計画では，ロボットアームの構造と障害物の形状により学習結果にデッドリンクが生じる場合がある．デッドリンクとは，そのリンクに沿って手先を動かすとロボットアームが障害物に衝突するリンクである．デッドリンク生成された学習結果を図 4(a),(b),(c) に示す．関節角空間では近いユニットでも，手先位置空間では遠い場合があるので，障害物を挟むユニット間にリンクが張られていることがわかる．デッドリンクの生成を防ぐために，比重係数 μ $(0 \leq \mu \leq 1)$ を用いた．次式により，学習ベクトルと重みベクトル間の距離を算出する．

$$d_i = \mu \|\boldsymbol{X} - \boldsymbol{w}_i\| + (1-\mu)\|\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{u}_i\| \qquad (2)$$

μ の値が小さい場合，デッドリンクの生成の原因となる．一方，$\mu = 1$ で学習ベクトルと結合重みベクトルとの間の距離を算出すると，手先位置だけで距離を算出するので，一つの手先位置を指す複数の姿勢の違いを区別することができない．よって，重みベクトル $\boldsymbol{u}_i$ とヤコビアン $\mathbf{A}_i$ は高精度な学習結果を得ることができない．また，障害物を挟むデッドリンクの生成を抑えることができるが，図 4(f) に示すようなデッドリンクが生成される．このリンクは障害物を挟んではいないが，手先をそのリンクに沿って動かすとロボットアームが障害物に衝突する．本研究では，学習後にデッドリンクの生成を抑え，かつ高精度な手先位置制御を行うことができる比重係数 μ を最適とし，その学習結果を用いて手先位置制御を行う．学習アルゴリズムを以下に示す．

0. 重みベクトル $\boldsymbol{w}_i$，$\boldsymbol{u}_i$ とヤコビアン $\mathbf{A}_i$ を初期化し，ユニット $i-j$ 間の関節空間上での距離と，リンクの有無を示す C_{ij} を $C_{ij} = 0$ とする．$C_{ij} = 0$ は，ユニット $i-j$ 間にリンクが無いことを示す．

1. 学習ベクトル $\boldsymbol{I}$ と各ユニットとの距離 d_i を式 (2) に従って計算する．

2. d_i を用いてユニットの順位を決定する．

$$d_{i_0} \leq d_{i_1} \leq \cdots \leq d_{i_{N-1}}. \qquad (3)$$

3. 競合層上の全てのユニットに対して，次式で重みベクトルとヤコビアンを更新する．ヤコビアンの更新は，Widrow-Hoff 則を用い平均二乗誤差 $E(\mathbf{A}_i) = \frac{1}{2}(\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{u}_i^{new} - \boldsymbol{A}_i^{old}(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{w}_i^{new}))^2$ を小さくするように更新する．

$$\boldsymbol{w}_i^{\text{new}} = \boldsymbol{w}_i^{\text{old}} + \varepsilon(t) g(k_i)(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{w}_i^{\text{old}}) \qquad (4)$$

$$\boldsymbol{u}_i^{\text{new}} = \boldsymbol{u}_i^{\text{old}} + \varepsilon(t) g(k_i)(\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{u}_i^{\text{old}}) \qquad (5)$$

$$\boldsymbol{A}_i^{\text{new}} = \boldsymbol{A}_i^{\text{old}} - \varepsilon(t) g(k_i) \frac{1}{\|\boldsymbol{X} - \boldsymbol{w}_i\|^2} \frac{\partial E}{\partial \boldsymbol{A}_i} \qquad (6)$$

学習係数 $\varepsilon(t)$ の値は，学習が進むに連れて小さくなる．順位係数 $g(k_i)$ の値は，k_i が大きくなるに連れて小さくなる．k_i はユニット i の順位を示す．

4. ユニット i_0，i_1 の間にリンクを張り，リンクの歳 $l_{i_0 i_1}$ をゼロにする．具体的には，$C_{i_0 i_1} = \|\boldsymbol{u}_{i_0} - \boldsymbol{u}_{i_1}\|$ とし，$l_{i_0 i_1} = 0$ とする．

5. ユニット i_0 と継っているリンクの歳を一つ増やす．具体的には，$C_{i_0 j} > 0$ を満たす全てのリンクに次式を用いてリンクの歳 $l_{i_0 j}$ を更新する．

$$l_{i_0 j} = l_{i_0 j} + 1 \qquad (7)$$

6. ユニット i_0 と継っているリンクで，寿命 $L(t)$ を越えたリンクを削除する．具体的には，$C_{i_0 j} > 0$ かつ $l_{i_0 j} > L(t)$ ならば，$C_{i_0 j} = 0$ とする．

7. step 1.〜step 7. を学習回数繰り返す．

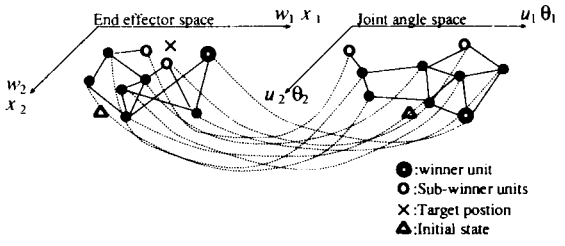


図 2: 実行アルゴリズム

3.2 実行アルゴリズム

目的手先位置だけで勝者ユニットを決定した場合，効率的な関節変位で手先位置制御が行えるとは限らないので，本研究では，目的手先位置付近のユニットを複数選び出し，それらを勝者候補ユニットとする．それらの中で最も効率的な関節角変位で手先位置制御を行うことができるものを勝者ユニットとする．構成を図2に示す．実行アルゴリズムを以下に示す．

0. 現在の関節角 $\boldsymbol{Y}_p$ から，始点ユニット r_0 を次式で決定する．

$$\|\boldsymbol{Y}_p - \boldsymbol{u}_{r_0}\| \leq \|\boldsymbol{Y}_p - \boldsymbol{u}_i\| \qquad (8)$$

1. 目的手先位置 $\boldsymbol{X}$ を入力する．

2. 目的手先位置に近いユニットを数個選び出し，それらを勝者候補ユニットとする．

$$\|\boldsymbol{X} - \boldsymbol{w}_{i_0}\| \leq \|\boldsymbol{X} - \boldsymbol{w}_{i_1}\| \leq \cdots. \qquad (9)$$

3. 始点ユニットから，リンクの持つ距離 C_{ij} を用いて各勝者候補ユニットまでの最短経路を求め，その中で最短経路で結ばれている勝者候補ユニットを勝者ユニット r_{max} とし，勝者ユニット r_{max} とその経路上のユニット $(r_1, \cdots, r_{max})$ を得る．本研究では，最短経路を求める際にダイクストラ法を用いる．

4. 経路上のユニット $r = (r_0, r_1, \cdots, r_{max})$ を用いて関節角 $\vec{\theta}_r$ を求める．

$$\vec{\theta}_r = \boldsymbol{u}_r + \boldsymbol{A}_r(\boldsymbol{X}'_r - \boldsymbol{w}_r). \qquad (10)$$

$$\boldsymbol{X}'_r = \begin{cases} (\boldsymbol{X}_p + \boldsymbol{w}_r + \boldsymbol{w}_{r+1})/3 & , r = r_0 \\ (\boldsymbol{w}_{r-1} + \boldsymbol{w}_r + \boldsymbol{w}_{r+1})/3 & \\ & , r = r_1, \cdots, r_{max-1} \\ (\boldsymbol{w}_{r-1} + \boldsymbol{w}_r + \boldsymbol{X})/3 & , r = r_{max} \end{cases}$$

$\boldsymbol{X}_p$ は現在の手先位置を表す．

5. 最終的な関節角 $\vec{\theta}$ を求める．

$$\vec{\theta} = \boldsymbol{u}_{r_{max}} + \boldsymbol{A}_{r_{max}}(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{w}_{r_{max}}) \qquad (11)$$

4 シミュレーション

本研究で提案した手先位置制御の有効性を示すために，障害物のある空間でシミュレーションを行った．作業空間は2次元 (x_1, x_2) とした．ロボットアームは3軸のスカラロボットアームである．ロボットアームと作業空間を図3に示す．シミュレーションにおいて，勝者候補の数を6，ユニットの数 $N = 300$，学習総回数 $T_{max} = 50000$ とした．学習係数 $\varepsilon(t)$，順位係数 $g(t)$，寿命係数 $L(t)$ はそれぞれ $\varepsilon(t) = \varepsilon_{ini}(\varepsilon_f/\varepsilon_{ini})^{t/T_{max}}$，$g(k_i) = exp(-k_i/\lambda(t))$，$L(t) = L_{ini}(L_f/L_{ini})^{t/T_{max}}$ によって決まる．係数 $\lambda(t)$ は $\lambda(t) = \lambda_{ini}(\lambda_f/\lambda_{ini})^{t/T_{max}}$ によって決まる．それぞれの係数は，$\varepsilon_{ini} = 1.0$，$\varepsilon_f = 0.05$，$\lambda_{ini} = 270$，$\lambda_f = 1$，$L_{ini} = 5$，$L_f = 10$ とした．

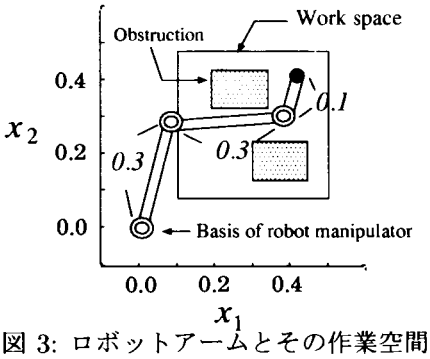


図 3: ロボットアームとその作業空間

学習ベクトル $\boldsymbol{X}$ は，以下の方法によって求められる．

1. ロボットアームの各関節にランダムな値を入力する．

2. もし手先位置が入力空間内で，かつロボットアームが障害物またはロボットアーム自身に接触していなければ，その手先位置 $\boldsymbol{X}$ とその関節角 $\boldsymbol{Y}$ を学習ベクトル $\boldsymbol{I}$ とする．

手先位置誤差は，学習回数100回毎に，学習ベクトル $\boldsymbol{I}$ をランダムに300個入力し，目標手先位置 $\boldsymbol{X}$ と求められた関節角で決定される手先位置との平均誤差とした(図5)．学習後の $\boldsymbol{w_i}$ とリンクを作業空間に写像したものを図4に示す．図4，5より，$\mu = 0.6$ のときにデッドリンクが無く平均誤差も小さいので，シミュレーションでは $\mu = 0.6$ を用いた．

シミュレーション結果を図6，7に示す．図6では，図中のTargetを目的手先位置とした．ロボットアームが障害物を避けて手先位置制御を実現されていることが分かる．図7では，図6(h)をロボットアームの初期状態とし，図6(a)のロボットアームの手先位置を目的手先位置とした．ロボットアームは図6とは違う経路で手先位置制御が実現されている．図6，7より，ロボットアームの現在の姿勢を考慮し，それぞれ効率の良い関節角変位で手先位置制御が実現されていることが分かる．

5 おわりに

本研究では，TRNを用いた手先軌道計画の問題を解決することにより，高精度，かつ効率的な関節角変位

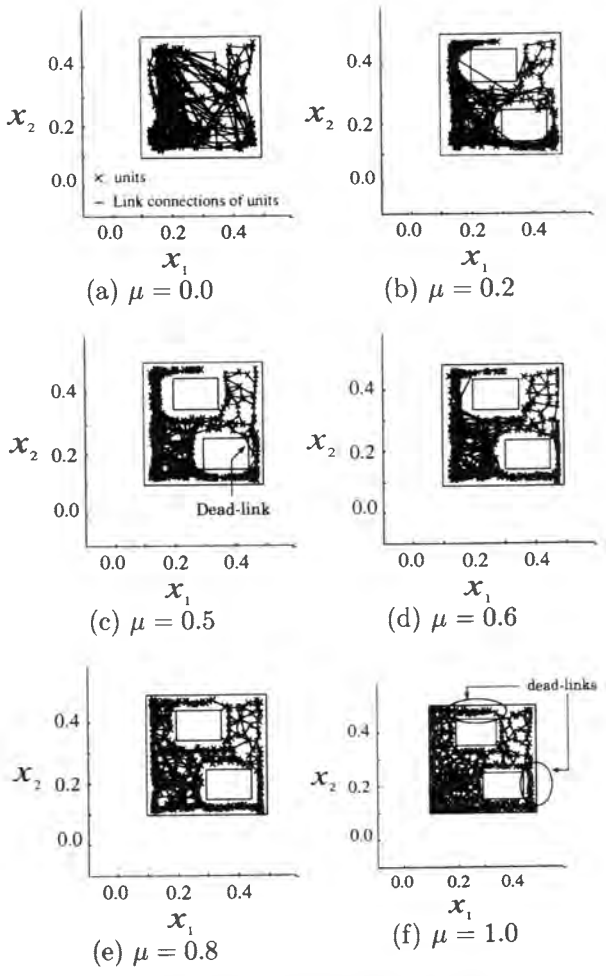


図 4: 学習結果

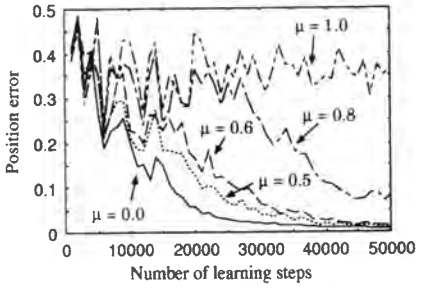


図 5: 手先位置誤差

で手先位置制御を行なった．具体的には，学習時に比重係数 μ を用いることにより，高精度，かつデッドリンクの無い学習結果を獲得した．さらに，実行時に勝者候補ユニットを用いることにより，効率の良い関節角変位で手先位置制御を行った．

参考文献

[1] J. A. Walter, T. Martinetz, and K. Schulten, "Industrial Robot Learns Visuo-motor Coordination by Means of Neural-Gas Network," *Artificial Neural Network*, pp357-364,1991.

[2] T. Martinetz, H. Ritter,and K. Schulten, "Neural-Gas Network for Vector Quantization and its Application to Time-Series Prediction," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol.4, pp558-569,1993

[3] M. Zeller, K. Schulten, and R. Sharma, "Visuo-Based Robot Motion Planning Using A Topology Representing Network",*In Proceeding of the IEEE Int. Symposium on Intelligent Control*,pp7-12,1996.

[4] T. Martinetz and K. Schulten, "Topology Representing Network," *Neural Network*, vol.7,No.3, pp507-522,1994

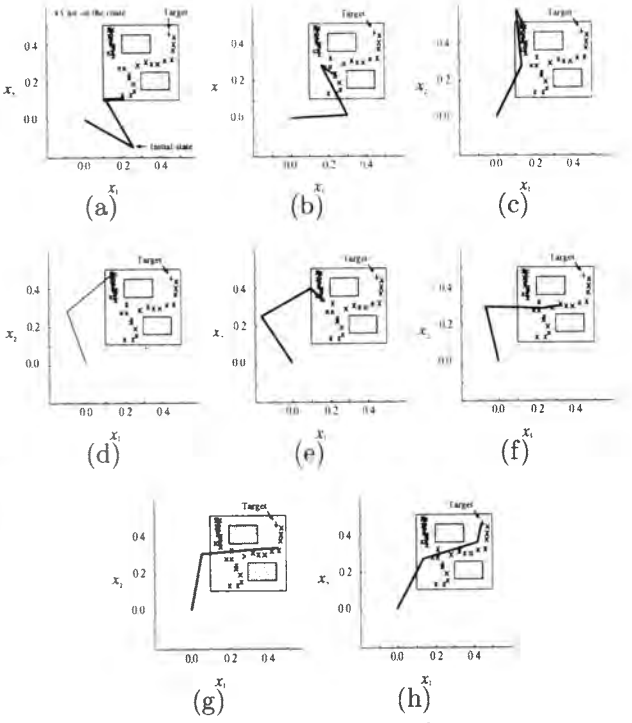


図 6: シミュレーション結果 1

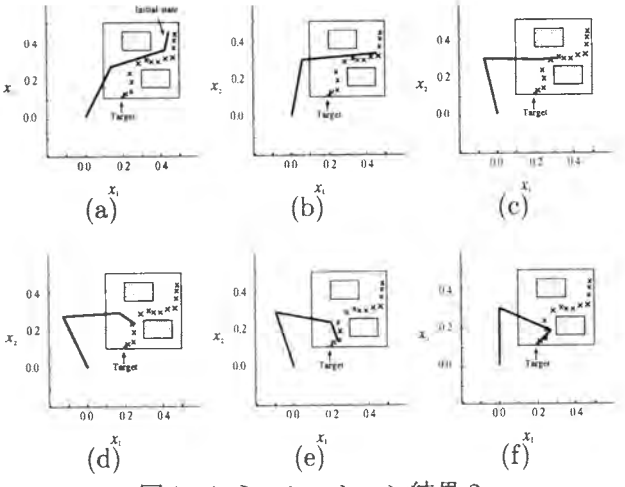


図 7: シミュレーション結果 2

[問い合わせ先]

山川 烈

〒 808-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-4

九州工業大学大学院 生命体工学研究科

Phone: 093-695-6123, Fax:093-695-6133

E-mail: yamakawa@brain.kyutech.ac.jp

自己組織化マップ(SOM)を用いた健康評価システムの構築

Construction of checkup system which uses Self-Organizing Maps (SOM)

大貝哲彦[1]，馬庭芳朗[2]，徳高平蔵[1]，藤村喜久郎[1]，大北正昭[1]
Tetsuhiko Ogai[1], Yosio Maniwa[2], Tokutaka Heizo[1], Kikuo Fujimura[1], Masaaki Okita[1]
鳥取大学[1]，公立おおや先端地域医学研究所[2]，
Tottori University[1],Minamidani Clinic, Oya-cho, Yabu-gunn, Hyogo, Japan[2]

Abstract : The purpose of medical checkup is the early discovery and thetreatment of various kinds of diseases. The checkup including discovery of life-style related diseases is carried out annually in companies or communities in Japan. The examination items are almost common. By the way, under the present conditions, so long as a subject watches values of the result, he or she can merely judge whether test values are normal or not. It is almost impossible for the subject without knowledge of medicine to judge his or her own health state and to understand what kind of habit must be improved. In this research, the construction of a health evaluation system which visibly indicates a health state was attempted from each person's checkup list by using the feature of self-organizing map (SOM:Self-Organizing Maps) that multi-dimensional data can be mapped to the two-dimensional surface.

1. 研究背景

現在日本人にとって深刻な高血圧，高脂血症，糖尿病などの生活習慣病は，ほとんど自覚症状がない．

健康診断の目的として，疾病の早期発見と早期治療が重視されて来たが，近年は生活習慣病としての観点から，現在の健康状態を調査し食習慣や運動習慣などのライフスタイルの見直しのきっかけになるような健康診査に変化している．現在の健康診断の総合判定は，受診者の今後の健康に対する指針の目安と考えられ，健診項目毎に５段階に判定の基準が設定され振るい分けされている．しかし，報告された結果を見て，医学的知識のない一般人は，どのような病態なのか，どのような生活習慣を改善しなければならないのかがほとんど不明であった．

本研究では，複雑な処理を必要としない SOM を健康診断データに適用し，２次元マップ上に多次元データを可視化させることで，各検査と病態の関連性を明確にし，健康状態を分かりやすく表示させる健康評価システムを構築する．

2. 健康評価マップ

2. 1. 健康診断データについて

まず，大屋町保健センターと大屋町立南谷診療所の協力を得て，平成 12 年度大屋町町ぐるみ健診データ 394 人分（大屋町南谷地区）のデータを用いてマップ化を試みた．データの項目は，体重と身長から算出した BMI（Body Mass Index）のほか，収縮期血圧（血圧上），拡張期血圧（血圧下），総コレステロール，LDL コレステロール，HDL コレステロール，中性脂肪，GOT，GPT，ChE（コリンエステラーゼ），HbA_{1C}(ヘモグロビン $_{1C}$)，γ-GTP，尿酸，尿素窒素，クレアチニン，血色素量，Ht（ヘマトクリプト））の全 17 項目である．

このような検査項目には，各項目ごとに正常値があり，また GOT，GPT は肝の逸脱酵素であり肝障害の指標であるといったような各項目ごとの医学的関連性がある程度決まっている．Tab.1 に項目別の正常値，Tab.2 に医学的関連性を示す．

Tab.1 : 項目毎の正常値

項目	正常値	項目	正常値
BMI	19.8～24.2	GOT	<39
血圧上	100～139	GPT	<39
血圧下	<89	γ-GTP	<34
総コレステロール	150～199	CHE	100～299
LDLコレステロール	<119	HbA1c	<5.5
HDLコレステロール	40～99	尿素窒素	<25
中性脂肪	30～126	尿酸	<5.9
血色素量	11.5～15.9	CR	0.4～0.8
HT	34～49		

Tab.2 : 項目毎の医学的関連性

項目	危険因子
BMI, 中性脂肪	高値で肥満の恐れ
総コレステロール LDLコレステロール	高値で高脂血症の恐れ
総コレステロール, CHE	低値で肝硬変の恐れ
GOT, GPT	高値で肝障害の恐れ
尿素窒素, クレアチニン	高値で腎障害の恐れ
血色素量, HT	低値で貧血の恐れ
HbA1c	高値で糖尿病の恐れ
尿酸	高値で痛風の恐れ

2.2. データの前処理

マップを作成するにあたって，まず各項目ごとに測定数値の単位が違い，重みが異なってくるので，全体の重みをあわせるため次のような式を用いて正規化のような処理（ここでは，正規化とする）を行った．最小正常値 L，最大正常値 H，データの値 X，正規化値 Y とすると，

(X<L)のとき

$$Y=X/L \quad (2)$$

(L≤X≤H)のとき

$$Y=1 \quad (3)$$

(X>L)のとき

$$Y=X/H \quad (4)$$

しかし，前処理後のデータには，飛び抜けて高い値を持つものがあった．本研究では，一般的な生活習慣病などを評価するのが目的であるので，このような飛び抜けて高い値は好ましくないと考え，正規化データに上限値を設けることにする．

正規化において上限値を決定する方法として各項目ごとの度数分布を作成し，ある程度人数が減少した所を上限値と決定した．中性脂肪とγ-GTP以外はほとんどの人がすべて1.5以内に分布しており，中性脂肪とγ-GTPは1.5以上の部分も多少分布している.この分布結果から，中性脂肪とγ-GTPを上限値2.0，その他の項目を1.5と決定し，この値を超える場合はすべてこの値に変更する．

2.3. マップの作成

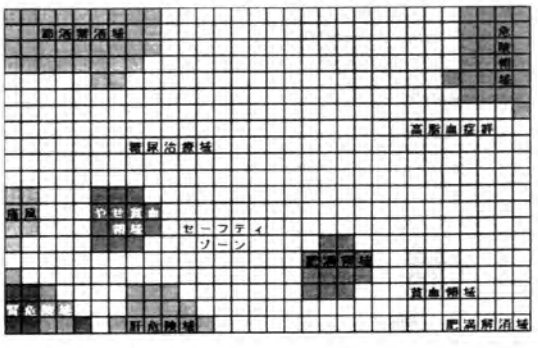
前処理後のデータを使用して健康診断データのマップ化を行う．学習には幾つかの条件でマップを作成し，今回の目的である健康診断データの可視化に最も適した条件を探し，マップを作成した．

今回の目的である健康評価では，クラス分けは各病態ごとに分類し，境界もはっきりとさせなければならない．

そこで，各検査項目にはTab.2のような医学的関連性があるので，この関連性を用いて病態ごとのクラス領域を決定する．すなわち，病態と関連している項目ごとの要素マップの異常値が反映されている所を抜き出して領域を決定する．

すべての医学的関連性を表示させていくとFig.2健康評価マップが作成される．

Fig.1：健康マップ



3. SOM を利用した健康評価

健康評価マップを利用して実際に健康評価を行う．以下のような3種類の評価方法で健康評価を行った．

3.1. 地域住民全体の健康評価

健康評価マップの学習に使用した394人分のデータを用いて，地域住民の全体的な健康評価を行う．この地域の男女別の分布マップを作成し，男女間で分布がどのようになっているのかを調べる．評価は，以下のような手順に従って行う．

- 前処理後の 394 人のデータを使用する．
- 前章で作成した健康評価マップの各ユニットと各個人のデータに最整合したユニット(BMU：Best Match Unit) を探し，そのユニットの位置を割り出す．
- BMU がマップのどの領域に含まれるかで，被験者の健康状態を判断する．

3.2. 健康評価マップの検証

次に，大屋町町ぐるみ健診のデータから健康評価マップの学習に使用していない未知のデータを用いて，実際に健康評価を行う．ここでは，Tab.3のような尿酸の値が高い5名を選んだ．尿酸値は，美食や肥満、腎障害，アルコールなど様々な要因で値が高くなる．医学的知識のない人はなぜ尿酸の値が高くなっているのか判断することは難しい．このような同じ項目が高い被験者らの病態を評価できるかを調べる．評価方法は評価方法1と同様，前処理を行った被験者のデータのBMUの位置を探し出し，マップ上のどの位置に選ばれるかで病態の評価を行う．

Tab.3：実際の健康評価

被験者	●	▲	■	★	▼
BMI	1	1	1		
血圧上	1	1	1	1	
血圧下	1	1	1	1	1
総コレステロール	1	1	1.01	1.26	1
LDLコレステロール	1.01	1	1.07	1.39	1
HDLコレステロール	1	1	1	1	1
中性脂肪	1	2	1	1.78	2
GOT	1	1	1		1
GPT	1	1	1	1.5	1
CHE	1	1	1	1	1
HbA1c	1	1	1		1
γ－GTP	1		1		1
尿酸	1.28	1.17	1.33	1.25	1.05
尿素窒素	1	1		1	1
クレアチニン		1	1.5		1
血色素量	1	1	1	1.05	1
HT	1	1	1	1	1
データからの見解	痛風	アルコール多飲者	腎障害	アルコール性肝障害	肥満

Fig.3 に結果を示した健康評価マップを示す．医師の見解と比較すると，それぞれの被験者の病態を健康評価マップ上で表せていることが分かる．Tab.3 のデータだけではどのような病態なのかが分かりにくかったが，健康評価マップで評価することでどのような健康状態なのか一目で見分けることができる．

以上の結果から，SOM を用いた健康評価が可能であることが明らかにされた．

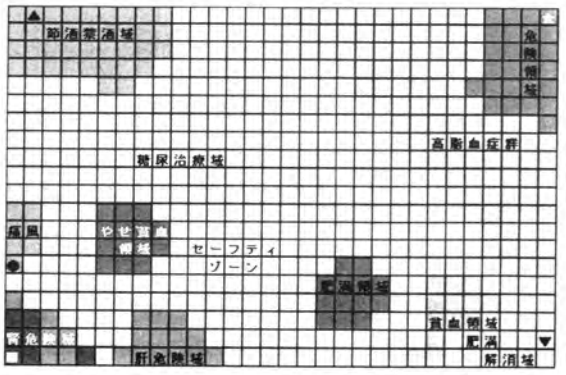


Fig.2 因子毎の健康結果

4. 球面 SOM を導入した健康評価マップ

4.1. 平面 SOM の問題点

自己組織化マップ(SOM)は，一般的に視覚化に関して有利な 2 次元平面 SOM で行われている．しかし，端が存在する 2 次元平面では SOM の学習性質上，周縁に無理が生じることがある．この問題は，クラス分けしたいデータの種類によっては，周縁の位相関係を知ることが求められる場合もあり，大きな問題点となっている．また，学習条件を少しでも変更するとクラス分けの位置が変わるといったような欠点もある．

特に健康評価マップの場合は，Fig.3 のようにクラス分けをしたい病態に関してほとんどすべてが周縁に配置されている．そのため，病態間の関係（すなわち端と端との位相関係）がどのようになっているのかが分かりにくい．健康評価マップを考察すると，四隅が繋がっていることはだいたい推測はつくが，周縁に存在する病態がどのように関係しているのかは全く推測できない．

そこで，金沢工業大学から提供して頂いた,周縁が存在しない球面 SOM に展開することを試みた．

4.2. 球面健康評価マップの作成

使用するデータは，平面健康評価マップの作成に使用した 394 人分のデータを用いる．
マップ化に最も適した条件を探し，マップを作成した．

4.3. 結果と考察

Fig.4，Fig.5 に球面健康評価マップを示す．マップは健康優良者を白色に設定し，そのデータとの誤差が大きくなるにつれて，黒色になるようなグレースケールで表現している．

Fig.4 のようにセーフティゾーンを中心に持ってくると，表示されている所がほぼ白色で病気のユニットがあまり表示されていないことが分かる．Fig.5 は一番悪い危険領域を中心にしたもので，全く白色がなく黒色しか表示されていない．また，球面上でこの領域はセーフティゾーンの裏側に配置されていて，健康と病気は全く逆の関係になっていると言える．この領域に入る大きな流れとしては，アルコールの飲みすぎ，糖尿病，肥満や高脂血症が原因で陥る可能性を示唆している．

平面健康評価マップを球面に展開することによって，平面の周縁の関係が分かり易くなり，任意の症状を中心に配置することで，他の症状との関連性が理解しやすくなった．平面 SOM では全体を把握する可視化ができ，球面 SOM を用いた健康診断データの可視化は，球面では学習を隔たりなくできるので位相関係が正確に判断できるという点で，有効な手段であるといえる．

今後の課題としては，現在では表示できない要素マップを表示する機能を持たせること，白黒表示しかできない健康評価マップを各症状の領域ごとに適切なカラーを表示させることを検討することである．このように平面 SOM と同じ機能を付加することで，さらに病態間の関係を理解できると考えられる．また，今以上に球面 SOM が様々な分野に利用され，有用な結果が得られると考えられる．

Fig.3 : セーフティゾーン付近の球面健康マップ

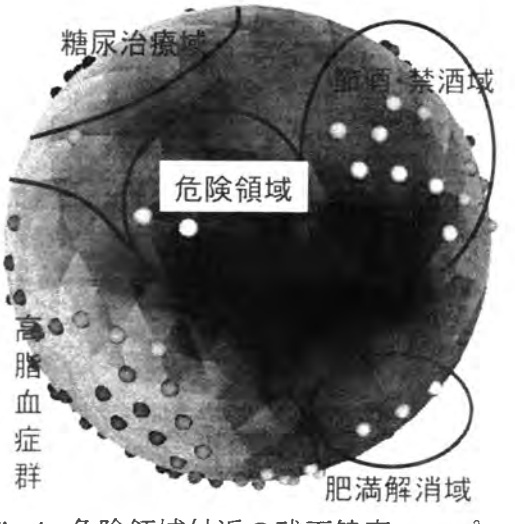


Fig.4 : 危険領域付近の球面健康マップ

平面マップを球面に写像した結果，例えば，Figs.5 の平面 2 次元マップ上の横 30 x 縦 20 (600) 点が球面上に正確に写像されることが分かった．こうして球面上でその 600 位置が属す球面上での各位置のユークリッド距離（誤差 2 乗和）を測定した．健康者（全て 17 項目の検査で正常値 1 が立つ）を 100 点数とした場合，平面 600 位置の中で Fig.5 の右上コーナー（危険領域）の点数が低かった．また左上コーナーを 1 番として右方向に数え折り返し左上コーナーから 2 段目が 31 番とすると，一番右上コーナー（30 番目）は 33 点数，一つ手前（29 番目）でも 33 点数であった．右上コーナーの 1 段下（60 番目）は最低の 21 点，さらにその 1 段下（90 番目）も 21 点数であった．ちなみに，全て 1 が立つ健康領域は Fig.3 でセーフティゾーンと書いてあるあたりである．相当する番号は，463, 492, 493, 494, であった．

最後に全 600 位置の各位置での点数を四捨五入した結果，10 点数毎の点数の度数分布を Fig.6 に示す．結局 100 点数は 95 点数以上の度数を表しているが 90 点数を中心にした正規分布を示している．

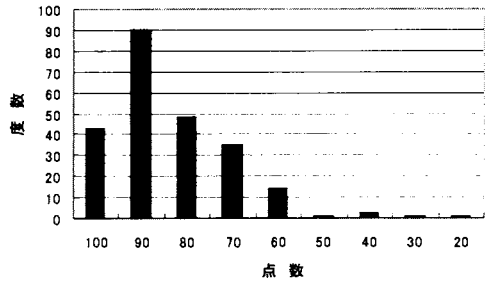


Fig.5 : 健康点数の度数分布

5. おわりに

本研究では，自己組織化マップ（SOM）の医療分野への応用として健康診断データの分析を行った．健康評価マップの作成の結果，今まで経験的に得ていた医学的関連性を証明することができ，マップを利用した健康評価が可能なことを実証した．様々な健診データを分析していくことで更に精度の良いマップになっていくと考えられる．

球面 SOM に関しては，平面 SOM と同様の機能を付加することで，今後の様々な分野への応用が期待される．

最後に平面マップを球面 SOM に写像した結果，各位置の位相が正確に写像されることが分かり，そのユークリッド距離を点数で評価した結果，平面マップの各位置の健康度が点数で定量的に表示出来るようになった．

こうして本論文で説明した，SOM 法による健康評価データの分析結果は，より定量的な健康評価を行うことで，医療分野の発展に大いに貢献できるものと考えられる．

参考文献

[1] Teuvo Kohonen 著，中谷和夫 監訳：``自己組織化と連想記憶", シュプリンガーフェアラーク東京, 1993 年 2 月.

[

2] Teuvo Kohonen 著，徳高平蔵，岸田悟，藤村喜久郎 訳：``自己組織化マップ", シュプリンガーフェアラーク東京, 1996 年 6 月.

[

3] 徳高平蔵, 岸田悟, 藤村喜久郎：``自己組織化マップの応用-多次元情報の 2 次元可視化-", 海文堂, 1999 年 2 月.

[4] 徳高平蔵, 藤村喜久郎，山川烈　監修：``自己組織化マップ応用事例集", 海文堂, 2002 年 10 月.

[5] Helge Ritter 著，``Self-Organizing Maps on non-euclidean Spaces", Elsevier Science，1999 年.

[6] 中塚大輔，大藪又茂：``球面 SOM の学習過程とその適用例", 第 18 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.539-542 , Aug.2002.

[7] 金井泉 原著，金井正光　編著：``臨床検査法提要　-改定第 31 版-", 金原出版株式会社, 1998 年.

[連絡先]
鳥取市湖山町南 4 丁目 101 番地３１５２４３
鳥取大学電気電子工学科
大貝哲彦
Tel (0857)-31-5243
Fax (0857)31-0880
E-mail wing_cerica@hotmail.com

クラスタリングにおける球面 SOM の有効性

Usefulness of Spherical SOM for Clustering

中塚　大輔
Daisuke NAKATSUKA
金沢工業大学
Kanazawa Institute of Technology

大藪　又茂
Matashige OYABU
金沢工業大学
Kanazawa Institute of Technology

Abstract: We describe a spherical SOM (SSOM) that makes topological mapping more reasonably. Since each unit of the SSOM is equivalent, we have possibility to obtain a map that represents more explicit relationships of input data. We trained the SSOM and a conventional rectangular SOM with same multi-dimensional data and compared their maps. As a result, topology of the data was preserved more safely on the spherical map than on the other. In conclusion, the SSOM can improve assignment of clusters on maps.

1　はじめに

知識の表現方法の一つとして、その幾何学的な関係を記述することが便利であることが多い。Kohonen の自己組織化マップ (SOM: Self-Organizing Map) は与えられたデータ群の位相的な構造を平面上に置かれた処理ユニットの幾何学的な配列にマッピングする。SOM を構成する処理ユニットあるいはニューロンモデルはノードと呼ばれる。SOM を用いると平面上のノードにデータが対応するため、そのまま情報の地図として利用でき、複雑なデータの相互関係を把握しやすくすることができる。また、大量に与えられた多次元データを任意の数のノードによって圧縮、符号化し、あるいはそのコードブックを参照して量子化することがシンプルなアルゴリズムで実現できるため、信号処理やロボティクス、パターン認識など、さまざまな分野での応用例が報告されている [1]。

本研究の最終目標は SOM の一種である球面 SOM の性質を明らかにすることである。通常の SOM ではノードが長方形の平面上に配列されるが、球面 SOM では球面上に配列される。球面 SOM は指向性データの表示に適していることが Ritter によって示唆されたが [2]、その実例や応用はこれまで研究されていない。そこで、我々は 2 種類の球面 SOM を開発し、それらの基本的な動作について検討してきた [3][4]。

本稿では、クラスタリングと位相写像の手法としての球面 SOM が持つ有効性について検討する。方法として、同一の多次元データ群を従来型の SOM と球面 SOM のそれぞれに入力して、得られる 2 つのマップを比較する。

結果として、球面 SOM では位相構造の保存がより安全に行われることを報告する。すなわち球面 SOM のマップ内ではクラスタの順序付けが通常の SOM でよりも矛盾の少ない形で達成される。

以下では、まず球面 SOM の簡単な特徴と構築方法を説明し、それから、長方形の SOM と球面 SOM での実験手順、実験結果の概観、球面マップと長方形のマップの出力の違いに関して述べ、最後に結論とする。

2　球面 SOM

球面 SOM の特徴はノードが球面上に配列されることである。ただし、ここでの球面とは位相幾何学で 2 次元の球面と呼ばれるものを指す。球面 SOM の基本的な原理は Ritter によって導入された [2]。

2.1　境界効果

ノードを球面上に配列してマップを球面状にすることで、マップから「端」が取り除かれる。従来、SOM のマップには長方形のものが慣用されてきた。長方形のマップは一度に見渡せるので便利であるが、そのマップには端があり、そのことが SOM の学習の際に「境界効果」として知られるひずみを発生させることも知られている [1]。

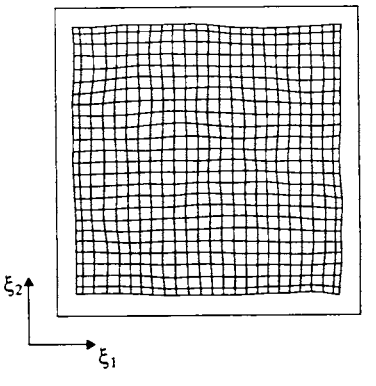


図 2–1: 境界効果によって生じるネットの端付近の収縮

境界効果の一例は図 2–1 に示されるネットの端付近の収縮に見ることができる。この例では長方形の SOM が枠で囲まれた正方形の領域を学習し、近似している。この SOM は平面上の格子点に配置された 25×25 個のノードからなる。ネットの交点の座標が SOM のノードの内部状態 (参照ベクトル) を意味している。隣接するノードの参照ベクトル同士が補助線で接続されている。データの入力が始められる前にそれぞれの参照ベクトルの要素に初期値として乱数が設定される。学習のために SOM に入力されるデータ (訓練ベクトル) は図の枠の内部から選ばれる 2 次元座標 $x = [\xi_1, \xi_2]^T \in \Re^2$ である。ここでの x は確率的で、その確率密度関数は枠で囲まれた領域内では一様に正の定数をとり、その領域以外では 0 を取るものとする。こうして訓練ベクトルの入力を 10 万回行うと、ネットは図のように入力データが発生する空間に広がるが、ネットの端付近では参照ベクトルの密度が、一様な密度で入力 x を得たにもかかわらず、他の部分よりも高くなってしまっている。

ネットのこのひずみの原因はSOMの端の存在である。球面SOMでは境界効果が起こり得ないので、より自然なマッピングが期待される。

2.2 球面上での格子点の生成

実際にノードを球面上に配列するために、球面に三角形の格子をあてはめ、その格子点にノードを配置する。ここではその格子点の作り方を説明する。

球面上で等間隔の格子点を得るには5つの正多面体を使うことができる(例えば、正20面体の頂点にノードを配置する)が、こうして得られる点の数は最大でも正12面体を用いる場合の20個であり分解能が低い。そこで測地線ドームを用いて格子点を増やす。測地線ドームとは三角形の面だけで構成される凸型多面体の総称である。

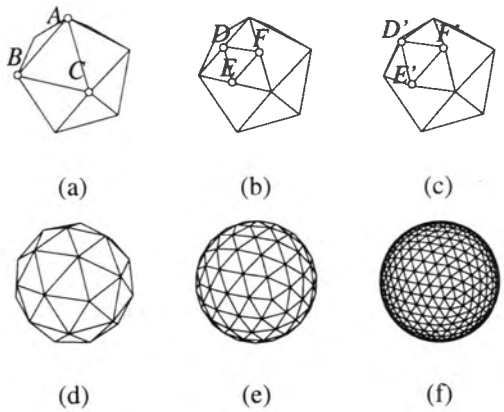


図2–2: 測地線ドーム構造を利用して球面上の格子点を増やす過程

図2–2はいくつかの測地線ドームを構築する過程を示している。まず、球に内接する正20面体を考え、三角形*ABC*に注目する(a)。その三角形の辺をそれらの中点*D*、*E*、*F*で分割する(b)。新しくできた頂点はわずかに球の内部にあるので、それらを正規化することで球面まで押し出す(c)。これで三角形*ABC*が分割され、新しい4つの三角格子(*AD'F'*、*BE'D'*、*CF'E'*、*D'E'F'*)が生成される。この分割を正20面体の他の面についても同様に行うと結局80面体が得られる(d)。このように正20面体の12個の頂点から始めて42個のほぼ等間隔に並ぶ頂点を作ることができる。

さらに頂点を増やすにはこの分割処理を再帰的に繰り返せばよい。もとの正20面体の各面がk回分割されると、測地線ドームの面の数は20×4^kとなり、頂点の数は$2+10\times4^k$となる。図の(e)と(f)はそれぞれ162個と642個の頂点を持つ測地線ドームを示している。上記の分割処理は文献[5]の著者によってC言語のプログラムとともに解説されている。

2.3 学習のアルゴリズム

球面SOMの学習では通常のSOMとほぼ同様のアルゴリズムが用いられる。

球面SOMのアルゴリズムは次の6つのステップからなる:

(1) ノードを測地線ドームの頂点に配列する
(2) 全ての参照ベクトルを任意の数値で初期化する
(3) 訓練ベクトルを選び、球面SOMに入力する
(4) 入力ベクトルに最も敏感なノード(最整合ノード)を探す
(5) 最整合ノードとその近傍のノードの参照ベクトルを、後述する更新規則によって入力ベクトルに接近するように修正する
(6) 参照ベクトルの収束まで(3)〜(5)を繰り返す

ノードの数がl個であり、各ノードには1から順に番号がふられているものとする。選ばれた入力ベクトルがxのとき、ノード$i=1,2,\ldots,l$の参照ベクトルをm_iと書くと、最整合ノードcは次式で定義される:

$$c=\arg\min_i\{\|x-m_i\|\} \tag{2–1}$$

更新規則は以下の式で定義される:

$$m_i(t+1)=m_i(t)+h_{ci}(t)[x(t)-m_i(t)] \tag{2–2}$$

ここで$t=0,1,2,\ldots$は離散時間系である。$h_{ci}(t)$は近傍関数またはカーネル関数と呼ばれ、次式で定義される:

$$h_{ci}(t)=\alpha(t)\cdot\exp\left(-\frac{\theta^2(r_c,r_i)}{2\sigma^2(t)}\right) \tag{2–3}$$

ここで$\alpha(t)$は学習率係数と呼ばれノードの活性度を意味し、パラメータ$\sigma(t)$は近傍の半径の幅(カーネル幅)を意味する。$r_c\in\Re^3$と$r_i\in\Re^3$はそれぞれノードcとiの位置ベクトルである。$\theta(r_c,r_i)$はr_cとr_iの間の距離であり、次式で定義される:

$$\theta(r_c,r_i)=\arccos\left(\frac{(r_c,r_i)}{\|r_c\|\|r_i\|}\right) \tag{2–4}$$

通常のSOMのアルゴリズムとは式(2–4)によるノード間の距離の定義が異なるのみである。

2.4 球面SOMの学習の例

簡単な実験で通常のSOMと球面SOMの振る舞いの違いを確認することができる。

図2–3は枠で描かれた立方体の6つの面を、長方形のSOMと球面SOMのそれぞれに近似させる実験の結果を示している。左の図(a)が長方形のSOMによる近似の結果であり、右の図(b)が球面SOMの結果である。

長方形のSOMは境界効果を起こし、いくつかの面を近似できていないことが分かる。面白いことに、長方形のネットの隅同士が全ての面を近似しようと試みた結果互いに近づいてしまっており、なおかつ境界効果が隅同士をそれ以上は近づけまいとしているように見える。

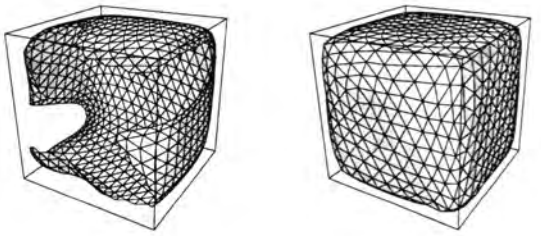
一方、当然ながら球面SOMのネットは全ての面に矛盾なく適応している。この実験は球面SOMが立体の表面に代表される指向性を持つデータの学習に適していること、そして境界効果がそのようなデータ空間への適応の際にデッドスペースを作ることを示している。

3 実験方法

球面SOMのマップと長方形のSOMのマップを比較するために、34枚のハンカチのデザインに対する評価実験から得られたデータを用いて、それぞれのマップを作成した。

3.1 ハンカチの評価

ハンカチのデザインに対して人がどのような印象や感性を抱くのかをSD評価法で数値化し、SOMへの入力



(a) (b)

図 2–3: 長方形の SOM と球面 SOM による立方体の表面の近似

データとした。それぞれのハンカチには 5 項目の SD 評価法の結果として得られた 5 つの評価値が与えられた。

例として評価に用いた SD 評価法の項目の一つを図 3–1 に示す。図のように一つの項目は一組の形容詞対に関して、その評価を 5 段階でできるものとした。図の例では、形容詞の一つは「明るい」で、もう一つは「暗い」であり、これを「明るい－暗い」の項目と呼ぶ。評価には 9 項目を用い、被験者は 1 枚のハンカチにつき各項目ごとに 5 段階評価で点数をつけることとした。

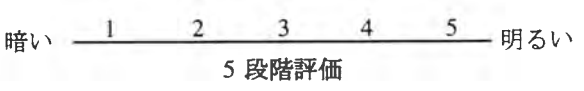


図 3–1: SD 評価法の項目の例

被験者を 9 人とした。各被験者は 34 枚のハンカチを評価した。それぞれのハンカチのそれぞれの評価項目につき 9 人のつけた点数の平均を取り、評価値とした。ただし、評価に用いた 9 項目のうち、4 項目の評価値は被験者間での相関が弱かったことから最終的には除外し、残りの 5 項目 (明るい－暗い、やさしい－きつい、軽い－重い、女らしい－男らしい、派手な－地味な) の評価値を SOM への入力ベクトルの要素として用いた。よって、それぞれのハンカチにつき 5 つの評価値が得られた。

3.2 入力ベクトル

ハンカチの評価の結果、5 次元の入力ベクトル 34 個が得られた。図 3–2 は入力ベクトルの要素としたハンカチの評価値を示している。ただし、評価値は $[0,1]$ の実数値に正規化された。それぞれのハンカチには 1～34 の番号がふられており、ハンカチの評価値が評価項目の水平軸上にその番号によってプロットされている。

3.3 長方形の SOM のパラメータ

長方形の SOM の計算用と表示用のプログラムとして SOM_PAK (Version 3.1) を用いた [1]。ノードの数を 650 (26×25) 個とした。ノードを六角形格子として配列した。参照ベクトルの初期値としてそれぞれの要素に $[0.45, 0.55]$ の乱数を設定した。学習率係数の初期値を 0.9 とした。カーネル幅の初期値を 13 とした。カーネル関数にはガウシアン関数を用いた。訓練ベクトルの入力回数を 10 万回とした。その他のパラメータにはデフォルトの値を用いた。

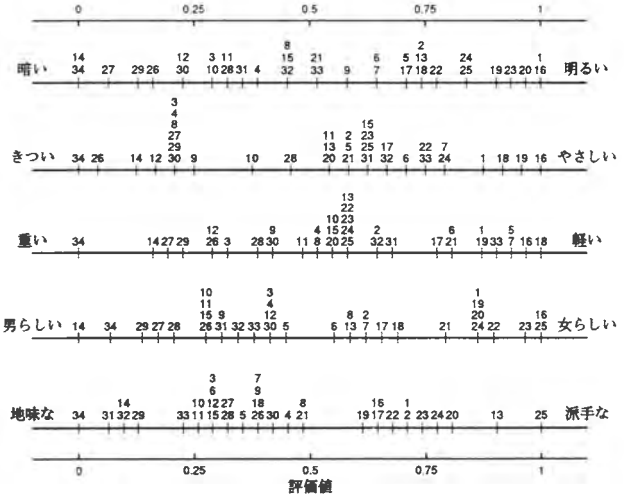


図 3–2: 34 枚のハンカチの評価値

3.4 球面 SOM のパラメータ

ノードの数を 642 個とした。参照ベクトルの初期値としてそれぞれの要素に $[0.45, 0.55]$ の乱数を設定した。学習率係数を $\alpha(t) = 0.02$ とした。カーネル幅については $t = 0 \rightarrow 1000$ の間は $\sigma(t) = \pi \rightarrow 0.15$ として線形に減少させ、$t > 1000$ 以降は定数 $\sigma(t) = 0.15$ とした。訓練ベクトルの入力回数を 10 万回とした。

4 実験結果

結果として長方形のマップと球面マップが得られた。図 4–1 は長方形の SOM のマップ (a) と球面 SOM のマップ (b)(c) を示している。マップ上では訓練ベクトルと対応するハンカチの番号と画像がそのベクトルの最整合ノードにラベル付けされている。

それぞれのマップは U-matrix 法 (UMM: Unified distance Matrix Methods) を用いて濃淡で着色されている [6]。UMM はマップ上のクラスタを壁と谷で表現し、その壁によってクラスタが区切られる。それぞれのマップ上で暗い部分が壁を、明るい部分が谷を意味している。例えば、長方形のマップ (a) では中心付近に左上から右下に走る黒い領域があり、それが壁となってマップを大きく 2 つの領域に分割していることを読み取れる。

図の (b) と (c) は一つの球面マップを 2 つの異なる方向から眺めたものである。左の図 (b) では全ての評価値が 1 に近かった 16 番のハンカチに焦点を当てている。便宜上、この 16 番がラベル付けされた場所を「北極」と呼び、その反対側の点を「南極」と呼ぶ。右の図 (c) では南極に焦点を当てている。さらに、北極と南極の中間にある仮想の円を「赤道」と呼ぶ。左の図 (b) では 2、4、13、33 番のハンカチの画像が球の外にラベル付けされて円で接続されているが、これはそれらのハンカチがラベル付けされるべきノードが赤道にごく近いところにあるため、見えなくなってしまうからである。

5 考察

図 4–1 の結果から球面 SOM と長方形の SOM を比較する。まず長方形の SOM のマップの四隅に注目する。四隅には左上隅から時計回りで 33、34、4、16 番のハン

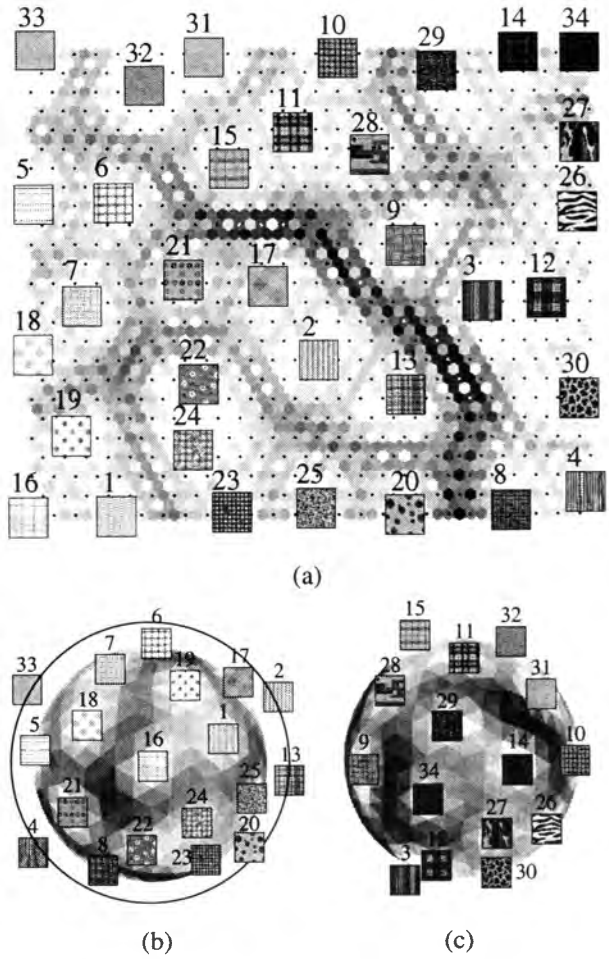


図 4–1: ハンカチの評価に対する長方形の SOM と球面 SOM によるクラスタリング

カチがラベル付けされている。この 4 枚の中で、対角にあるもの同士を組として、二つのペアを考える。一つ目のペアは左下隅の 16 番と右上隅の 34 番のハンカチで、もう一つのペアは右下隅の 4 番と左上隅の 33 番である。一つ目のペアを見ると、マップ上の位置関係から見ても、図 3–2 から見ても明らかに 16 番と 34 番は似ていない。16 番の評価値はすべての項目で 1 に近いのに対して、34 番の評価値はすべて 0 に近い。このように、対照的な評価をされたハンカチ同士が対角にあることで、マップが直観的で分かりやすいと言える。しかし、もう一つのペアにおいては評価がそれほど対照的ではない。実際、16 番と 34 番がラベル付けされたノード同士では、参照ベクトル間のユークリッド距離が 2.05 となっているのに対し、4 番と 33 番の間では 0.72 となっている。より直観的な視覚化のためにはマップ上で 4 番と 33 番がもっと近くにラベル付けされるべきであろう。

球面 SOM では上記のような距離のひずみが改善された。球面マップ上でも 16 番と 34 番はそれぞれ北極と南極付近にラベル付けされており参照ベクトルの違いがマップ上での位置関係に反映されている。しかし 4 番と 33 番については対極になるようにはラベル付けされていない。両者とも赤道付近にあり、位置関係については両者の最整合ノードの間の距離が、16 番と 34 番の間ほどは長くなく、より適切な長さとなっている。

次に球面マップの赤道付近に形成されたクラスタの関係について考察する。赤道付近に並ぶクラスタにラベル付けされたハンカチは、長方形のマップの左上から右下への対角線上にラベル付けされたハンカチと一致している。それらのハンカチは 2、4、13、33 番である。図 4–1(a) の中では、それらを右下から順に 4 → 13 → 2 → 33 と辿ることができる。しかしながら、長方形のマップでは、4 番と 33 番の間の直接的な関係を見いだすことはできない。一方、図 4–1(b) の球面マップの赤道上では 4 → 13 → 2 → 33 → 4 というループを発見できる。このようにループを辿ることができることは球面マップの利点と言える。球面 SOM を用いたことで、クラスタの配列順序が改善され、長方形の SOM では隠れてしまっていたハンカチの関係を知ることができた。

最後に球面 SOM によるクラスタリングに関して興味深い点に触れる。長方形のマップではクラスタの周りを囲んでいるのは UMM による壁とマップ自体の端であるが、これに対して球面 SOM ではクラスタの形成にはマップの端が関与しない。球面 SOM ではすべてのクラスタが図 4–1(c) で 14、29、34 番を壁で囲んでいる南極付近のクラスタのように UMM による壁と谷だけで形成されることになる。球面 SOM で矛盾の少ないクラスタの形成が実現された背景には、こういった、マップの端に制約されないことの影響があるのかもしれない。

6 結論

球面 SOM の性質と構築方法について説明し、多次元データに対する長方形の SOM と球面 SOM の振る舞いの違いについて検討した。

SD 評価法で得られたハンカチの評価結果を用いて、長方形の SOM と球面 SOM をそれぞれ訓練し、それらの結果を比較した。球面 SOM は長方形の SOM よりも無理なく安全に入力データ空間へ適応した。すなわち、長方形のマップで起こる距離のひずみやマップの隅同士の関係に関する問題が解決され、改善されたマップを得ることが出来た。

参考文献

[1] T. Kohonen, “Self-Organizing Maps”, Springer 2000 (3rd ed.)

[2] H. Ritter, “Self-Organizing Maps on non-euclidean Spaces” in Kohonen Maps, E. Oja, S. Kaski editors, Elsevier 1999, pp.95–110

[3] 漆畑喜代裕, 大藪又茂, “球面 SOM の作成とその応用” 第 17 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 日本ファジィ学会, 2001, pp.339–342

[4] D. Nakatsuka, M. Oyabu, “Application of the Spherical SOM” in *Proceedings SCIS & ISIS 2002 Tsukuba*, Japan Society for Fuzzy and Systems 2002, supplied by CD-ROM

[5] Mason Woo, Jackie Neider, Tom Davis, “OpenGL Programming Guide”, Addison-Wesley 1996 (2nd ed.), pp.83–89

[6] A. Ultsch, G. Guimaraes, D. Korus, H. Li, “Knowledge Extraction from Artificial Neural Networks and Applications” in *Proceedings TAT/WTC 93 Aachen*, Springer 1993, pp.194–203

連絡先:
〒921–8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7–1
金沢工業大学 工学研究科 システム設計工学専攻
大藪 又茂
TEL: +81–76–248–8100
FAX: +81–76–294–6711
Email: oyabu@neptune.kanazawa-it.ac.jp

球面自己組織化マップの有効性

The usefulness of Spherical Self-organizing Maps

黒澤 仁，藤村 喜久郎，大北 正昭，徳高 平蔵，大藪 又茂 (*)
Hitoshi Kurosawa, Kikuo Fujimura, Masaaki Ohkita, Heizo Tokutaka and Matashige Ohyabu
鳥取大学工学部 電気電子工学科
Department of Electrical and Electronic Engineering, Tottori University
(*) 金沢工業大学　工学部　人間情報工学科
(*) Kanazawa Institute of Technology

Abstract We introduce the self-organizing map which has the spherical topology in this article. First, we show classical self-organizing maps made from the animal's classified table. Self-organizing maps created by the proposed method is shown next. As for spherical self-organizing maps, it was found out that the relationships of the cluster and adjoining clusters were shown properly.

1　はじめに

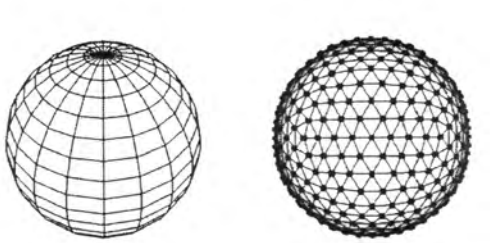
自己組織化マップのユニットの配置は従来2次元の自己組織化マップの場合，長方形の平面形状への展開が主流である．多くの場合，この平面への展開で問題なくクラスタ分類をおこなうことが可能である．ところが，最近扱い始めた医療関係の情報を処理しているときに，平面マップの隅はどうなっているのかよく分からないという指摘を受けることがあった．平面形状を用いた自己組織化マップの欠点は，端と隅が存在し，端と隅で視覚的にも位相的にも不連続な部分が生じる点である．

1999年の国際ワークショップ WSOM'99 の論文集で Ritter は球面の位相関係を持つ自己組織化マップ [1] を提案している．球面自己組織化マップの利点は，端や隅が存在しない点で，すべてのユニットは連続的な位相関係を保つことができる．大藪らの研究グループは球面自己組織化マップを実際にパソコン上で動作するようにした [2]．徳高らの研究グループでは2002年の秋ごろに端が存在しない球面自己組織化マップを医療データの分析に使う試みがなされている [3]．

本論文では，一般にはあまり取り上げられることが少ない球面自己組織化マップが有効な例題を取り上げ，その利点と現状の問題点を報告する．

2　球面自己組織化マップ

球面自己組織化マップは自己組織化マップのユニットを従来の2次元の長方形に並べたものではなく球面上に並べたものである．球面にユニットを並べる場合，図1に示す2種類の位相近傍が考えられる．ここで用いる球面自己組織化マップは (b) のドーム型を用いる．球面自己組織化マップについての細部に関しては大藪らの論文を参照していただきたい．図2に実験に用いた球面自己組織化マップのソフトウェアを示す．本ソフトウェアは金沢工業大学で開発されたものをそのまま用いた．ユニット数は 12, 42, 162, 642, 2562 が選べるが，今回は 42 を選択した．また，パラメータ Window に示すパラメータを用いた．



(a) 地球儀型　　(b) 測地線ドーム型

図 1: 球面自己組織化マップで考えられる2つの位相近傍の形状．(a) 地球儀型；緯度と経度が均等のもの，(b) 測地線ドーム型；ユニットの密度が (a) に比べて均一．

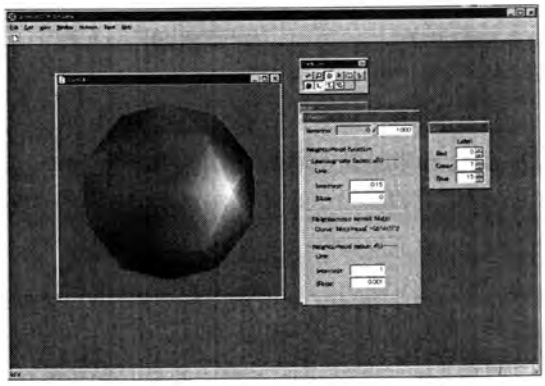
3　動物マップの作成

本例題で使用したデータは文献 [4] の第3章に掲載されている表 3.4 に夜行性，縞（縦，横）の有無，草食性の3つの属性を追加し，16属性としたものを使用する．それを表1に示す．

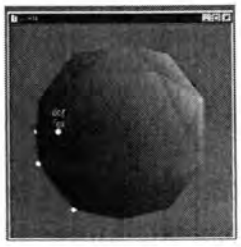
元文献のデータをそのまま利用してもフクロウ（owk）とタカ（hawk）の属性が完全に一致するため，それらを用いて得られた SOM マップ上で両者を識別することは不可能である．その対策のために夜行性の項目を追加した．同様に，ウマ（horse）とシマウマ（zebra）およ

表 1: 16 種類の動物とその 16 属性値.

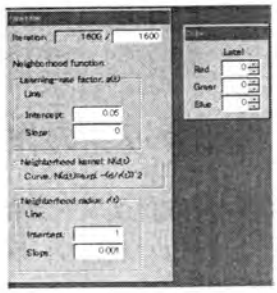
	属性1 小さい	属性2 中ぐらい	属性3 大きい	属性4 複行性	属性5 2本足	属性6 4本足	属性7 髪を持つ	属性8 有蹄類	属性9 たてがみ	属性10 羽根あり	属性11 縞あり	属性12 狩猟	属性13 走る	属性14 飛ぶ	属性15 泳ぐ	属性16 卓食性
ハト 鳩 (dove)	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0.5
メンドリ 雌鶏 (hen)	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0.5
カモ (duck)	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0.3	0	0	1	1	0.5
ガチョウ (goose)	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0.5
フクロウ (owl)	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
タカ (hawk)	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
ワシ (eagle)	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
キツネ (fox)	0	1	0	0.5	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
イヌ (dog)	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
オオカミ (wolf)	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0
ネコ (cat)	1	0	0	0.5	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
トラ (tiger)	0	0	1	0.5	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
ライオン (lion)	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0
ウマ (horse)	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1
シマウマ (zebra)	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1
ウシ (cow)	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1



(a) 球面SOMのWindows版ソフトウェア



(b) 学習途中



(c) パラメータWindow

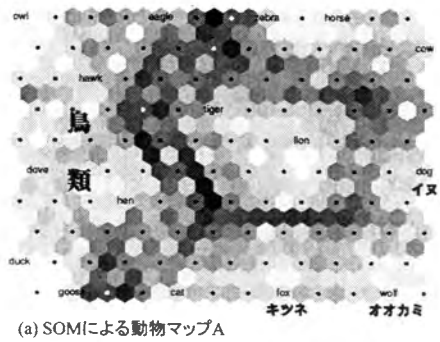
図 2: 球面自己組織化マップのソフトウェア. (a) 画面イメージ, (b) 学習中の様子, (c) パラメータ Window.

びカモ（duck）とガチョウ（goose）を区別するために縞の有無を追加した.

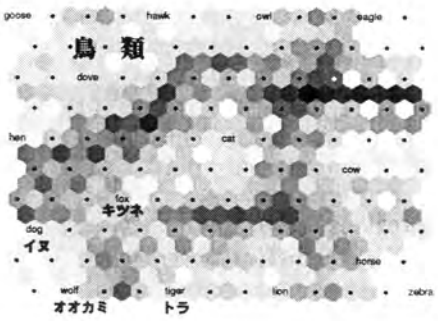
3.1 SOM_PAK で得られた動物マップ

SOM_PAK を用いて得られた動物マップの例を図 3に示す. マップのサイズは 12×10 の 120 個のユニットを使った. 同図には初期条件の違う 2 つの例を示している. オオカミ（wolf）の最整合ユニットにユニット間の位相近傍の尺度で近いのは, (a) の場合はイヌ（dog）とキツネ（fox）, (b) の場合はイヌ（dog）とキツネ（fox）に加えてトラ（tiger）になる. このように平面のマップの場合には, 同じユニット数を使っていてもマップの初期条件などで得られるユニット間の位相近傍的な関係が異なることが多い. したがって, 理想的なマップを得るには何回か試行した中から, 評価者の思考に近いものを選択する必要がある.

この図 3の動物マップの場合には, あらかじめオオカミはイヌに近く, その顔はキツネに似ているという, 人がその成長の過程で学ぶであろう知識と一致するので問題はない. こういった先験的な知識を得ることができない場合には, どのマップが最も適切なのかを選ぶことが不可能である. これが, 2 次元の平面の長方形をした従来の自己組織化マップの最大の欠点である. 今回の結果では (b) のトラが果たしてオオカミに近いのか？人により判断が異なると思われるが, そういわれると非常に悩んでしまう. この両方のマップでトラ（tiger）とネコ



(a) SOMによる動物マップA



(b) SOMによる動物マップB

図 3: SOM_PAK で得られた自己組織化マップの例．オオカミを中心にみると (a) オオカミの近くにはイヌとキツネが見つかる，(b) オオカミの近くにはイヌとキツネ，さらにトラが見つかる．

（cat）の位相近傍的な位置関係はあまり近くない．

3.2 球面自己組織化マップで得られた動物マップ

球面自己組織化マップを用いて得られた動物マップの例を図 3に示す．この図はオオカミのベクトルと最整合するユニットを白色に，最もユークリッド距離が大きなユニッを黒色にして，表現してある．マップに示される色が白に近ければ，オオカミに近いことを意味し，黒ければ，オオカミとは遠い関係であると予想される．今回用いたシステムでは，オオカミのデータ行を第 1 行目に移動することで，これを実現している．同図の (a) は白く見える側，(b) は黒く見える側からのマップである．このように球面自己組織化マップの場合には，その構造上，すべてのユニットを同時に見ることができない．そのため，今回使用したソフトウェアでは，マウス操作で注視点を変更することが可能である．

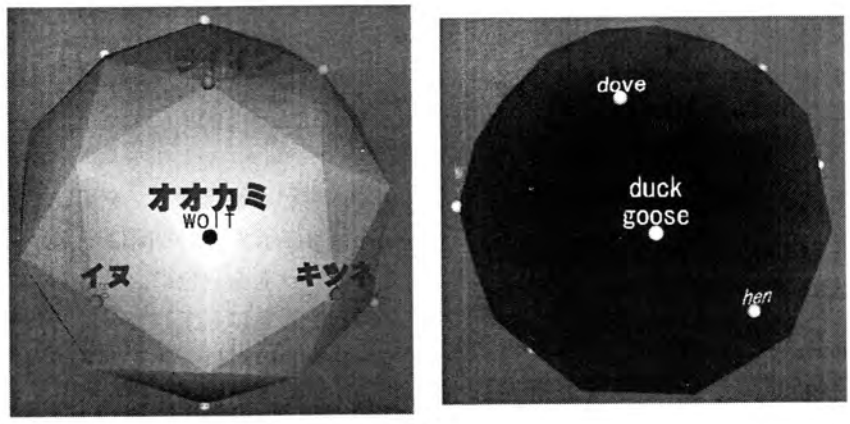
(a) を眺めると，オオカミは球面の位相近傍的にキツネ，イヌ，ライオンに近いことが分かる．もう一方の (b) はほとんど全面が黒い色をしている．ここには鳥類，特に狩猟もせず，雑食性のものが集まっている．オオカミは肉食であるので，その正反対のものが集まっているのは妥当な結果であると考えられる．また，鳥類でも狩猟を好むワシとオオカミの関係を図 5に示す．オオカミの方から，イヌとキツネの延長した方向にワシが存在する．

4 おわりに

今回，動物マップを用いて球面自己組織化マップの有効性を示した．論文タイトルのパッケージ化について，時間的に具体的な資料を準備できなかったが，自己組織化マップのツールである「SOM_PAK」や Matlab 上で動作する「SOM Toolbox」のようにパッケージ化する必要を感じている．今回，用いたソフトウェアでは，要素マップが表示できないなどの他の自己組織化マップのツールより機能が不足する面が存在する．できれば，興味を持っておられる方を中心にして開発チームのメンバーを集め日本発の球面自己組織化マップのパッケージ「SSOM Toolbox on matlab」（仮称）といった有用なフリーソフトウェアを開発したいと考えている．

連絡先

球面自己組織化マップおよび球面自己組織化マップのパッケージ化に興味がありましたら，下記に連絡をお願



(a) 白色の方から　　(a) 黒色の方から

オオカミ(wolf)を白色としたときの球面SOM

図 4: 球面自己組織化マップで得られたマップの例．オオカミとの最整合ユニットを白色に，オオカミのコードブックベクトルとのユークリッド距離が最も大きなところを黒色で表現している．オオカミを中心にみると (a) オオカミの近くにはイヌとキツネとライオンが見つかる，(b) オオカミのほぼ裏側，オオカミとは最も異なると考えられる位置には鳥類が該当する．

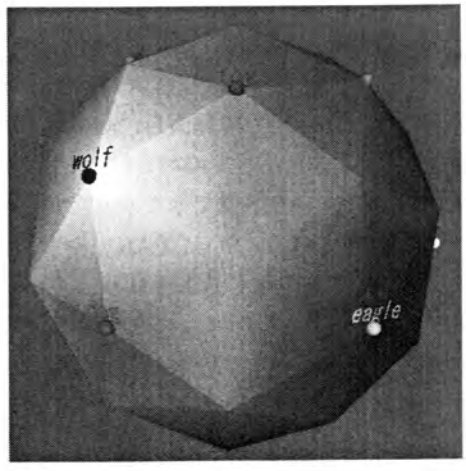


図 5: 球面自己組織化マップで得られた動物マップのオオカミとワシの位置関係．

いします．

〒 680-8552
鳥取県鳥取市 湖山町南 4 丁目 101 番地
鳥取大学 工学部 電気電子工学科
藤村 喜久郎（ふじむら　きくお）
TEL (0857)31-5243
FAX (0857)31-0880
E-mail *fujimura@ele.tottori-u.ac.jp*

参考文献

[1] H.Ritter:"KOHONEN MAPS" , edited by E. Oja and S. Kaski, Elsevier Science, pp.97–110, 1999.

[2] 中塚 大輔，漆畑 喜代裕，大藪 又茂: "球面ＳＯＭの学習過程に関する研究" , 第 3 回自己組織化マップ研究会 2002 講演論文集, pp.43-44, 2002.

[3] 池田 佳弘，馬庭 義朗，宇佐美 真，徳高 平蔵，藤村 喜久郎: "自己組織化マップによる健康診断システム" , バイオメディカル・ファジィ・システム学会 第 15 回年次大会 講演論文集, pp.35-38, 2002.

[4] T.Kohonen: "Self-Organizing Maps" , Springer Series in Information Sciences, Volume 30, 1995
T. コホネン："自己組織化マップ" 徳高平蔵, 岸田 悟, 藤村喜久郎 訳 (シュプリンガー・フェアラーク東京, 1996).

ナップサック問題における多目的Memeticアルゴリズムの性能比較

Comparison of Multiobjective Memetic Algorithms on Knapsack Problems

○界外　志織
Shiori Kaige

石渕　久生
Hisao Ishibuchi

大阪府立大学　大学院工学研究科
Department of Industrial Engineering,
Osaka Prefecture University

Abstract. This paper compares two well-known multiobjective memetic algorithms through computational experiments on knapsack problems. The two algorithms are MOGLS (multiple objective genetic local search) of Jaszkiewicz and M-PAES (memetic Pareto archived evolution strategy) of Knowles & Corne. It is shown that the MOGLS with a sophisticated repair algorithm based on a weighted scalar fitness function has much higher search ability than the M-PAES with a simple repair algorithm. When they used the simple repair algorithm, the M-PAES performs better overall. It is also shown that the diversity of non-dominated solutions obtained by the M-PAES is small in comparison with the MOGLS. For improving the performance of the M-PAES, we examine the use of the scalar fitness function with a random weight vector in the selection procedure of parent solutions.

1　はじめに

Memetic アルゴリズムは，組合せ最適化問題に対して最も有効な手法の 1 つとされている．近年，多数の文献において，多目的最適化問題のパレート最適解を効率よく探索するために，多目的 Memetic アルゴリズムが用いられている．

多目的 Memetic アルゴリズムに関する比較研究では，Jaszkiewicz により提案された MOGLS (multiple objective genetic local search) [1] と Knowles & Corne により提案された M-PAES (memetic Pareto archived evolution strategy) [3] の高い探索能力が示されている．しかし，MOGLS と M-PAES に関する比較研究では，各手法の相対的な探索能力に関して，異なる結論が報告されている．Knowles & Corne [4] は，M-PAES の性能が MOGLS の性能よりも優れていると結論づけている．一方，Jaszkiewicz [2] は MOGLS の性能が M-PAES の性能よりも優れていると結論づけている．

本研究では，なぜこのような異なる結果が文献 [2], [4] において得られたのかを明らかにするために，これらの比較研究で用いられた多目的ナップサック問題 [5] に関して，様々な観点から MOGLS と M-PAES の性能比較を行う．また，M-PAES の親個体の選択方法にランダムな重みに基づくスカラー関数を導入することにより，M-PAES の性能が大きく向上することを数値実験により示す．

2　数値実験

2.1　多目的ナップサック問題

多目的ナップサック問題 [5] は，複数のナップサックに対する許容量の制約条件のもとで，各ナップサックに含まれるアイテムの総利得最大化を目的とする多目的組合せ最適化問題である．本研究で用いる問題は，多数の文献において進化型多目的最適化手法の性能を比較するために用いられているベンチマーク問題である．一般に，k 目的 n アイテムのナップサック問題は以下のように定式化される．

$$\text{Maximize } \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \left(f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \ldots, f_k(\mathbf{x})\right) \tag{1}$$

$$\text{subject to } \sum_{j=1}^{n} w_{ij} x_j \le c_i, \quad i = 1,2,\ldots,k \tag{2}$$

$$f_i(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{n} p_{ij} x_j, \quad i = 1,2,\ldots,k \tag{3}$$

ここで，p_{ij} はナップサック i でのアイテム j の利得，w_{ij} はナップサック i でのアイテム j の重さ，c_i はナップサック i の許容量である．決定変数ベクトル $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ は，n 個のアイテムの選択を表す．すなわち，$x_j = 1$ と $x_j = 0$ は，それぞれ，アイテム j が選択されるか選択されないかを表している．

決定変数ベクトル $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ の要素は，ナップサックによらず共通であるため，全てのナップサックで同じアイテムが選択される．すなわち，k 個のナップサックの利得を同時に最大にするようなアイテムの組合せを求めることが，この問題の目的である．

本研究では，アイテム数が 250, 500, 750 の 2, 3, 4 目的ナップサック問題を用いる．また，この多目的ナップサック問題は，これまでに行われた比較研究 [2], [4] においても用いられている．

2.2 比較手法

2.2.1 MOGLS

Jaszkiewicz によって提案された MOGLS [1] は，ランダムな重みベクトルに基づくスカラー関数を用いて解の評価を行う．

$$f(\mathbf{x},\Lambda)=\sum_{i=1}^{k}\lambda_i f_i(\mathbf{x}) \tag{4}$$

$$\forall i\ \lambda_i \geq 0 \text{ and } \sum_{i=1}^{k}\lambda_i = 0 \tag{5}$$

MOGLS の親個体の選択において，最初に重みベクトルがランダムに選択される．次に，この重みベクトルに基づくスカラー関数値に関して最良な K 個の個体のなかからランダムに親個体が選択される．このような方法により選択された親個体に交叉を行い，子個体を生成する．スカラー関数を用いることにより，MOGLS は，目的空間内で似た親個体を選択するという Mating restriction を行う．なお，子個体に対する局所探索操作においても，親個体の選択で用いられた重みベクトルに基づくスカラー関数が用いられる．

本研究では，文献 [2], [4] と同様に，MOGLS における局所探索操作の終了基準として，2 つのパラメータを用いる．1 つ目の終了基準は，局所探索における最大移動回数（l_opt）であり，2 つ目は，局所探索における最大連続移動失敗数（l_fails）である．また，文献 [2], [4] と同様に，確率 $4/n$ のビット反転操作を用いて近傍解を生成する．

2.2.2 M-PAES

Knowles & Corne によって提案された M-PAES [3] は，多目的局所探索手法である(1+1)-PAES (Pareto archived evolution strategy) に個体群と交叉操作を導入した手法である．MOGLS では，各個体を評価するためにランダムな重みベクトルに基づくスカラー関数を用いるが，M-PAES では，解の Pareto ranking と Crowding の概念に基づいて解を評価する．

M-PAES において，個体群 P とは別に 2 つの Secondary population (Local archive H, Global archive G) が保存される．Local archive H は，局所探索操作における近傍解を評価するための比較集合として用いられる．一方，Global archive G は，手法の実行中に発見された非劣解を保存する集合として用いられる．また，M-PAES において親個体はランダムに $P \cup G$ から選択され，子個体を生成する．なお，本研究では，M-PAES の局所探索操作においても，MOGLS で用いられる 2 つのパラメータ（l_opt, l_fails）を終了基準として用いる．

2.3 パラメータ設定

本研究で用いたパラメータを表 1 に示す．表 1 において，max_evals は解の総評価回数であり，各手法の終了基準として用いられる．本研究では，MOGLS と M-PAES に対して，文献 [2], [4] と同じパラメータ設定を用いる．

2.4 性能評価尺度

本研究では，性能評価尺度として，パレートフロントへの相対的な収束速度を測る Coverage [5] を用いる．ある 2 手法により得られた非劣解集合を $A, B \subseteq X$（X :実行可能解集合）とするとき，Coverage は以下のように定義される．

$$C(A,B) := \frac{\left|\{b \in B \mid \exists a \in A, a \succeq b\}\right|}{|B|} \tag{6}$$

ここで，$C(A,B)$ は，B の非劣解が A の非劣解に優越される割合を示している．したがって，$C(A,B)=1$ は，B に含まれる非劣解の全てが A の非劣解と同じか優越されることを示している．一方，$C(A,B)=0$ は，B に含まれる非劣解は A の非劣解に優越されないことを示している．

3 実験結果

3.1 修復手法の影響

遺伝的操作等により生成された解が実行不可能であった場合，ナップサックに含まれるアイテムを削除し，生成された解を制約条件を満たす実行可能解に変換しなければならない．このとき，削除するアイテムの順番を決定する修復手法が必要となる．

Knowles & Corne による比較研究 [4] においては，以下の式で定義される q_j の昇順にアイテムを削除する修復手法が用いられている．

$$q_j = \max_{i=1}^{k}\{p_{ij}/w_{ij}\}, \qquad j=1,2,\cdots,n \tag{7}$$

この修復手法を用いた場合において，2 目的 500 アイテム問題に対して MOGLS と M-PAES により得られた非劣解集合を図 1 に示す．また，3 目的問題に対して，30 回の実行から得られた Coverage の平均値を図 2 に示す．全 9 問題に対する結果から，2，3 目的問題において，M-PAES が MOGLS よりも優れた性能を持つことがわかった．同じ結論が，Knowles & Corne [4] においても得られている．

一方，Jaszkiewicz による比較研究 [2] においては，MOGLS に対して，以下の式で定義される q_j の昇順にアイテムを削除する修復手法が用いられている．

$$q_j = \sum_{i=1}^{k}\lambda_i p_{ij} \Big/ \sum_{i=1}^{k} w_{ij}, \qquad j=1,2,\cdots,n \tag{8}$$

表 1：パラメータ設定

Problems	Initial population size		K	$\|CS\|$	*l_fails*	*l_opt*	*max_evals*
	M-PAES	MOGLS	MOGLS	MOGLS	M-PAES & MOGLS		
2-250	30	150	20	3,000	20	100	75,000
2-500	40	200	20	4,000	20	100	100,000
2-750	50	250	20	5,000	5	20	125,000
3-250	40	200	20	4,000	20	50	100,000
3-500	50	250	20	5,000	20	50	125,000
3-750	60	300	20	6,000	5	20	150,000
4-250	50	250	20	5,000	20	50	125,000
4-500	60	300	20	6,000	20	50	150,000
4-750	70	350	20	7,000	5	20	175,000

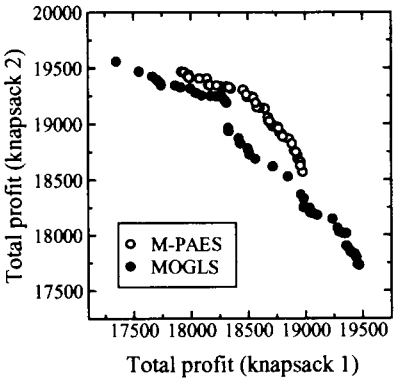


図 1：2 目的 500 アイテム問題に対して
各手法により得られた非劣解集合

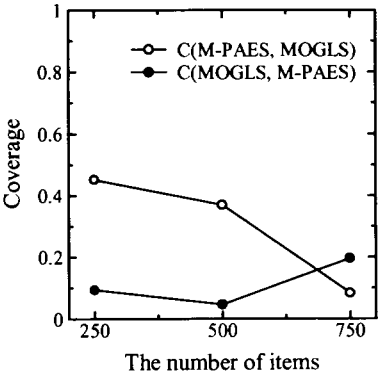


図 2：3 目的問題に対して
同じ修復手法を用いた結果

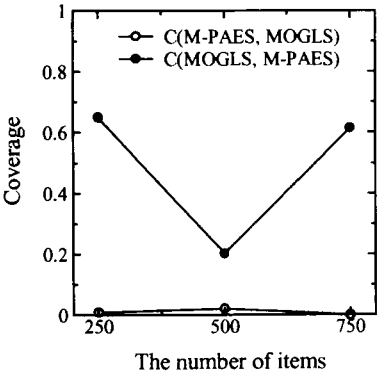


図 3：3 目的問題に対して
異なる修復手法を用いた結果

この修復手法は，現在の重みベクトル$(\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_k)$を考慮することにより，この重みベクトルに基づくスカラー関数値の減少が最も小さいアイテムから順番に削除する．Jaszkiewicz による比較研究 [2] と同様に，MOGLS に対しては式(8)，M-PAES に対しては式(7)で示される修復手法を用いた結果を図3に示す．全 9 問題に対する結果から，MOGLS が M-PAES よりも良い性能を示していることがわかった．同じ結論が，Jaszkiewicz [2] から得られている．

3.2 個体群のサイズの影響

Knowles & Corne による比較研究 [4] において，MOGLS における個体群のサイズ$|CS|$は 100 と設定されていた．一方，Jaszkiewicz による比較研究 [2] において，個体群のサイズ$|CS|$は，初期個体群のサイズ$|S|$と K の値によって，$|CS| = K \times |S|$と決定されている．

MOGLS の性能に対する$|CS|$の影響を調査するために，K を 20 に固定し，$|S|$を 5，10，20，50，100，200，500 に変化させ，M-PAES との比較を行った．ここで，比較に用いられる M-PAES の結果は，$|S|$の値に関わらず同じである．MOGLS と M-PAES の両方に対して，式(7)で示される修復手法を用いて数値実験を行った．2 目的 500 アイテム問題に対する結果を図 4 に示す．また，MOGLS では式(8)で示される修復手法，M-PAES では式(7)で示される修復手法を用いて同様の比較を行った結果を図 5 に示す．これらの図より，MOGLS の性能は，$|CS|$が非常に大きい場合を除き，$|CS|$にあまり依存しないことがわかった．

以上の結果から，2 手法の相対的な性能は，個体群のサイズ$|CS|$よりも，修復手法の選択に大きく依存していることがわかった．

4 M-PAES の改良

図 1 において示されているように，M-PAES は MOGLS に比べ，多様な非劣解集合を生成することができない．この理由として，MOGLS と M-PAES における解の評価方法の違いが考えられる．MOGLS がランダムな重みベクトルに基づくスカラー関数を用いて解を評価する一方で，M-PAES はパレートランキングに基づいて解を評価する．MOGLS は，このランダムな重みベクトルに基づくスカラー関数を用いることにより，目的空間全体を探索することができる．また，MOGLS は，親個体の選択においてもこのスカラー関数を用いることにより Mating restriction を行っている．

そこで，M-PAES における親個体の選択方法に，MOGLS において用いられているランダムな重みベクトルに基づくスカラー関数を導入することにより，M-PAES の性能の改良を試みる．

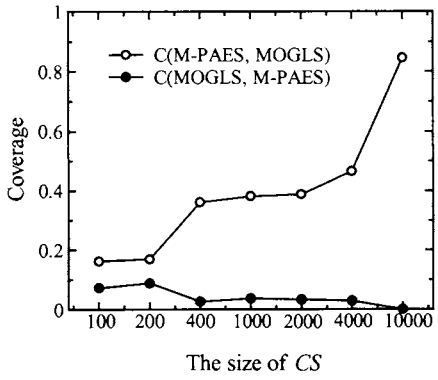


図 4：同じ修復手法を用いた場合の
個体群のサイズによる影響

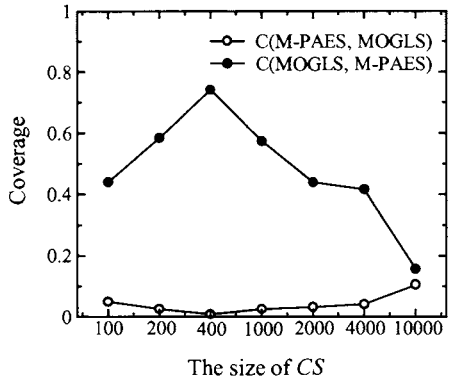


図 5：異なる修復手法を用いた場合の
個体群のサイズによる影響

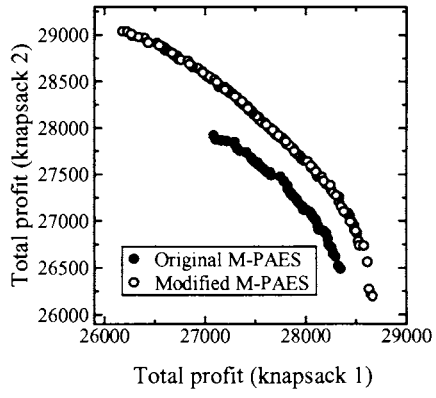


図 6：親個体の選択方法に修正を加えた M-PAES と
通常の M-PAES により得られた非劣解集合

通常の M-PAES において，親個体は $P \cup G$ からランダムに選択される．この選択方法を，ランダムな重みベクトルに基づくスカラー関数を用いたトーナメント選択に修正する．このトーナメントサイズを大きくすることにより，目的空間においてより似た個体を親個体として選択することが可能となる．また，親個体が選択される度に，このスカラー関数に用いられる重みベクトルはランダムに更新される．

2 目的 750 アイテム問題に対して，親個体の選択方法に修正を加えた M-PAES と，通常の M-PAES により得られた非劣解集合を図 6 に示す．ここで，親個体の選択方法に修正を加えた M-PAES に対して，式(8)で示される重みベクトルを考慮した修復手法が用いられ，トーナメントサイズは 5 に設定されている．図 6 より，親個体の選択方法に修正を加えることにより，解集合の多様性だけでなく，パレートフロントへの収束速度に関しても，M-PAES の性能を大きく向上させることができた．また，式(7)で示される修復手法を用いるよりも，式(8)で示される修復手法を用いることにより M-PAES の性能が大きく向上することから，修復手法の選択が手法の性能に大きな影響を与えていることがわかった．

5 おわりに

本研究では，これまでに行われた MOGLS と M-PAES の比較研究 [2], [4] において，異なる結論を導いた 2 つの要因を数値実験により検証した．この要因の 1 つはナップサック問題において用いられる修復手法の違いであり，もう 1 つは個体群のサイズの違いであった．数値実験により，修復手法の選択は手法の性能に大きな影響を与えるが，個体群のサイズは手法の性能にあまり影響を与えないことを示した．また，M-PAES に対して，親個体の選択方法に修正を加えることにより，M-PAES の性能が大きく向上することを数値実験より示した．今後，手法の性能に大きな影響を与えた修復手法について，さらなる調査を行うことが必要である．

参考文献

[1] Jaszkiewicz, A.: Genetic Local Search for Multi-Objective Combinatorial Optimization, *European Journal of Operational Research* 137 (2002) 50-71.

[2] Jaszkiewicz, A.: On the Performance of Multiple-Objective Genetic Local Search on the 0/1 Knapsack Problem – A Comparative Experiment, *IEEE Trans. on Evolutionary Computation* 6 (2002) 402-412.

[3] Knowles, J. D., and Corne, D. W.: M-PAES: A Memetic Algorithm for Multiobjective Optimization, *Proc. of 2000 Congress on Evolutionary Computation* (2000) 325-332.

[4] Knowles, J. D., and Corne, D. W.: A Comparison of Diverse Approaches to Memetic Multiobjective Combinatorial Optimization, *Proc. of 2000 Genetic and Evolutionary Computation Conference Workshop Program* (2000) 103-108.

[5] Zitzler, E., and Thiele, L.: Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 3 (1999) 257-271.

連絡先

〒591-8032 大阪府堺市学園町 1-1
大阪府立大学 大学院工学研究科
石渕　久生
電話：072-254-9350
FAX：072-254-9915
E-mail：hisaoi@ie.osakafu-u.ac.jp

共生進化ウイルスを用いたGAの提案とそのウイルス評価法

A Proposal of GA Using Symbiotic Evolutionary Viruses and Its Virus Evaluation Techniques

[1] 坂倉義明 Yoshiaki Sakakura
[1] 谷口典之 Noriyuki Taniguchi
[2] 星野孝総 Yukinobu Hoshino
[2] 亀井且有 Katsuari Kamei

[1] 立命館大学大学院 理工学研究科 Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan Univ.
[2] 立命館大学 理工学部 情報学科 Dept. of Computer Science, Ritsumeikan Univ.

Abstract In this paper, we propose a Genetic Algorithm (GA) using symbiotic evolutionary viruses. Our GA is based on both the building block hypothesis and the virus theory of evolution. The proposed GA aims to control a destruction of building blocks by discovering, keeping, and propagating of building blocks based on virus operation. Concretely, we prepare the group of individuals and the group of viruses. In our GA, the group of individuals searches solutions and the group of viruses searches building blocks. These searches are based on the symbiotic relation of both groups. Also, our GA has two types of virus evaluation techniques. One is that each virus is evaluated by the difference of the fitness of an individual between before and after infection of virus. Another is that all viruses are evaluated by the difference of the fitness of an individual between before and after infection of all viruses. Furthermore, we applied the proposed GA to the minimum value search problem of a test function which has some local solutions far from the optimal solution. And, we discuss a difference of behaviors of the proposed GA based on each virus evaluation techniques.

1 はじめに

筆者らは，これまで，積木仮説 [1] およびウイルス進化論 [2] に着想を得た共生進化ウイルスを用いたGAを提案してきた [5]．本手法は，ウイルスと個体群の共生関係にもとづく遺伝演算により，スキーマ単位の演算，スキーマの保持を実現し，GAの探索効率の向上を目的とする．ここで，関連研究について述べる．本手法のような，積木仮説，ウイルス進化論に着想を得たGAとして，久保田らの手法 [3]，半田らの手法 [4] が提案されている．久保田らの手法では，ウイルスが個体群の遺伝子を取込む事が出来るとし，個体群が発見した積木の保持，伝播を行っている．それに対し，本手法は，ウイルス群は個体群と別枠で探索を行っている．これにより，個体群が収束した後の問題環境の変化にも，迅速に対応できることが期待される．また，半田らの手法では，解を探索する個体群とは別に，積木を探索する個体群を用意し，それぞれ独立に進化を行う．これに対し，本手法は，ウイルス群が個体群と別枠で用意されている点では類似するが，ウイルスの学習は個体からのフィードバックのみによって行われる．そのため，複雑な遺伝演算を回避できる反面，個体の適応度関数を十分に考慮しなければならない．また，筆者らは，本手法を単峰性関数および，最適解近傍に準最適解が存在する多峰性関数の最小値探索問題に適用し，その挙動および有用性を検証してきた [5]．しかしながら，最適解近傍に準最適解が存在しない多峰性関数の最小値探索問題に対して，本手法を適用していない．また，このような問題では，ウイルスの組合せに対する評価が重要になると考えられる．

そこで本稿では，ウイルスの組合せを考慮に入れたウイルス評価法を提案する．そして，多峰性関数の最小値探索問題を通して，個々のウイルスを独立に評価する評価法をもちいた提案手法と比較し，ウイルスの挙動を確認する．

2 共生進化ウイルスを用いたGA

2.1 提案手法の概要

本手法は，積木仮説およびウイルス進化論に着想を得たアルゴリズムである．基本的には，ウイルス群と個体群の共生関係にもとづき進化を行う．GAと本手法の違いを説明する．GAは，個体群中で選択，交叉により，親個体の遺伝子列を継承する．そして突然変異により親個体が持ち得ない遺伝子を発現させる．これにより，ダーウィン進化論にもとづく自然淘汰による環境適応，適者生存を模倣している [1]．一方，本手法では，ウイルス群により個体群のが変化し，その変化した個体に対しGAと同様の遺伝演算を行う．また，ウイルス群は個体群への感染にもとづき学習を繰り返し，その学習状況に合わせ，個体群に異なる変化を与える．これにより，ウイルス進化論にもとづく個体群の急速な変化による進化および，GAに示唆される自然淘汰による環境適応，適者生存をモデル化する．本手法の具体的な処理手順をFig.1に示す．Fig.1では，何らかの形で生成された個体群を評価し，それら個体群に対し，感染を行う．その後，感染させられた個体群に対し，選択，交叉，突然変異を行い次世代の個体群とする．ここで，ベースとなるGAは，全ての個体が選択，交叉，突然変異の対象になる離散世代モデルGAを用いる．

2.2 ウイルス感染

まず，ウイルスの構成として，ウイルスは遺伝情報および遺伝子座情報を持つ．遺伝情報は1ビットのバイナリコードで表現され，個体の一部分となることが出来る．遺伝情報の種類数は，個体のコーディングに依存する．本手法では，解候補をバイナリで表現できる問題に対しアプローチを行っているため，ウイルスの持つ遺伝

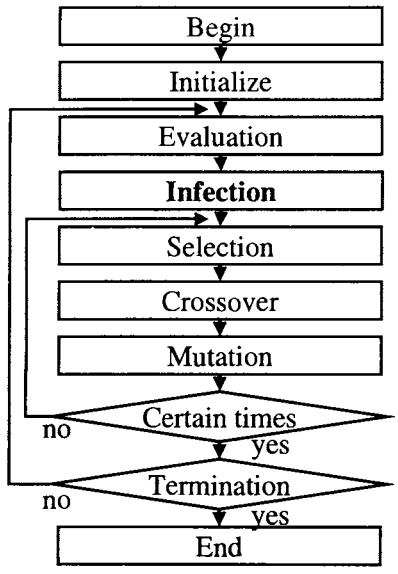


Fig. 1 The procedure of the proposed GA

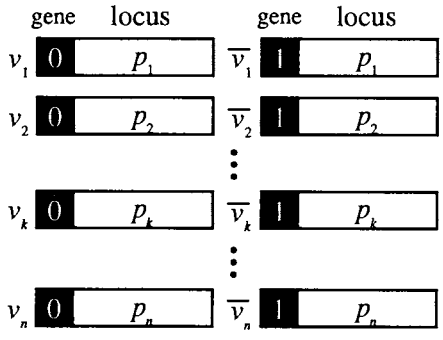


Fig. 2 viruses

情報は0もしくは1となる．また，遺伝子座情報は，バイナリコードで表現され，ウイルスが感染させることの出来る個体の遺伝子座を意味する．遺伝子座情報の種類数は，個体の遺伝子長と同様になる．このように構成されるウイルス集団をFig.2に示す．また，異なる遺伝情報をもち，その遺伝子座情報 p_k が同様のウイルスを対立ウイルスと呼び，それぞれを v_k，$\overline{v_k}(k = 1, 2, \cdots n)$ とする．なお，n は個体の遺伝子長となる．

次に，ウイルス感染について説明する．本手法のウイルス感染手順を，Fig.3に示す．まず，ウイルスが感染させる個体をランダムに選択する．個体が選択されると，その全ての遺伝子座に対しウイルス選択・伝播を行い，それらが終了した後にウイルス評価を行う．そして，決められた感染個体数を満たせば感染終了とする．ここで，ウイルス選択は，対立ウイルスごとに独立に行われるものとし，世代 t におけるウイルス v_k の選択確率 $P_t[v_k]$ はEq.1となる．

$$P_t[v_k] = f(diff_{kt}/T) \tag{1}$$

このとき，ウイルス $\overline{v_k}$ の選択確率 $P_t[\overline{v_k}]$ は，$P_t[\overline{v_k}] = 1 - P_t[v_k]$ となる．ここで，$diff_{kt}$ はEq.2のように定義される．これは，ウイルス v_k が $\overline{v_k}$ に比べ，どの程度優

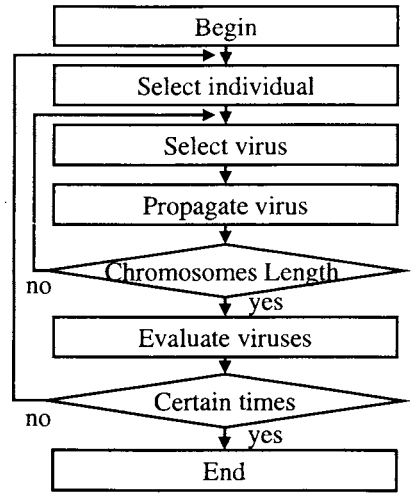


Fig. 3 The procedure of the viruses infection

良なウイルスであるかの指標となる．

$$diff_{kt} = virusvalue_{v_kt} - virusvalue_{\overline{v_k}t} \tag{2}$$

また，関数 $f(x)$ はEq.3で与えられるシグモイド関数を用いる．これにより，対立ウイルス間の評価値の差の大きさが，ウイルスの学習度合いと考えた場合，学習が十分なウイルスとそうでないウイルスに対し，各々のウイルスの学習度合いに合わせた選択圧を実現することが可能である．さらに，この関数に対する入力 $diff_{kt}$ を温度 T で除する．これにより，問題にあわせた選択圧を実現する．

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x^2)} \tag{3}$$

ウイルスが選択されると，ウイルスは遺伝子座情報をもとに，遺伝子座を決定し，その遺伝子座に遺伝情報を伝播する．ここで，ウイルスは評価値 $virusvalue$ を得る．これは感染による個体の適応度変化に依存する．本手法では，このウイルス評価法として，個々のウイルスに対し独立に評価を与える方法（独立評価），ウイルスの組合せを考慮した評価法（組合せ評価）がある．まず，独立評価において，世代 t における，感染するウイルスを v_k，ウイルス v_k が感染される個体を m，その集合を S，個体 m のウイルス v_k による感染前後の適応度を，それぞれ $fitness_{v_km}$，$fitness'_{v_km}$ とする．このとき，ウイルス v_k の評価値 $virusvalue_{v_kt}$ はEq.4で与えられる．

$$virusvalue_{v_kt} = \frac{\sum_{m \in S}(fitness'_{v_km} - fitness_{v_km})}{\#\{S\}} \tag{4}$$

独立評価では，個々のウイルスに厳密な評価値を与えることが出来る．しかしながら，積木の組合せをウイルスの評価値として保持することが困難となる可能性が有る．次に，組合せ評価において，世代 t における，感染するウイルスを v_k，ウイルス v_k が感染した個体を m，その集合を S，個体 m のウイルス v_k を含むすべてのウイルスによる感染前後の適応度を，それぞれ $fitness_{mt}$，$fitness'_{mt}$ とする．このときウイルス v_k の評価値 $virusvalue_{v_kt}$ はEq.5で与えられる．

$$virusvalue_{v_kt} = \frac{\sum_{m \in S}(fitness'_{mt} - fitness_{mt})}{\#\{S\}} \tag{5}$$

組合せ評価では，個体 m に感染した全てのウイルスが，互いに影響を及ぼしあう評価を行う．そのため，ウイルスを組合せとして評価することが出来る反面，個々のウイルスに厳密な評価値を与えることが困難である．

3 数値実験

3.1 実験環境

本稿では，提案手法（独立評価，組合せを考慮した評価）を多峰性関数の最小値探索問題に適用し，ウイルスの挙動を確認する．テスト関数として，Schwefel 関数を用いる．これを Eq.6 に示す．

$$F(x) = \sum_{i=1}^{n} -x_i \sin\left(\sqrt{|x_i|}\right) \quad (-512 \leq x_i < 512) \tag{6}$$

ここで，Schwefel 関数は，最適解を探索領域の境界付近に持ち，最適解の周辺に準最適解が存在しない．なお，次元数として，ウイルスの挙動確認の簡単化のため，$n = 2$ とし，歩幅は，$\Delta x_i = 1$ とした．次に，関数の最小値を行う際の GA パラメータを Table1 に示す．なお，これらは，試行錯誤的に決定した．また，本手法では，ウイルスが個体群と別枠でスキーマの探索を行うため，個体群が局所解に収束した後もウイルスが学習を進めると考えられる．これにより，個体群が最適解近傍に，その探索空間を移動させることが期待される．これを検証するため，定義域内においてランダムに生成された初期個体群を用いた実験のほかに，定義域内の最適解近傍を除く範囲でランダムに生成された初期個体群を用いた実験を行う．テスト関数は $x_i = 421$ の時に最適解を得るため，その範囲は $-512 \leq x_i \leq 200$ とする．また，ウイルス評価値の初期値について，一般には，全ての対立ウイルスにおいて，各々のウイルスが同様の選択確率を持つように，全てのウイルスの評価値を同じとする．しかしながら，個体群が局所解に収束しているとき，ウイルスが十分に学習している場合と，そうでない場合が考えられる．そのため，一般に用いるウイルス評価値の初期値とはべつに，全ての対立ウイルスにおいて，遺伝情報 0 を持つウイルスが選択されやすくなるウイルス評価値の初期値を用意する．具体的には，各対立ウイルスにおいて，遺伝情報 0 を持つウイルスの評価値を温度定数 T，遺伝情報 1 を持つウイルスの評価値を 0 とする．これをウイルス評価値固定と呼ぶ．次に，用いた評価関数を Eq.7 に示す．

$$fitness(x) = \frac{f_{max} - f(x)}{f_{max} - f_{min}} \tag{7}$$

ここで，f_{max}，f_{min} はそれぞれ，目的関数 $f(x)$ の最大値，最小値を示す．これにより，$f(x)$ の値が小さければ小さいほど，$fitness(x)$ が大きくなる．また，$fitness(x)$ は，0 から 1 の範囲で値が決定される．このような環境において，提案手法（独立評価，組合せ評価）共に 10 試行の実験を行った．なお，次節に示す結果は，全てこれら 10 試行の平均値とする．

Table 1 Simulation parameters

Population size	300
Gene length	200
Cording	Gray cording
Crossover method	Two point Crossover
Crossover rate	0.9
Mutation method	bit reverse
Mutation rate	0.001
Termination condition	1000 generations
Number of infection times	1
Temperature T	0.025

3.2 結果と考察

まず，提案手法（独立評価，組合せ評価）の適応度の最良値推移を Fig.4 に示す．また，各対立ウイルス間の評価値が温度定数 T を超えるウイルス数を，それぞれの遺伝情報ごとに，Fig.5 に示す．なお，これは，定義域内でランダムに生成された初期個体群および，ウイルス評価値固定を用いない環境での実験結果である．Fig.4 において，組合せ評価を用いた提案手法は，独立評価を用いた提案手法とくらべ，その収束が遅い．また，Fig.5 において，両評価法ともに，遺伝情報 0 をもつウイルスに比べ，遺伝情報 1 をもつウイルスの評価値が高いことがわかる．なお，テスト関数の最適解は，$x_i = (11110111001)$ であり，0 よりも 1 が多い．よって，両評価法ともに最適解に近づくように学習をしていることがわかる．一方，独立評価に比べ，組合せ評価のほうがその振幅が大きい．これは，組合せ評価が，個々のウイルスが得る評価値が大きく個々のウイルスに厳密な評価が与えられないためだと考えられる．しかしながら，独立評価に比べ，組合せ評価のほうがより最適解に近い学習をしている．これは，独立評価は，各ウイルスに対して組合せの対象となるウイルスが個体群に十分に伝播していない限り，組合せを考慮した評価を個々のウイルスに与えることが困難なのに対し，組合せ評価は，直接的に組合せを考慮しているためだと考えられる．

次に，提案手法（独立評価，組合せ評価）において，最適解が存在しない範囲でランダムに生成した初期個体群を用いた実験における，最適解と最良値の x_i の差の総和を，Fig.6-7 に示す．なお，Fig.6 は，ウイルス評価値固定を用い，Fig.6 は，ウイルス評価値固定を用いていない．Fig.6 より，ウイルス評価値固定の場合，独立評価のほうが最適解に近い値を探索していることがわかる．これは，個々のウイルスへの厳密な評価により，学

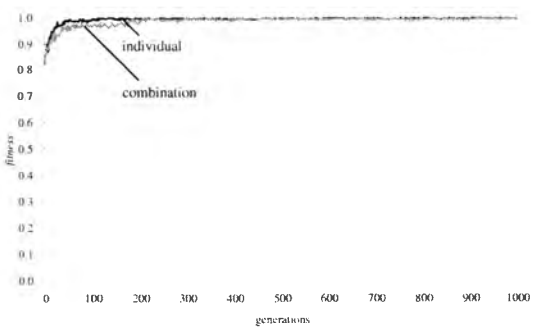


Fig. 4 The best fitness transition

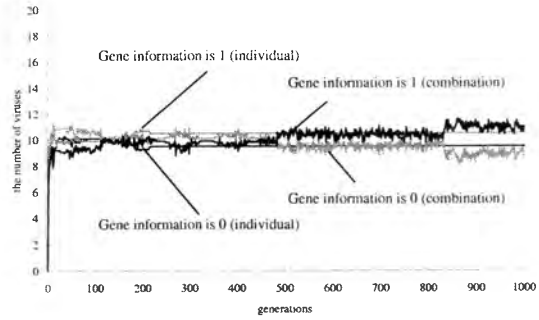


Fig. 5 The number of viruses

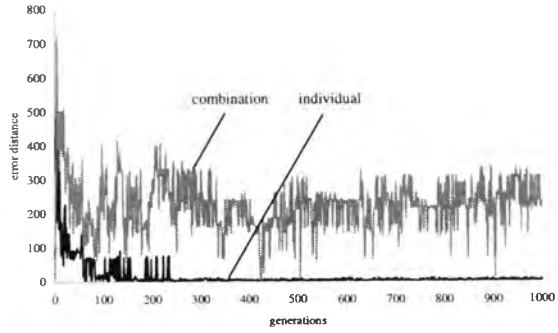


Fig. 6: The distance between best solution and the optimal solution (fixing viruses)

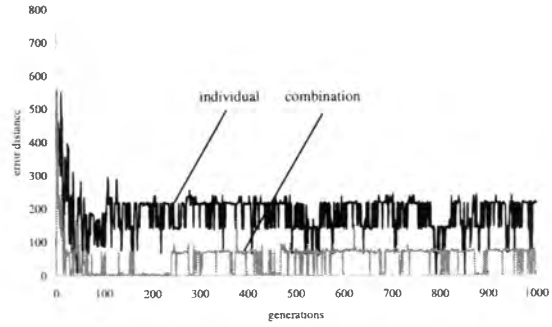


Fig. 7: The distance between best solution and the optimal solution

習度合いの高いウイルス中の，学習しなおさなければならないウイルスだけが，効果的に学習しなおしたと考えられる．一方，Fig.7 より，ウイルス評価値固定を用いない場合，組合せ評価のほうがより最適解に近い値を探索していることがわかる．これは，個体群が最適解近傍に存在せず，その個体を変化させうるウイルスの学習度合いが低いため，組合せ評価を用いることにより，効果的に個体群が最適解近傍に移動したと考えられる．

4 おわりに

本稿では，これまで提案してきた共生進化ウイルスを用いた GA を，最適解近傍に準最適解が存在しない多峰性関数の最小値探索問題に適用した．また，個々のウイルスに独立なウイルス評価法（独立評価）と，ウイルスの組合せを考慮に入れたウイルス評価法（組合せ評価）を比較し，その検証を行った．その結果，組合せ評価は独立評価に比べ，世代を通してウイルスの評価値に振幅がみられる反面，十分な学習後に得られた評価値の高いウイルスの組合せは，より最適解に近いことがわかった．また，独立評価による，最小限のウイルスの再学習性および，組合せ評価による効果的な個体群の変化を確認した．ここで，本手法では，ウイルスは，個体の感染前後の適応度の変化量を用いて評価値を得る．そして，対立ウイルス間でのウイルス評価値の差により，感染するウイルスが選択される．しかしながら，この評価値の差は，独立評価と組合せ評価では大きく異なり，また，個体の遺伝子長さにも大きく依存すると考えられる．よって，今後の課題として，ウイルスの選択圧についての検証が必要である．

参考文献

[1] D.E.Goldberg "Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning", Addison Wesly (1989)

[2] 中原, 佐川 "ウイルス進化論", 泰流社 (1989)

[3] 久保田直行 福田敏男 "ウイルス進化論に基づく遺伝的アルゴリズムの巡回セールスマン問題への応用", 計測自動制御学会論文集, 第 34 巻第 5 号, pp.408-414, (1998)

[4] 半田久志 片井修 馬場則夫 椹木哲夫 小西忠孝 馬場充 "共進化の機構を用いた遺伝的アルゴリズムの提案", 計測自動制御学会論文集第 35 巻第 11 号, pp.1438-1446, (1999)

[5] Yoshiaki.SAKAKURA, Katsuari.KAMEI "A Proposal of GA Using Symbiotic Evolutionary Viruses and Its Adaptative Infection Technique", Joint 1st International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 3rd International Symposium on Advanced Intelligent Systems CDver. 24Q1-1 (2002)

連絡先：
〒 525-8577
滋賀県草津市野路東 1-1-1
立命館大学大学院 理工学研究科
坂倉義明
TEL：077-561-2807
FAX：077-561-2807
E-mail：yoshiaki@spice.cs.ritsumei.ac.jp

関数最適化問題に対するセルラー構造を有する分散遺伝的アルゴリズム

A Distributed Genetic Algorithm that has Cellular Structure for Function Optimization Problem

○吉田隆則　中島智晴　石渕久生

Takanori Yoshida, Tomoharu Nakashima and Hisao Ishibuchi

大阪府立大学

Osaka Prefecture University

Abstract Various types of genetic algorithms have been proposed in the literature. One of the active topics is distributed genetic algolithms. The algolithms generally fall into two categories: Coarse-grained genetic algorithms and fine-grained genetic algorithms. In this paper, we propose a hybrid method of the two categories of distributed genetic algolithms. There are multiple sub-populations that have cellular structures in the proposed method. Through computer simulations on function optimization problems, we examine the performance of the proposed method from the viewpoints of the search ability and the diversity of populations.

1　はじめに

遺伝的アルゴリズムの探索性能を向上させるための様々な研究が行われている．そのなかで個体群を分割する分散化の研究が活発である．一般に，分散化された遺伝的アルゴリズムは，島遺伝的アルゴリズムとセルラー遺伝的アルゴリズムに大きく分類することができる．島遺伝的アルゴリズムでは，個体群はいくつかの部分個体群に分割されており，各部分個体群は独立に遺伝的アルゴリズムが実行される．一方，セルラー遺伝的アルゴリズムでは，セル構造をなす格子状の空間上に個体が配置されており，遺伝的操作の及ぶ範囲は各個体ごとに決定された近傍構造に限定される．本研究では，これら二つの分散遺伝的アルゴリズムの考えを融合した，セル構造を有する分散遺伝的アルゴリズム [1] の性能を調べる．具体的には，解の探索能力と個体の多様性の維持という二つの観点からその性能を評価する．

2　CCGA

本節ではセル構造をする分散遺伝的アルゴリズム（CCGA）の説明を行う．

2.1　概要

本手法の特徴は，個体群は複数の部分個体群に分割されており，各々の部分個体群にはセル構造が組み込まれている事である．また，各部分個体群には互いの隣接関係が定義されている．図 1 では，400 個の個体からなる個体群が 4 つの部分個体群に分割されており，各部分個体群は 10×10 のセル構造を有している．各部分個体群では独立にセルラー遺伝的アルゴリズムを実行する．島遺伝的アルゴリズムとの大きな違いは，各島にはセル構造があることと，島遺伝的アルゴリズムにおける移住操作に対応する手続きにある．本手法では，移住を行う世代でのみ他の島からの親個体の選択を可能にすることにより，島同士で相互作用を行う．本手法では，他の島と相互作用することのできる個体を限定している．具体的には，部分個体群の境界のセルに位置している個体（図 1 の塗りつぶされた領域）のみ，隣接する部分個体群と相互作用することができる．本研究では，境界のセルに位置している個体の近傍サイズを移住を行う世代では 1 に設定する．例えば，図 1 において，左上の部分個体群内の境界のセルに位置している個体 A は，太線で囲まれた左下の部分個体群内のセルを含む近傍から交配相手となる個体を選択することができる．

2.2　アルゴリズム

以下に，セル構造を有する分散遺伝的アルゴリズムの手続きを述べる．

[CCGA のアルゴリズム]

Step 1: 個体群の初期化．

Step 2: 各個体の適応度を求め，その調整を行う．

　Step 2 – 1: 各個体について，その個体が属する島以外の島のエリート個体とビットごとにその類似度を調べる．

　Step 2 – 2: 共通するビットの割合が T(threshold) 以上ならば適応度を P だけ下げ，T 未満なら適応度は変化させない．

Step 3: 移住を行う世代であれば，部分個体群の境界に位置する個体の近傍サイズは 1 で，そうでない個体の近傍サイズは N とする．また移住を行わない世代であれば，全ての個体の近傍サイズを N とする．

Step 4: 各個体に対して自分と近傍内の個体の中から親個体を選択し，交叉操作により子個体を生成する．

Step 5: 生成された子個体に突然変異操作を適用する．
Step 6: 前世代におけるエリート個体を保存する．
Step 7: 終了判定．終了条件が満たされていなければ Step 2 に戻る．

一般に，個体の多様性を維持すると，簡単な問題に対する解の探索能力は低下することが知られている．逆に解の探索能力を重視すると個体の多様性が失われ，複雑な問題に対する解の探索能力が低下する．適応度調整手続きの狙いは，個体の多様性を保ちながら，広い領域の中でいくらか狙いを定めて集中して探索を行うことである．

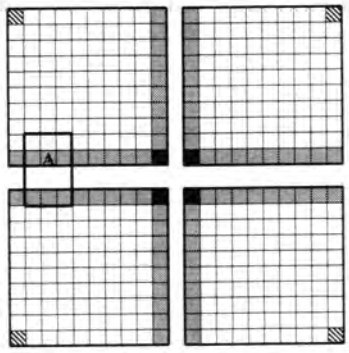


図 1　セル構造を有する分散遺伝的アルゴリズム

3　関数最適化問題

本研究では，テスト問題として以下の二つの関数最適化問題を用いる．なお，F1 は DeJong のテスト関数 [2] の一つである．これらの関数は最小化問題であり，大域的最適値は 0 である．

$$\mathrm{F1}: f_1(x_i|i=1,2,3) = \sum_{i=1}^{3} x_i^2, \quad x_i \in [-5.12, 5.11] \tag{1}$$

$$\mathrm{F2}: f_2(x_i|i=1,2,3) = 3 - \sum_{i=1}^{3} \sin^2(\pi x_i), \quad x_i \in [-1.28, 1.27] \tag{2}$$

なお，F1 には大域的最適値が 1 つしか存在しないが，F2 には 8 個存在する．図 2 は関数 F2 を 2 入力 1 出力関数として視覚化したものである．この場合の最適解の数は 4 つである．

4　評価基準

今回の調査では，4 つの評価基準を設ける．1 つ目は適応度であり，これは解の探索能力を評価する．残りの 3 つはビット値の多様性，遺伝子型の多様性，そして交配した 2 つの個体の類似度であり，これら 3 つは個体の多様性を評価している．また，実験結果における評価値は 10 回実行の平均である．以下に 4 つの評価基準を詳しく説明する．

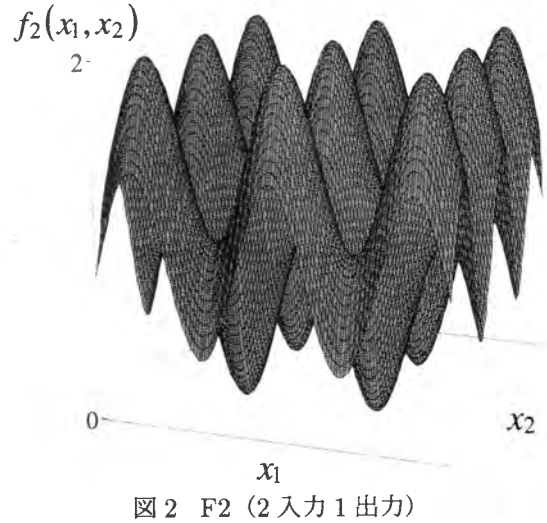


図 2　F2（2 入力 1 出力）

4.1　適応度（F）

この評価基準は，F1 と F2 で異なるものである．具体的には，F1 では個体群の中で最もよい個体の関数値が評価値となる．それに対して F2 では獲得した最適解の個数が評価値となっている．

4.2　ビット値の多様性（DA）

全個体におけるビット値の割合を調査することによって，その多様性を評価する．本研究の数値実験では，2 進数によるコーディングを用いているので，各ビット値がとりうる値は 0 または 1 である．具体的には以下の式により，その評価値を計算する．

$$DA_i = 1 - 4(0.5 - D_i)^2 \tag{3}$$

$$DA = \frac{\sum_{i=1}^{L} DA_i}{|L|} \tag{4}$$

ここで，L は個体のビット長であり，D_i は個体群に対して i 番目のビットが 1 である割合である．DA は 0 から 1 までの値を取る．値が 0 であるときは，ビットには 0 または 1 のどちらかしか存在しない．逆に値が 1 であるとき，0 と 1 の値が半分ずつ存在している．

4.3　遺伝子型の多様性（DG）

この評価値は現在の探索空間の広さを表す．集団内の各個体から各世代でランダムに連続する 10 ビットの部分文字列を取り出し，部分文字列が何種類あるかカウントする．

4.4　交配した 2 つの個体の類似度（I）

この評価値は，どれだけ似た個体同士を交配しているかを示している．類似度は，2 つの個体間で異なる値を持つビット数の，実際の交配時の値 H とランダムに生成した 2 つの個体の理論値 H_0 の割合 I で計算

する．すなわち，$H_o = 2p\,(1-p)$ とする．ただし，p は 0 の割合である．

$$I = \frac{H_0 - H}{H_0} \tag{5}$$

本研究の実験における p の理論値は 0.5 であるので，H_0 の値は 0.5 である．

5 数値実験

数値実験では，2 章で説明したセル構造を有する分散遺伝的アルゴリズム（CCGA）の性能を評価するために，標準の遺伝的アルゴリズム（SGA），セルラー遺伝的アルゴリズム（CGA），島遺伝的アルゴリズム（IGA）と比較する．全ての遺伝的アルゴリズムで，親個体の選択操作はトーナメント方式を用い，エリート保存戦略を用いる．表 1 に数値実験における簡単なパラメータの一覧を示す．

表 1: パラメータ一覧

個体数	400
島の個数（CCGA，IGA）	4
移住間隔（CCGA，IGA）	10 世代
移住率（IGA）	0.05
部分個体群の配置（CCGA）	2×2
交叉確率	1.0
交叉操作	一点交叉
突然変異確率	0.05
突然変異操作	ビット反転
エリートの個数	4
近傍サイズ（CCGA，CGA）	1
トーナメントサイズ	2
アルゴリズム終了条件	500 世代

本研究の数値実験での適応度（F）は，関数値（FV）に対して，$F = -1.0 \times FV$ と設定している．CCGA の適応度調整アルゴリズムにおける変数 T は $T = 0.55$ と設定し，P は $P = (F_m - F_o)/2.0$ と設定した．ここで，F_m はその世代の個体群のなかで最も小さい適応度，F_o は最適値を示している．

5.1 F1 に対する実験結果

F1 に関する実験結果を図 3〜図 6 に示す．図 3 から F1 における解の探索能力は SGA が最も悪く，他の三つの遺伝的アルゴリズムは互いに差がほとんどないことがわかる．また，図 4，図 5 からは提案手法が最も多様性を維持し，SGA が最も多様性を失っていることがわかる．さらに，図 6 から，CCGA と CGA が他の遺伝的アルゴリズムと比較して，より似た個体を交配していることが分かる．これらの結果から CGA は狭い領域で集中して探索を行い，それに対して CCGA は広い領域を探索しながら似た親個体同士を交配していることがわかる．これは島ごとに異なる領域を集中して探索が行われていることを示している．

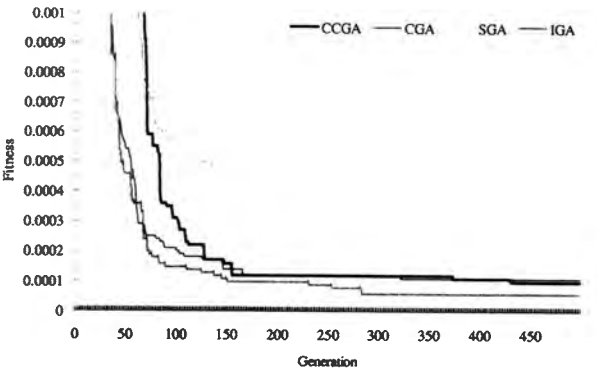


図 3 適応度の変化（F1）

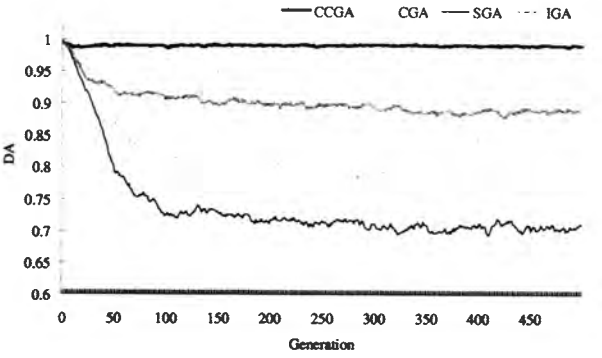


図 4 ビット値の多様性（F1）

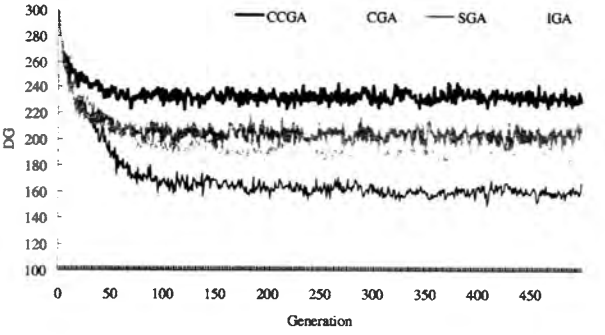


図 5 遺伝子型の多様性（F1）

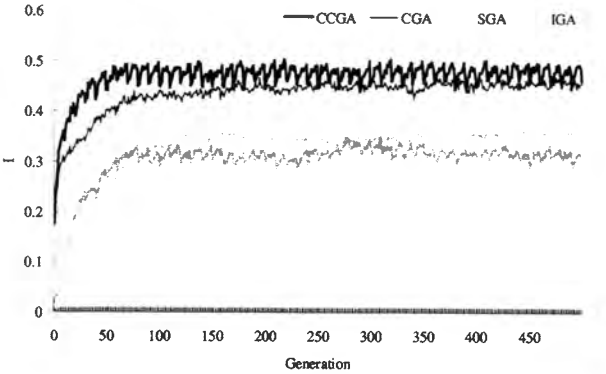


図 6 交配した 2 つの個体の類似度（F1）

5.2 F2 に対する実験結果

F2 に関する実験結果を図 7〜図 10 に示す．なお，F1 の実験結果から SGA の性能が他の遺伝的アルゴリズムに比べて明らかに劣っているため，各図で SGA の結果は省略している．

図 7 はそれぞれの遺伝的アルゴリズムが獲得した最適解の数を示している．CCGA は 10 回のうち 8 回の実行で 4 個の最適解を獲得している．これは複数の最適解をもつ関数最適化問題に対する CCGA の有効性を示している．CCGA は島ごとに最適解を一つずつ獲得していることは特筆すべきである．これにより F1 の考察でも述べていることであるが，CCGA は島ごとに異なる領域を集中して探索していることが，より明確になっている．しかし，CCGA は解を探索するスピードでは他の遺伝的アルゴリズムに劣るということも分かる．また，図 8〜図 10 より多様性に関して F1 からの考察と同じ考察が得られている．

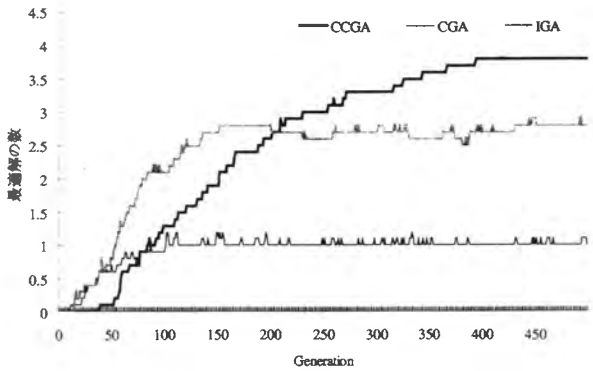


図 7　適応度の変化（F2）

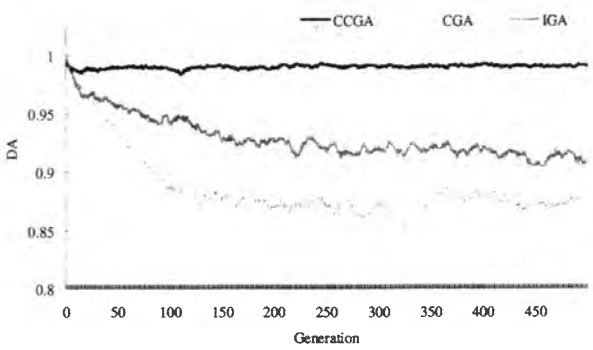


図 8　ビット値の多様性（F2）

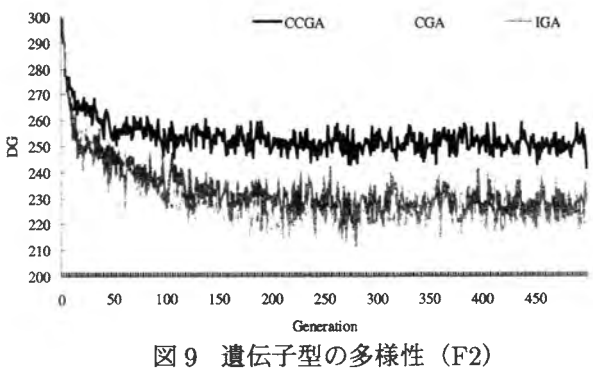


図 9　遺伝子型の多様性（F2）

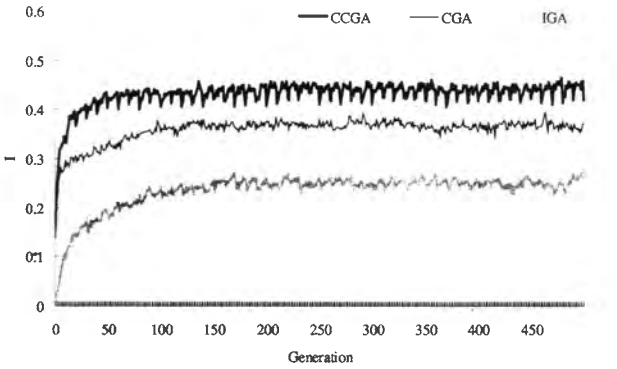


図 10　交配した 2 つの個体の類似度（F2）

6　結論

本研究では，島遺伝的アルゴリズムとセルラー遺伝的アルゴリズムを融合した，セルラー構造を有する分散遺伝的アルゴリズム（CCGA）の性能を解の探索能力と個体の多様性という観点から調査した．数値実験の結果から，CCGA が多様性を維持するという点で他の遺伝的アルゴリズムよりも優れていることが示された．これは逆に言うと簡単な問題，例えば F1 のような問題の場合，その多様性は解の探索能力に悪影響を与える．事実，F1 の結果ではわずかではあるが，CCGA は IGA に劣っている．簡単な問題に対する解の探索能力においてはさらなる改善が必要である．そしてもう一つ改善が必要な点は，適応度調整アルゴリズムにおける T と P の設定である．本研究の数値実験では，$T = 0.55$ と一定の値に設定した．しかし，問題に応じて最適な T が変化することも考えられる．P に関しても同じ事が考えられ，今回の設定の仕方が最適な結果を生んでいるとは限らない．用いる問題に応じて，最適な T と P を見つけ出すことのできるアルゴリズムが必要である．また，T と P を変化させることによって遺伝的アルゴリズムの探索能力を変化させることも可能であると考えられる．この点も将来の研究課題である．

参考文献

[1] 中島智晴，有山貴信，石渕久生，“セル構造を有する分散遺伝的アルゴリズムの提案”，情報処理学会論文誌，vol. 43, pp. 46-57, Nov. 2002.

[2] K. DeJong, *Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems*, Ph.D. Dissertation, University of Michigan, 1975.

連絡先

〒 599 – 8531 大阪府堺市学園町 1 – 1
大阪府立大学工学部経営工学科　中島 智晴
Tel: 072-254-9351
Fax: 072-254-9915
E-mail: nakashi@ie.osakafu-u.ac.jp

共進化エージェントによる対戦型ゲームにおける戦略の獲得
An Acquisition of Strategy in Two Player Game by Coevolutionary Agents

串田　淳一*　谷口 典之*　星野　孝総**　亀井　且有**
Jun-ichi Kushida　Noriyuki Taniguchi　Yukinobu Hoshino　Katsuari Kamei

立命館大学大学院理工学研究科*
Graduate School of Computer Science
Ritsumeikan University

立命館大学理工学部**
Computer Science
Ritsumeikan University

Abstract The purpose of two player game is that a player beats an enemy. In order to win to various enemies, a learning of various tactics and strategies is indispensable. However, the optimal action to overcome the enemies will change when the game done over and again because the enemy's actions also change dynamically. So, it is difficult that the player aquires the optimal action and the specific player keeps winning to various enemies. In this paper, we apply a Classifier System for agent team to two player game. A reward and a penalty are given to the used rules when the agent achieve specific action in the game and each team's rulebase are evaluated based on the ranking in the league. we propose a learning system by coevolutionary agents in two player game and aim at acquisition of excellent strategy.

1　はじめに

複数のプレーヤーにより, 繰り返し行われる対戦型ゲームにおいて, 特定のプレイヤーが種々の対戦相手に対して勝利し続けることは困難である. これは, 各プレイヤーが常に対戦相手を凌駕しようと切磋琢磨しているためである. このような環境でプレイヤーが勝利し続けるためには, 相手に打ち勝つための様々な戦略が必要であり, それらを対戦相手やゲームの状況に応じて適切に選択し, 改善していく必要がある. そこで本研究では, 対戦型サッカーゲームを題材とし, 共進化の概念を用いたエージェント群の学習システムを提案する. エージェント群はチームを構成し, 各チームは対戦を繰り返しながら共進化を行い, クラシファイアシステム (CS) により行動規則を学習していく. これによりエージェント群が, 対戦相手に勝利するための最適な行動, それにもとづく戦略の獲得を行うことを目的とする.

2　共進化の概念

共進化とは, 競争関係にある複数の種が, 互いに他の生存に影響を与え合いながら進化することであり, 地球生命の進化において本質的な役割を演じてきた [1]. 共進化では自分や相手が進化することによって自分たちの置かれた環境が動的に変化し続けるという特徴があり, 相手の行動に対して自分が有利になるような行動をとることで, 単独進化と比べて, より優れた行動が得ることができる. 共進化手法の一般的なシナリオとしては, ある固体が良い特性を獲得すると, 別の固体はそれに対抗する特性を獲得し, また別の固体がさらにそれを凌駕する特性を獲得する, というものである. このような共進化現象は生物の世界のみにかぎらず, 製品の開発競争, 大国の軍拡競争などについてもその事例が見られる [2].

3　システム構成

3.1　対戦形式

対戦を行うエージェント群は, 3 体のエージェントで 1 チームとし, 複数のチームでの総当りのリーグ戦を行う. チーム同士の対戦は一定数の試合を行い, 勝利試合数が多いほうを勝者とする. 1 回のリーグ戦が終了する

ごとに, 他のチームに対しての勝数でリーグ内での順位を決定する.

3.2 ルールベースの評価

各チームは1つのルールベースを持ち, 対戦時に各エージェントが得点やタックルなどの特定の行動を行った場合に, 使用されたルールに対し報酬, および罰を与え信頼度の更新を行う. 各チームはリーグ戦終了時にCSのルール発見システムで, GAにより個々のルールの改良をおこないルールベース全体の更新を行う. CSにおいてはルールベース全体の最適化は, 個々のルールの信頼度を高めていくことで間接的に行われる. 本手法では, 個々のルールの信頼度の最適化と, ルールベース全体の最適化との対応を行うために, 各チームのルールベースに対して, 対戦結果としてリーグ内での順位による評価を行い, それにもとづいてルールベースの更新を行う.

3.3 GAのパラメータ設定

各ルールベースに対し, CSのルール発見システムで遺伝演算を行う際, リーグ内での順位に応じてパラメータを決定する. ここでは, 信頼度が高い順から一定数のルールを選択することで保存を行い, 交叉, 突然変異により新しいルールを生成しルールベースを更新する. 図1に示すように, 順位の高いチームのルールベースに対しては保存するルールを多くし, 突然変異, 交叉によって得られる新しいルールを少なく設定する. また, 順位が低いチームに対しては, 保存するルールを少なくし, 新しいルールを多く生成するよう設定する. さらに, リーグ内で1位のチームのルールベースの中からルールを選択し, 2位以下のチームのルールベースに追加を行う.

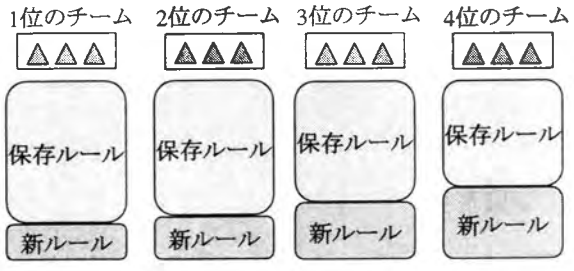


図1 ルールベースの更新

4 シミュレーション実験

4.1 実験環境

実験環境は, 図2に示すようなサッカー型対戦ゲームとする. 対戦を行う両チームのエージェントを, 盤面中央に2体, 自ゴール前に1体配置する. 各エージェントは5×5の視野を持ち, 環境から感覚入力として視野情報を受け取る. 感覚入力では, 自分の位置, 視界中の敵エージェント, 味方エージェント, および, ボールの位置を認識し, ルールベースから感覚入力に適合したルールを受け取り, 行動を決定する. エージェントの行動は, 移動, ドリブル, キックの3種類から選択される. 移動, ドリブル, は周囲8方向に1マス移動, もしくはその場に停止できるものとする. キックの場合は図3のように1マス離れた位置にボールを移動させることができる. 図4のようにボールをキープしているエージェントと同じマスに移動した場合はタックルとし, 相手のエージェントは動くことはできず, ボールを奪うことができる. ゴール, タックル成功時に両チームで使用されたルールに報酬を与え, 報酬分配には, プロフィットシェアリング法を用いる. 両チームのすべてのエージェントが, 順に一回ずつ行動して1ステップ終了とし, 一定ステップが経過したとき試合終了とする. その際, 合計得点が高いチームを勝者とする.

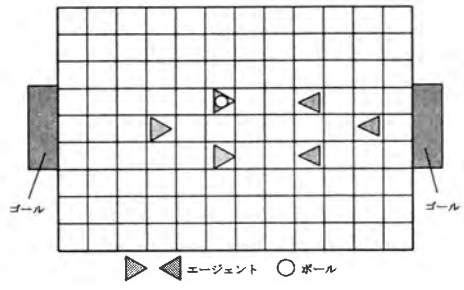


図2 実験環境

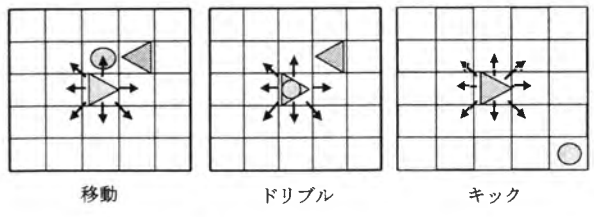


図3 各行動の移動方向

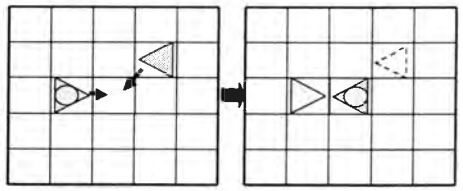


図 4 タックルの成功例

4.2 ルール構成

前件部はエージェントの位置, 視野内での敵, ボール, 味方の位置とする. エージェントの存在する位置は, 図 5 のような 3 つのエリアで分割し表現する. 敵, ボール, 味方の位置は視野情報と同様の 5 × 5 の格子空間で, 図 6 のようなエリアでそれぞれ表現する. 図 6 のようにプロダクションシステムに入力された視野情報の敵, 味方, ボールの位置が各エリアに含まれる場合, ルールが発火する. 複数のルールが発火した場合は, 信頼度によるルーレット選択を行い決定する. 行動部は複数の行動と移動方向が記述され, 図 7 に示すようにルールにより行動部の長さは変化する. これにより, 各エージェントは一回のルール選択で複数ステップの行動を決定する.

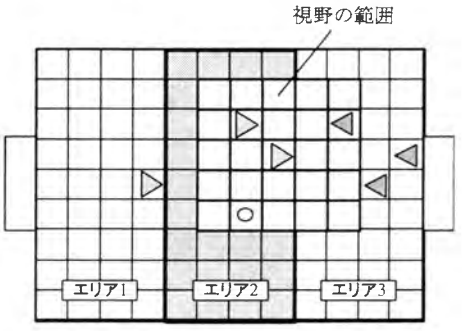


図 5 エージェントの位置と視野

4.3 実験結果と考察

各チーム同士の 1 回の対戦は 5 試合とし, 4 チームでのリーグ戦を 10000 回行った. 実験結果として 100 リーグごとのチーム 1 の他のチームに対する勝率を図 8 に示す. 勝率は一定に収束することなく常に変動しており, 他のチームの勝率に関しても, 同様な結果が得られた. これは対戦を行った各チームで共進化のシナリオに沿った学習が行われたものと考えられる. 次に, 確認された得点例, タックル例を図 9, 図 10, 図 11 に示す. もっとも

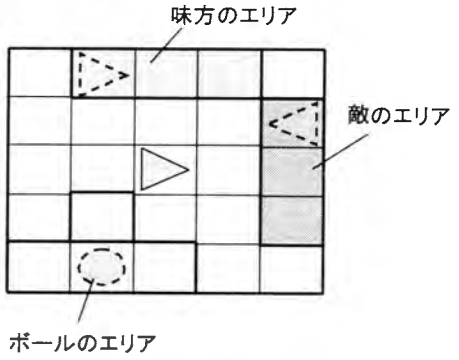


図 6 前件部

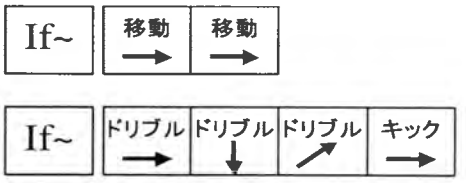


図 7 後件部

多く見られた得点パターンは図 9 のような, 最初にボールをキープしているエージェントがドリブルし, シュートするというパターンで, ある程度盤面の端に回り込み敵ゴールに向かっている. 自ゴール前に配置したエージェントでは, 図 10 のようにゴール周辺で待機し, 接近してきた敵エージェントにタックルを行う行動が見られた. また, 図 11 のように盤面の中央付近でタックルを行い, そのままドリブルし得点するパターンも見られた.

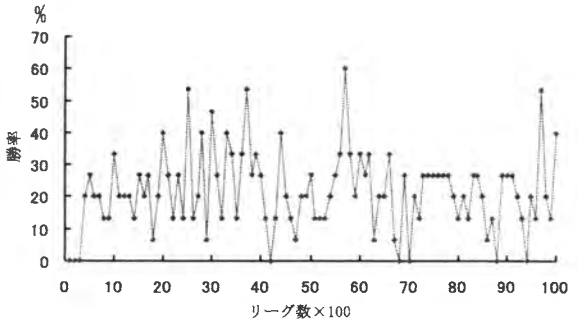


図 8 100 リーグごとのチーム 1 の勝率

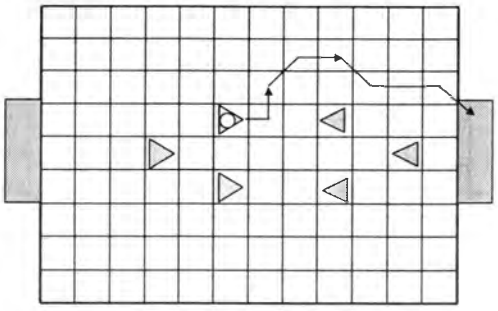


図 9 得点例 1

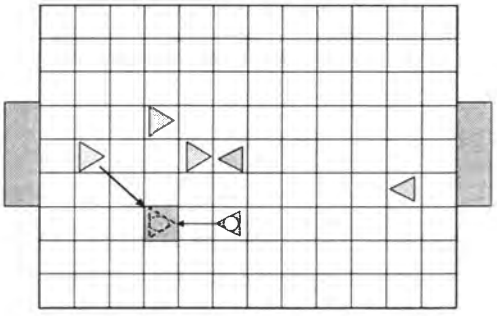


図 10 タックル例

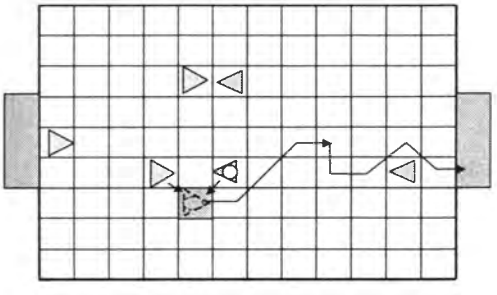


図 11 得点例 2

5 おわりに

本稿では, 共進化の概念を用いた, エージェント群の学習システムを提案し, サッカー型対戦型ゲームでの学習を行った. リーグが進むごとに, 各チームの優劣は交代しながら, いくつかの得点, タックルのパターンを獲得していくことが確認できた. 今後は, 進化の停滞や局所解への収束といった, 共進化の問題点を改善した学習システムの提案を行う.

参考文献

[1] 石渕: ファジィクラシファイアシステム, 日本ファジィ学会誌, vol. 10, No4, pp. 613-625 (1998)

[2] 伊庭斉志: 進化論的計算の方法, 東京大学出版会 (1999)

[3] 小島, 久保, 三上, 和田: GA を用いた共進化 Agent の追跡・回避行動の獲得, 第 7 回インテリジェント・システム・シンポジウム, pp. 345-347(1977)

[4] 正畠 博政, 山村 雅幸: 対戦型ゲームにおける戦略の共進化, 知能システムシンポジウム, pp. 81-84(1998)

[5] 山下, 間口, 小野 典彦, 小野 功: 異種エージェントによる対戦型ゲーム政策の共進化的獲得に関する実験的考察, システム制御情報学会, pp. 13-14(2001)

[6] 間口, 小野 典彦, 小野 功: 対戦型ゲームにおける行動政策の共進化的獲得のための世代交代モデル, システム制御情報学会, pp. 13-14(2001)

[7] 横井 浩史, 石田 崇: 集団行動の創発とファジィ理論, 日本ファジィ学会誌, vol. 10, No4, pp. 637-646 (1998)

[お問い合わせ]
〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1
立命館大学理工学部

串田淳一
TEL:077-561-2807
Mail:kushida@spice.cs.ritsumei.ac.jp

配管が接続される機器同士のまとまりを考慮した機器配置に関する一考察

A Study on Machine Layout for Grouping of Machines Connected with Pipes

松生　洋久　　古橋　武
Hirohisa Matsuike　　Takeshi Furuhashi

三重大学
Mie University

Abstract There have been growing demands for CAD(Computer-Aided Design)support systems. For allocation of various machines in a machine room, a combinatorial optimization problem should be solved under various criteria, such as cost, maintainability, order/neatness, etc. The authors have presented a method for generating layouts through interactions between designer and computer. This paper presents a new evaluation criterion that is to minimize the variance of positions of machines within a group and to maximize the variance of positions of groups, where a group of machines is defined based on pipe connections. This performance index is to find a layout in which machines belonging to the same group are put together and those to different groups are separated. An experiment is done to demonstrate the effects of the proposed criterion.

1. はじめに

空調設備機械室の機器配置は、経済性、保守性、見栄えなど複数の評価指標間の妥協を図る多目的最適化問題である。

本研究では、技術者の経験を反映した機器配置案の作成を目指し、近年、創造支援の分野で期待されている対話型進化的計算[1]を機器配置案作成に適用した対話型機器配置作成支援システムの開発を行ってきた[2－4]。本システムは、システムによる複数の機器配置案の呈示と技術者による配置案の絞込みを繰り返すことで、目的の機器配置案の作成を行うものである。

機器配置において井上ら[2]は、同種機器の横並びで形成される機器ブロックを用いたコーディング法、さらに、技術者の基本的な設計指針をモデル化したヒューリスティクスを導入することによって自由度の高い機器配置案が生成できることを示した。しかし、従来法は、同種機器のまとまりは評価していたが、配管が接続される機器同士のまとまりは考慮していなかった。

本稿では、配管が接続される機器同士のグループについて、グループ内分散を最小化し、グループ間分散を最大化する指標を導入する。この指標により、従来は得られにくかった、配管が接続される機器同士のまとまり考慮した配置案が得られることを示し、実験によりその効果について検討する。

2. 対話型機器配置案作成支援システム

機械室の機器配置は、経済性、保守性、見栄えなど複数の評価指標の下で決定される。機器配置の質は、作図担当者の熟練度やセンスにより作図担当者ごとに異なる。機器配置の評価関数を定式化することは難しく、機器配置案作成自動化のボトルネックとなっている。

そこで、本研究では、機器配置案の探索に対話型進化的計算を導入した対話型機器配置支援システムを提案してきた。

進化的計算により暫定評価関数を用いたパレート最適解探索が行われ、様々な配置案がユーザに呈示される。ユーザは呈示された配置案を選択し、また、配置案の一部を修正することで、探索範囲の絞込みを行う。これを繰り返すことでユーザの求める配置案が生成されていく。

2.1 従来法の問題点

機械室設備図の作成にあたり、保守管理の容易さや配置の見栄えを考慮すると、同種機器同士、および、配管が接続される機器同士をまとめて配置することが重要となってくる。従来法は、同種機器の横並びで形成される機器ブロックの情報を染色体にコーディングすることで、同種機器がまとまって整然と配置された機器配置案を生成することができた[2]。しかし、配管が接続される機器同士のまとまりについては考慮されていなかった。

そこで、本稿では、配管が接続される機器同士のグループ化を利用し、各グループ内の機器がそれぞれまとまって、かつ、グループ間では互いに離れて配置されるような評価指標を検討する。

2.2 進化的計算

機器配置探索には進化的計算を適用する。本手法では、パレート最適解探索法[3]を用い、機器ブロックを用いたコーディング[2]および、突然変異や交叉に加え、自動修正および特殊操作と呼ぶヒューリスティクス[2]を導入することで、機器配置案を効率的に生成できるようにする。図1にアル

ゴリズムのフローを示す。

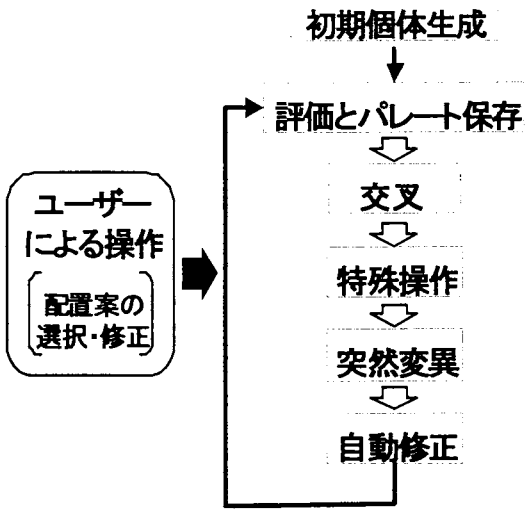


図1　探索アルゴリズムのフロー

進化的計算を行う際の評価項目として、これまでに配置干渉 A、相互干渉 B、経済性 C、保守性 D、および見栄え E を設定し、以下のように定義してきた。そして、経済性、保守性および見栄えの３つの評価項目を軸としたパレート最適解探索を行ってきた。絶対条件である配置干渉と相互干渉をどちらの評価軸にも付加し、経済性 H_1、保守性 H_2、見栄え H_3を以下のように定義した。また、得られた種々のパレート最適解の呈示順序は、(9)式を用いて、ユーザがα, β, γを入力することによって決定した。

$$A = 1 - \frac{a}{\text{全機器数}} \tag{1}$$

$$B = 1 - \frac{b}{\text{全機器数}} \tag{2}$$

$$C = 1 - \frac{c}{\sqrt{C_{\max} \times C_{\min}}} \tag{3}$$

$$D = 1 - \frac{d}{\text{全機器数}} \tag{4}$$

$$E = \frac{e}{\text{全グループ数}} \tag{5}$$

$$H_1 = A + B + \alpha C \tag{6}$$

$$H_2 = A + B + \beta D \tag{7}$$

$$H_3 = A + B + \gamma E \tag{8}$$

$$H = A + B + \alpha C + \beta D + \gamma E \tag{9}$$

ただし、

a：機器とその保守スペースが、建築スペースに納まっていない、または、壁や柱と重なりを生じている機器数

b：機器同士の保守スペースを含めた重なりを生じている機器数

c：概算配管コストの総和

d：保守通路に機器保守面が向いていない機器数

e：他の機器ブロックに従属して配置されていない機器ブロック数

$C_{\max}$：機器同士の間隔が全て最大になったと仮定したときの配管コストの総和

$C_{\min}$：機器同士の間隔が全て最小になったと仮定したときの配管コストの総和

2.3　グループ内分散とグループ間分散を用いた配置案の評価

配管が接続される機器同士をまとめて配置するために、判別分析の考えを適用する。すなわち、配管が接続されるグループ内の機器の分散を小さく、かつ、それぞれのグループ間の分散は大きくなるように機器配置を行う。ここで、グループ A, Bについて、グループ内分散 Sw、グループ間分散 Sb を以下のように定義する。

$$S_w^{(ij)} = \sum_{k=1}^{n^{(i)}} D_k^{(i)} + \sum_{l=1}^{n^{(j)}} D_l^{(j)} \tag{10}$$

$$S_b^{(ij)} = \sum_{k=1}^{n^{(i)}} D_k^{(ij)} + \sum_{l=1}^{n^{(j)}} D_l^{(ji)} \tag{11}$$

$$D_k^{(ij)} = (X_k^{(i)} - \overline{X}^{(j)})^T \Sigma_j^{-1} (X_k^{(i)} - \overline{X}^{(j)}) \tag{12}$$

$$D_k^{'(i)} = (X_k^{(i)} - \overline{X}^{(j)})^T \Sigma_j^{'-1} (X_k^{(i)} - \overline{X}^{(j)}) \tag{13}$$

$$X_k^{(i)} = \begin{bmatrix} x_k^{(i)} & y_k^{(i)} \end{bmatrix}^T \tag{14}$$

ただし、

$X_k^{(i)}$：グループiに属する機器kの座標

$\overline{X}^{(i)}$：グループiの平均

$D_k^{(ij)}$：グループjにおけるグループiに属する機器のマハラノビス距離

$D_k^{'(i)}$：グループiにおけるグループiに属する機器のマハラノビス距離

$n^{(i)}$：グループiに属する機器の個数

Σ_i：グループiの分散共分散行列

Σ_i'：相関係数の値を0としたグループiの分散共分散行列

グループ内分散は、各グループにおける、各グループに属する全機器を対象としたマハラノビス距離の総和で表される。グループ間分散は、比較対象のグループにおける、各グループに属する全機器を対象としたマハラノビス距離の総和で

表される。

グループ内分散 Sw とグループ間分散 Sb の比を最小化する指標として、(15)式を最大化することとし、経済性、保守性、および見栄えの評価項目をそれぞれ(16)式、(17)式、(18)式で再定義した。

$$V = 1 - \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=i+1}^{M} \frac{S_w^{(ij)}}{S_b^{(ij)}} \tag{15}$$

$$C' = C \times V \tag{16}$$

$$D' = D \times V \tag{17}$$

$$E' = E \times V \tag{18}$$

ただし、

M：同種機器が接続され る機器のグループ数

3. 実験

配管が接続される機器同士のグループ内分散とグループ間分散を考慮した場合の有効性を検証するため実験を行った。**図2**に従来指標、**図3**に提案指標による機器配置結果の例を示す。配管のつながる機器同士のグループを3つとした。各図の(a)に全グループの配管を、(b), (c), (d)には各グループの配管を示す。提案指標による結果と従来指標による結果ではグループ1，3の機器の配置に大きな違いが見られた。また、各グループのまとまりにおいても、提案指標による場合の方がよくまとまった結果が得られた。

4. おわりに

本研究では、対話型機器配置案作成システムの開発を行ってきた。

本稿では、接続される機器同士をグループ分けし、グループ内分散を小さく、グループ間分散を大きくする指標を導入し、その効果を実験により調べた。従来指標に比べ、グループ内の機器がまとまって、かつ、グループ間がはっきりと分けられた配置案が得られた。

参考文献

[1] ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」1996

[2] 井上、古橋、鳶、山口「対話型進化的計算を用いた空調設備機械室の機器配置および配管経路の同時探索に関する一考察」第18回ファジィシステムシンポジウム, pp.307-310, 2002

[3] 井上、古橋、中村、鳶「機械室設備の設計図・施工図作成支援システムの開発-対話型進化的計算による機器配置支援」空気調和衛生工学会論文集、No. 86、pp. 1-10, 2002

[4] 福島、井上、古橋、中村、鳶「空調設備機械室の配管経路決定支援システムに関する一考察」第17回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 691-692, 2001

連絡先：

〒514－8507

三重県津市上浜町1515

三重大学大学院工学研究科

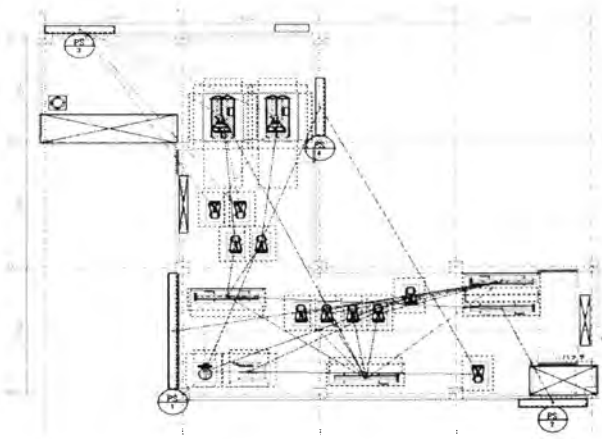
システム工学専攻パターン情報処理研究室

松生　洋久（Hirohisa Matsuike）

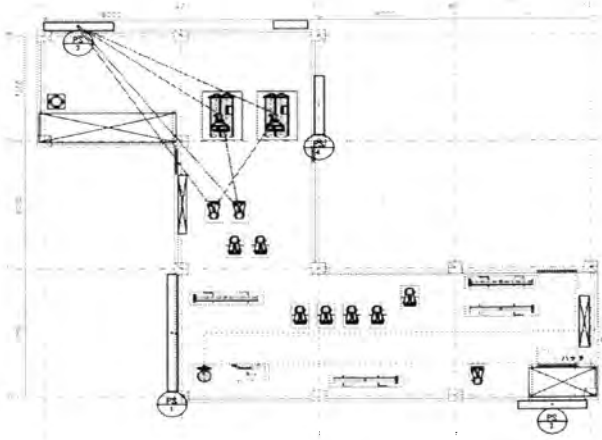
TEL. (059)231-9746

FAX. (059)231-9456

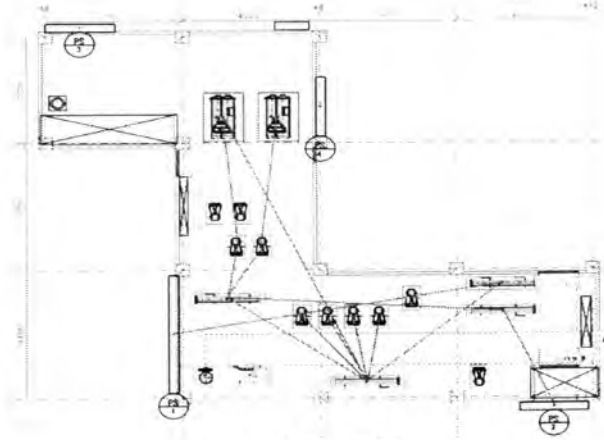
E-mail : matsuike@pa.info.mie-u.ac.jp



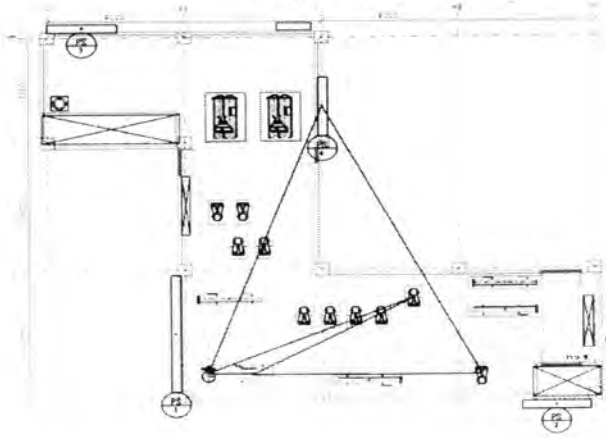
(a) 全グループ



(b) グループ1

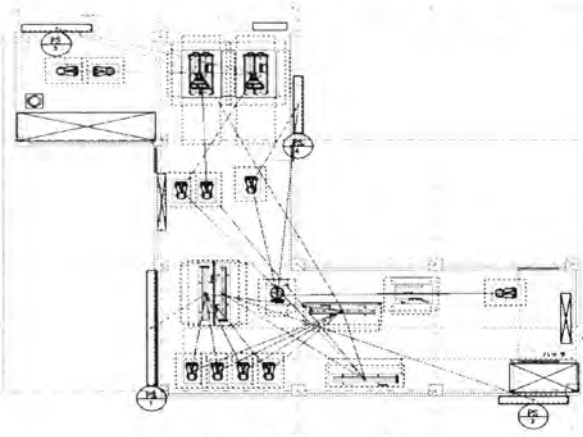


(c) グループ2

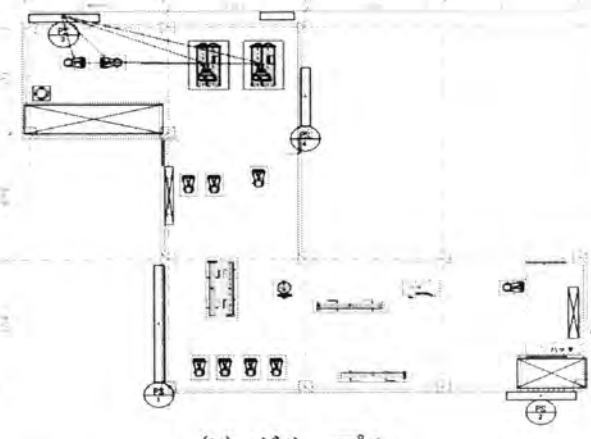


(d) グループ3

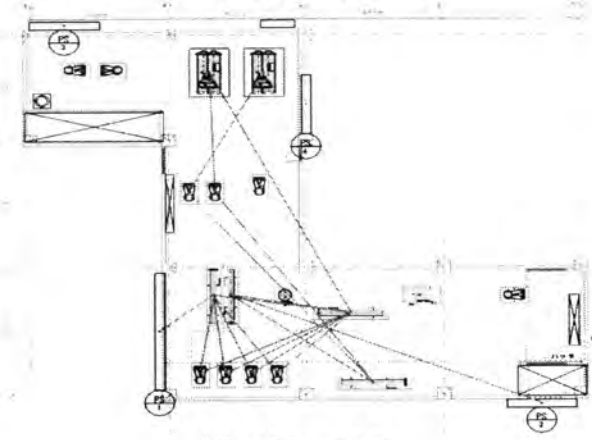
図2　従来指標による機器配置例



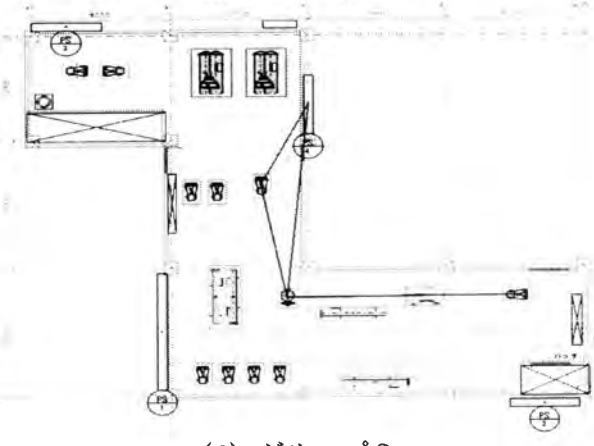
(a) 全グループ



(b) グループ1



(c) グループ2



(d) グループ3

図3　提案指標による機器配置例

パートナーロボットのための対話型動作計画と多目的行動調停

Interactive Motion Planning and Multi-Objective Behavior Coordination for Partner Robot

能島裕介 Yusuke NOJIMA
小島史男 Fumio KOJIMA
久保田直行 Naoyuki KUBOTA
神戸大学大学院 Graduate School of Kobe University
福井大学 Fukui University

Abstract - This paper is concerned with a motion planning for a partner robot. An interactive genetic algorithm plays a role in generating various trajectories for a hand-to-hand behavior satisfied with the human evaluation and some restrictions. For multiple objects, neural network modules are assigned as basic behaviors learned by teaching data from the population of GA. Furthermore, a multi-objective behavior coordination, which generate weighted actions among some basic behaviors, is applied to be suitable for facing situation such as human movement. Computer simulation shows the effectiveness of the proposed method.

1 はじめに

近年，様々なパートナーロボットやペットロボットが開発されている[1,2]．人間社会において必要とされるロボットの能力として，その使用者とのコミュニケーションを通して，使用者が好む行動を獲得することがあげられる．例えば，マニプレータを装備する介護や秘書ロボットを考えると，口元に食べ物を運ぶことや書類を手渡しするといったタスクが想定できる．これらのタスクにおいてマニプレータの先端の動き方や終端位置などは，従来の軌道生成手法を用いると，使用者に恐怖やいら立ちを与えかねない．そこで本研究では，単一の手渡し動作に関して，対話型遺伝的アルゴリズム(interactive genetic algorithm; IGA) [3]を用いた軌道生成について議論してきた[4,5]．使用者の好みを状態価値関数により近似し，使用者が好むであろう軌道をロボットが提示し，使用者がそれを評価する．これを繰り返すことで使用者が好む軌道を獲得する．しかし，これらの手法では，使用者が特定の位置に立つことが前提であり，実際の使用環境を考えた場合，新たな位置に対する学習に時間と労力を費やす．

本稿では，人間の位置を検出できるものと仮定し，生成された軌道を基本行動して獲得し，獲得された基本行動を調停することにより使用者の移動にも対応できる手法を議論する．具体的には，IGAにより生成された軌道をニューラルネットワーク(neural network; NN) [6]を用いて基本行動モジュールとして獲得して[7]，それらの出力を融合する多目的行動調停(multi-objective behavior coordination) [8]を提案する(図1)．提案手法の有効性は，計算機シミュレーションを用いて検討する．

2 多目的行動調停を用いたマニプレータ制御

2.1 手渡し動作のための対話型軌道生成

マニプレータにおけるPoint-to-Pointの軌道生成に関して盛んに研究されており，逆運動学を解く方法やGAを用いた方法など提案されている[9]．本研究では，使用者が手渡し行動(hand-to-hand behavior)の軌道生成を目的とし，IGAを適用する．解候補であるGAの個体は，時間ステップt (t=1,2,...,M)におけるマニプレータの各関節に対する角速度$v(v_1,v_2,..,v_N)$を遺伝子としてコーディングする．マニプレータの自由度をN，中間姿勢をM個とすると，1個体は$M\times N$の実数値で構成できる(図2)．この個体群に対して，遺伝的操作を加え手渡し行動を生成する．本稿では，一世代に最小適応度個体のみを淘汰する定常状態遺伝的アルゴリズム(steady-state genetic algorithm; SSGA) [10]を適用する．選択にはボルツマン選択を用い，最良個体とのエリート交叉により新しい個体を生成する．実数値によるコーディングのため，突然変異には適応型突然変異を用いる．

評価関数には，使用者の評価をモデル化するためファジィ状態価値関数を用いる．マニプレータの手先座標(x,y,z)を入力として用い，前件部を三角型ファジィメンバーシップ関数の組み合わせで構成する(図3)．そして，後件部を実数値とする簡略化ファジィ推論により状態価値S_tを見積もる．j番目のファジィルールの前件部適合度を$\mu_{j,t}$，後件部出力値をq_jとすると，状態価値は次式のように計算できる．

$$S_t = \frac{\sum_{j=1}^{J} q_j \cdot \mu_{j,t}}{\sum_{j=1}^{J} \mu_{j,t}} \tag{1}$$

また，使用者の中心座標o"とロボットの中心座標o'との中間領域$BZ(M)$に，手渡し易い目標領域があるもの仮定し，その領域に到達できる軌道を生成し易くする為のボーナスゾーンを設定する(図4)．

$$B_t = \begin{cases} 1 & if\ l(t) \le D(t) \\ \dfrac{D(t)}{l(t)} & otherwise \end{cases} \tag{2}$$

ここで，$D(t)$はボーナスゾーン$BZ(t)$の半径，$l(t)$をマニプレータの手先位置からボーナスゾーンの中心ま

での距離とする．このボーナスゾーンの中心は，目標位置とマニプレータの初期手先位置とを結ぶ直線上とし，徐々に半径を狭めるものとする．さらに不要な関節回転を削減するための項も加える．以上をまとめて，i番目の個体に対する評価値を次式の評価関数により計算する．

$$fit_i = \omega_1 \cdot \sum_{t=1}^{M} S_t + \omega_2 \cdot \sum_{t=1}^{M} \gamma^{M-t} \cdot B_t + \omega_3 \cdot \frac{1}{MN} \sum_{t=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} \frac{1}{1+|v_{t,n}|} - P \quad (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1, 0 \le \gamma \le 1) \tag{3}$$

ここで$\omega_i(i=1,2,3)$とγは，重み付け係数及び割引率とする．また，Pはペナルティ項であり，マニプレータがロボット自身に衝突することを罰する．よって，この軌道生成は最大化問題となる．

次に，IGAについて説明する．まず上述のSSGAを用いて一定世代探索を行う．その後，ボルツマン選択により，使用者に提示する軌道を選択する．使用者は，提示された軌道に対して数値で評価を行い，その評価値を用いてロボットは状態価値関数を学習する．学習には，Profit Sharing [11]を適用し，人間の評価値を[0,1.0]に正規化した値Rを用いる．

$$q_j \leftarrow q_j + \alpha^{M-t} \cdot \tau \cdot \mu_{j,t} \cdot (R - S_t) \tag{4}$$

ここで，αとτを減衰係数と学習係数とする．この状態価値関数の学習によりSSGAの評価関数は更新され，次の探索に用いられる．この過程を使用者が満足するまで繰り返すことで，使用者が好む軌道が生成されうる．

2.2 手渡し動作のための基本行動獲得

使用者にとって評価の高い軌道には，その使用者固有の何らかの共通性や特徴があり，これらを抽出しロボットの制御及び学習に用いることは，次の軌道探索において人間の評価回数を減らす有効な情報を与えうる．本稿では，NNを用いてGAにより生成された軌道から基本行動を獲得する．

まず，一定の評価が得られたGAの個体から，マニプレータの姿勢θ (θ_1,θ_2, ... ,θ_N)に対する角速度v (v_1,v_2, ... ,v_N)の組みを教師値として生成し，一定個数保持する．ここで，GAで生成される軌道から学習できる行動は，用意するNNの構造に依存するが，手渡し動作において，急激な方向転換や周期的な動きがないものとし，本稿では階層型NNを適用する．入力をN個の関節角θ，出力をN個の角速度v'として構成する．学習には慣性項付き逆誤差伝播法を用いる．教師値vとの誤差Eを，

$$E(t) = \frac{1}{2}\{v'(t) - v(t)\}^2 \tag{5}$$

と表し，NNの結合強度wを次式で更新する．

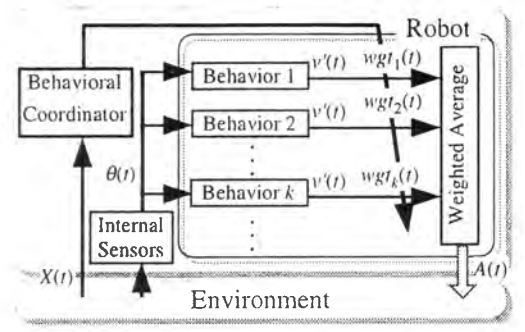


図1　多目的行動調停の概念図

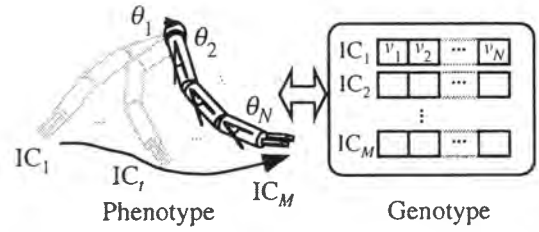


図2　GAによる軌道生成とコーディング
(IC_t ：tステップの中間姿勢)

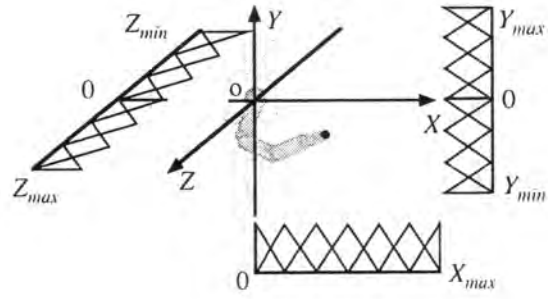


図3　ファジィ状態価値関数における状態分割

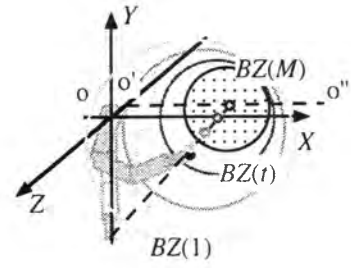


図4　ボーナスゾーンの設定

$$\Delta w^{(t+1)} = -(1-\beta)\eta \frac{\partial E(t)}{\partial w} + \beta \Delta w^{(t)} \tag{6}$$

ここで，ηとβはそれぞれ学習係数と慣性係数である．GAでの進化の過程の間，オンラインで教師値を作成し学習することにより，サンプルパスの範囲内において，汎化性のある実行可能な基本行動モジュールが獲得できると考えられる．これは，GAの適合度が同じ場合であっても，異なる経路を通る軌道が生成可能であるためである．

2.3 多目的行動調停の適用

コミュニケーションにおいて，我々人間は，互いの距離やこれまでの行為系列から次に取るべき動作

が制約されている考えられる．またその動作は，複数の目的を満たすような複合的な動作である場合が多いと考えられる．挨拶を例にとれば，遠い間合いでは手をあげ，近くに居る時は握手したり，さらに接近していれば肩を叩いたり包容したりする．つまり，その場その場に応じて行動を遷移させ対応する機能が必要になる．

多目的行動調停は，目的毎に設定された基本行動に対して，それぞれに行動重みWgtを割り当て，基本行動の出力を重み付け平均することにより，実際の動作出力を決定する手法である．これを使用者との距離に基づく手渡し動作に適用する．

図1に，多目的行動調停の概念図を示す．まず，内界センサ情報$\theta(t)$に対して，基本行動モジュールにより各関節の角速度が計算される．次に，各基本行動に対し，それぞれ行動重みを与え各出力に重み付けを行う．行動の総数をKすると，n番目(n=1,2,..,N)の関節の角速度は次式で計算される．

$$A_n(t)=\frac{\sum_{k=1}^{K} wgt_k(t)\cdot v'_{k,n}(t)}{\sum_{k=1}^{K} wgt_k(t)} \tag{7}$$

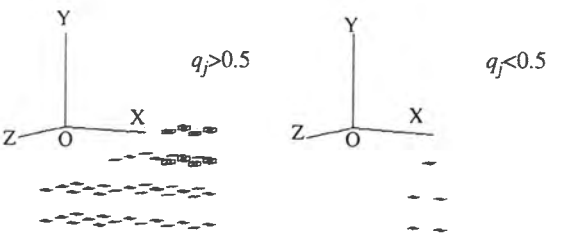
ここで，行動調停則に基づき，この行動重みを逐次的に更新することで状況の変化に対応する．行動調停則は，外界センサ情報$X(t)$を入力とし行動重みを計算するが，本稿では，人間の位置をビジョンや距離センサで，検出できるものと仮定して，使用者の移動に対して更新されるものとする．

3　計算機シミュレーション

3.1　軌道生成と基本行動獲得

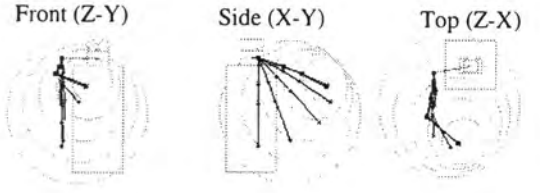
手渡し動作のタスクを与えるにあたり，4自由度のマニプレータを想定する(N=4)．手渡し動作は6つの中間姿勢で構成するものとする(M=6)．中間姿勢は，1[s]毎に角速度から計算しダイナミクスは考慮しない．ロボット前方に使用者が居るものとしボーナスゾーンを設定する．GAの個体数を100とし，100回の評価毎に，使用者に軌道を提示するものとする．ただし，初期探索として1000回まで使用者への軌道の提示は行わない．そして，提示された軌道は，1-10の整数値で評価し，最も好ましい軌道を10とし，その評価値が得られた時を軌道生成の終了とする．ファジィ状態価値関数は，手先座標3軸に対して，それぞれ7つのメンバシップ関数を用意し，後件部出力値をすべて0.5で初期化する．また，NNの学習係数と慣性係数は，0.05と0.01に設定し，評価値が0.65を上回る20個体を常に保持しオンラインで学習する．さらに，軌道生成終了後に，個体群中上位20個体を用いて1000回追加学習を行う．

図5に軌道生成後のファジィ状態価値関数の後件部出力値を示す．基本的に終端のボーナスゾーン付近と，その位置までの経路沿いの価値が高く(図5(a))，ボーナスゾーンから外れた場所や腕を回り込ませるような領域の価値が低くなっている(図5(b))．図6にGAの最良個体による軌道と，学習されたNNによる軌道を示す．NNの時間ステップ幅は，0.5[s]としている．GAによる経路と終端位置に準じた軌道がNNにより生成されていることが確認できる．またGAの適応度の変化(図7)とNNの学習誤差の変化(図8)からも基本行動として学習できていることが解る．ここで，図8における2400回あたりの学

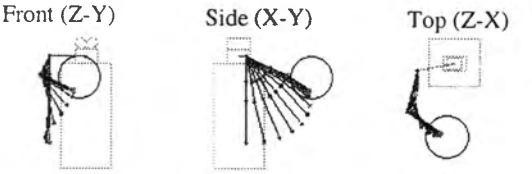


(a) 価値の高い領域　　(b) 価値の低い領域

図5　ファジィ状態価値関数の後件部出力値



(a) GAにより生成された軌道



(b) NNによる基本行動獲得後の軌道

図6　目標位置Bに対するシミュレーション結果

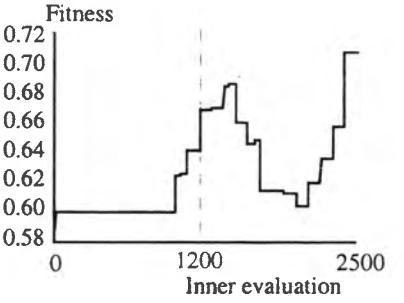


図7　GAの適応度の変化

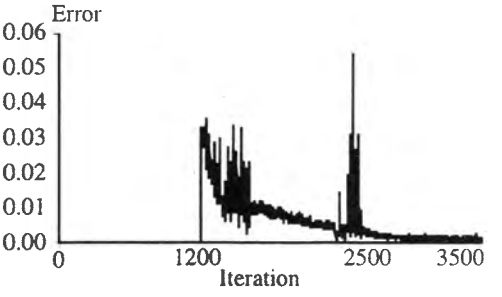


図8　NNの学習誤差の変化

習誤差の急増は，より良い軌道が評価されたために生じていると考えられる(図7).

3.2 使用者との距離に基づく多目的行動調停

行動調停を行うにあたり，手渡し行動とは異なる基本行動を獲得する．最も基本的な行動として，待機行動(home positioning behavior)が考えられ，腕を下ろした状態にすることと定義する．この行動の獲得は，手渡し行動の獲得時に同時に獲得できる．終端姿勢に関わらず，生成されたGA個体を用いて，終端位置から初期位置に戻るように教師値を生成し，オンラインで基本行動NNを学習する．

これら2つの基本行動を用いて，近付いて来た使用者にモノを手渡しするタスクを想定する．このタスクにおいて，外界センサ情報により，人間の位置に基づき行動重みを図9のように変化させる．この変化は，3.1で想定した人間の位置に近付く程，手渡し行動の重みが増加することを意味する．この行動重みの変化に基づいて調停した結果を図10に示す．待機行動から手渡し行動，手渡し行動から待機行動へと動作が融合されていることが確認できる．これにより，ある距離に近付くことで，使用者が好む軌道で手渡しすることができると考えられる．

4 まとめ

マニプレータの手渡し動作に関して，GAとNNを用いた基本行動のモジュール化および，多目的行動調停の適用を提案した．GAにより生成された軌道をNNを用いて基本行動として学習できることを計算機シミュレーションにより示した．また，使用者との距離に基づき行動重みを変化させ動作を生成できることを示した．今後の課題として，実機を用いた実験と，基本行動と行動調停則の学習に関する議論があげられる．

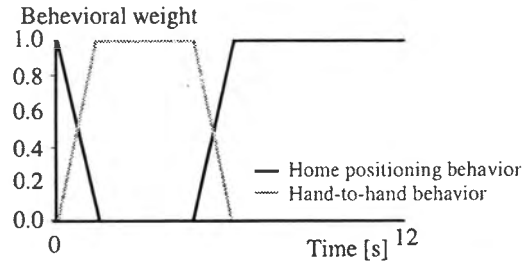


図9 行動重みの変化

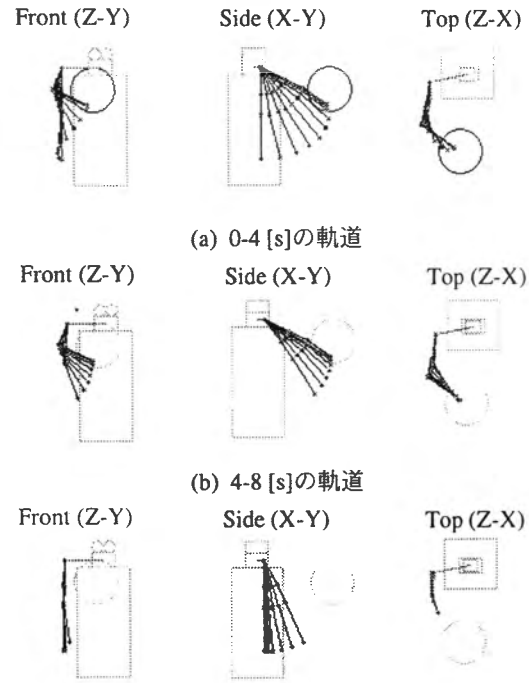


図10 行動調停を用いた軌道

参考文献

[1] O.Khatib, K.Yokoi, O.Brock: K-S.Chang, and A.Casal, Robots in Human Environments, In Archives of Control Sciences, Special Issue on Granular Computing. Vol.11 (XLVII), 2001, No. 3-4, pp.123-128 (2002)

[2] N.Kubota, D.Hisajima, F.Kojima, and T.Fukuda: Fuzzy and Neural Computing for Communication of a Partner Robot, Journal of Multi-Valued Logic and Soft Computing, Vol.9, pp.221-239 (2003)

[3] H.Takagi: Interactive Evolutionary Computation : Fusion of the Capacities of EC Optimization and Human Evaluation, Proceedings of the IEEE, Vol.89, No.9, pp.1275-1296 (2001)

[4] 久保田，渡邊，小島：人間共存型ロボットの軌道生成のための対話型遺伝的アルゴリズム，日本機械学会論文集C編，66巻, 647号, pp.2274-2279 (2000)

[5] N.Kubota, Indra A.S., F.Kojima: Interactive Genetic Algorithm for Trajectory Generation of A Robot Manipulator, Proc. of the 4th Asia-Pacific Conference on Simulated Evolution And Learning, pp.146-150 (2002)

[6] 馬場，小島，小澤：ニューラルネットの基礎と応用，共立出版，(1994)

[7] N.Kubota, T.Arakawa, and T.Fukuda: Trajectory Planning and Learning of A Redundant Manipulator with Structured Intelligence, Journal of The Brazilian Computer Society, Vol.4, No.3, pp.14-26, (1998)

[8] 能島，小島，久保田：多目的行動調停に基づく移動ロボットの行動獲得，機械学会論文集C編，68巻671号，pp.2067-2073, (2002)

[9] Y.Davidor: A genetic Algorithm Applied to Robot Trajectory Generation. In Handbook of Genetic Algorithms, Van Nostrand Reinhold, pp.144-165 (1991)

[10] G.Syswerda: A Study of Reproduction in Generational and Steady-State Genetic Algorithms, In Foundations of Genetic Algorithms, San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, Inc. (1991)

[11] J.Grefenstette: Credit Assignment in Rule Discovery Systems Based on Genetic Algorithms, *Machine Learning*, Vol.3, pp.225-245 (1988)

連絡先：

〒657-8501神戸市灘区六甲台町1-1

神戸大学大学院自然科学研究科システム機能科学専攻

能島　裕介

電話&FAX: 078-803-6489

E-mail: nojima@buna.fan.scitec.kobe-u.ac.jp

遺伝的アルゴリズムに基づくサンプリングとガウス関数の和を用いた問題空間の近似

Sampling based on Genetic Algorithm and Problem Space Approximation using Gaussian Summation

伴野佳史 † 大崎美穂 ††
Yoshifumi Banno Miho Ohsaki
吉川大弘 † 篠木剛 † 鶴岡信治 †
Tomohiro Yoshikawa Tsuyoshi Shinogi Shinji Tsuruoka

† 三重大学工学部 Faculty of Engineering, Mie University
†† 静岡大学情報学部 Faculty of Information, Shizuoka University

Abstract: To model a numerical problem space under the limitation of available data, we need to extract sparse but key points from the space and to efficiently approximate the space with them. This study proposes a sampling method based on the search process of genetic algorithm and a space modeling method based on least-squares approximation using the summation of Gaussian functions. We conducted simulations to evaluate them for several kinds of problem spaces: DeJong's, Schaffer's, and our original one. We then compared the performance between our sampling method and sampling at regular intervals and that between our modeling method and modeling using a polynomial. The results showed that the error between a problem space and its model was the smallest for the combination of our sampling and modeling methods for many problem spaces if the number of samples was considerably small.

1 はじめに

現在，人間と共生するロボットの行動獲得 [5, 6]，ユーザの操作履歴を使った WEB パーソナライゼーション [7]，個人の好みや生活環境を反映したデザイン支援・身体障害補償 [13] 等，人間とコンピュータのインタラクションに基づく学習システムが注目されている．このようなシステムでは，人間が挙動を確認し，教示や評価の情報をフィードバックする必要がある．しかし，センサによるモニタリングとは異なり，人間の意識的な教示・評価には時間がかかり負担も大きい．その結果，問題空間に比べ，学習に使えるデータが極端に少なく，適切な学習が行えないという問題点がある．

この問題点を解決する 1 つのアプローチとして，少ないデータで問題空間をモデル化し，これを使って評価情報を補う方法がある．評価情報の補償としては，モデルが代行評価した結果を実際のデータに加える [3, 10, 14]，モデルの可視化や勾配情報の抽出によって，問題空間に関する近似的な追加情報を得る [4, 8] 等の研究がある．しかし，応用先に特化した研究は多いが，様々な形状の問題空間について体系的にモデル精度を検証したものは少ない．また，空間形状の把握に重要な点を，能動的に取り出すことに着目した研究も少ない [4, 8]．

そこで本研究では，上述のように，データが少ない問題設定において，効率的なサンプリングによる適切な問題空間のモデル化，および，これらがどのような問題空間に適するかについての検証を目的とする．ただし，これらは問題空間の性質やモデルの用途に依存するため，本研究では，問題空間とモデルの制約条件を以下のように規定する．

問題空間の条件：(1) 数値軸で構成されるほぼ静的な空間である．(2) 問題空間の軸についての情報は事前にあるが，問題空間の形状についての情報は事前にない．(3) サンプリング回数はコストのため厳しく制限されるが，サンプリング箇所に制限はない，すなわち，問題空間上の任意の点についてサンプリング可能である．

モデルの条件：(1) モデルの用途は，問題空間の入出力を模擬し，評価情報不足を補うことである．(2) モデル化とモデルによる評価情報の補償は，インタラクション過程においてオンラインで行なう．(3) 目的を達成できるならば，必ずしも，本モデルが問題空間の真のモデルである必要はなく，モデルに厳しい精度を求める必要もない．

上記の制約条件のもと，我々は，遺伝的アルゴリズム (GA) の探索過程を利用したサンプリング (GA サンプリング) を検証する．この制約条件を満たす応用問題としては，本章の最初で述べた例 [7, 13] があり，将来的には，本モデルがこれらのデータ不足補償に役立つことを目指す．

本稿の第 2 章では，提案する GA サンプリングを説明する．第 3 章では，複数の問題空間に対するシミュレーションによって，GA サンプリングの性能を調べる．また，問題空間をモデル化する方法として，応答曲面法 [9] を採用し，仮定関数にはガウス関数の和及び線形多項式を用いている．第 4 章では，本稿をまとめ今後の展開を述べる．

2 提案手法 (GA サンプリング)

最も単純なサンプリングとしては，問題空間を等間隔でメッシュ状に分割し，分割の交点をデータ点とする方法 (本稿ではメッシュサンプリングと呼ぶ) が考えられる．しかしこの方法では，大きな峰の頂点や端点といった，問題空間の大局的な凹凸形状を表すデータ点を取りこぼす恐れがある (図 1 右参照)．

これに対し効率的なサンプリングとしては，実験

計画法 [2] や情報利得 [12] を利用する方法が挙げられる．問題空間の出力が確率的であり，問題空間上の同じ箇所の繰り返しサンプリングを減らすには，これらの方法は有効である．しかし本研究は，問題空間上の異なる箇所でさえ，十分にサンプリングできない問題を対象にしており，これらの方法は有効ではないと考えられる．

そこで我々は，GA の探索過程をサンプリングに利用することを提案する (図 1 左参照)．通常はむしろ欠点となり得るが，GA の特徴として，初期段階における急速な収束，いわゆる‘初期収束‘が挙げられる．特に，対話型進化計算の研究では，人間が評価できる程度の少ないデータでも，個体が最適解近傍に集まることが示されている [13]．よって，GA を用いることにより，最適解近傍点，つまり，問題空間の大きな峰の頂点を素早く得られることが期待される．GA のもう 1 つの特徴として，確率的な多点探索であることが挙げられる．初期世代では個体がランダムに配置され，探索が進んでも，交叉や突然変異によって個体の多様性 (問題空間上での点の広がり) が，ある程度保たれる．したがって，問題空間の大きな峰の端点や，局所的な峰の頂点を得ることも可能と考えられる．

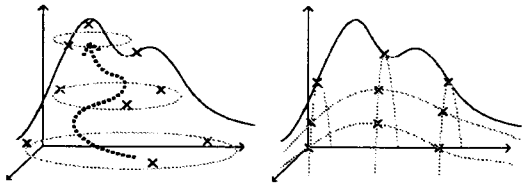


図 1: GA サンプリング (左) とメッシュサンプリング (右)

ただし，GA の探索性能，言い換えると本研究でのサンプリング性能は，演算の方法と条件に大きく依存する．そこで我々は，人間が評価を行う対話型進化計算の様々な応用研究 [13] を参照し，少ないデータに適した方法や条件を選定することとする．

3 評価実験

提案手法の絶対的な性能は，具体的な問題に適用しなければ分からない．将来的には，このような検証が必要であるが，本研究の第一歩として，できる限り汎用的な手法を提案・検証し，提案手法がどのような空間形状に適するか，データ数に対する近似精度はどの程度かを体系的に調べることを目的とする．そこで本稿では，人工的な問題空間でシミュレーションを行い，他手法との相対的な性能評価を行う．

3.1 比較対象

本稿では，サンプリングについては，GA サンプリングをメッシュサンプリングと，モデル化については，ガウス関数和近似を多項式を用いた応答曲面法と比較する．なお，多項式に最小二乗法を適用する場合，誤差の問題から次数は 5 次が限界であるため．本研究では 5 次以下の関数を採用する．

3.2 実験条件

実験は，次の 3 段階で行う．**(1)** サンプリング手法でデータを抽出し，モデル化手法で問題空間のモデルを得る．**(2)** 問題空間上の全点に対して，モデルと問題空間の二乗平均誤差を得る．**(3)** サンプリング手法とモデル化手法の全組合せに対して **(1)(2)** を行い，誤差を比較する．この一連の作業を複数の問題空間について行い，どのような問題空間に GA サンプリングが適するかを調べる．

サンプリング手法とモデル化手法の組合せは，メッシュ-多項式，メッシュ- ガウス関数和，GA-多項式，GA-ガウス関数和の 4 種類である．問題空間には，GA の一般的なベンチマークである，DeJong の標準関数 F_1 – F_4 [1] と Schaffer の標準関数 F_1 [11]，及び 3 つのガウス関数の和で作成したオリジナルの問題空間を用いる．ただし，問題空間が広すぎると，(2) モデルと問題空間の誤差計算に莫大な時間がかかる．そこで，DeJong の標準関数 F_3, F_4 については，誤差計算が実時間に収まるように変形を加えた．表 1 に，用いた問題空間の式を，図 2 に，それらの形状の例をそれぞれ示す．

2 章で述べたように，GA サンプリングでは，問題空間に合わせて GA 演算条件を決める必要がある．具体的な応用問題で問題空間をモデル化するならば，応用問題の領域知識によって，適切な GA 演算条件をある程度決定できる．しかし，この評価実験では，人工的な問題空間を用いるため，我々は領域知識を持たない．そこで，事前に GA 探索を数回行い，その結果を擬似的な領域知識と見なして，各問題空間に適した GA 演算条件を得ることとする．

ここで，シミュレーションにおける全サンプルデータ数の決定方法を検討する．相対的な指標，つまり，問題空間サイズに対するサンプルデータサイズの比率を使うことは妥当であろう．しかし，対話的な学習システムでは，人間が教示や評価を繰り返すことに限界があり，サンプルデータ数は絶対的に決まる．そこで本稿では，サンプルデータ数の絶対的なレンジ内のいくつかの値を採用し [13]，サンプルデータ数の絶対的，及び相対的な値に対するモデル性能の傾向を観察する．

3.3 結果と考察

実験結果を表 2 に示す．DeJong F3，F4 の結果は，DeJong F1 の結果と同様の傾向を示したため，ここでは省略した．また，我々が作成したオリジナルの問題空間についても，Schaffer F1 の結果と同様の傾向を示したため省略した．なお，多項式は原理

表 1: 実験に用いた問題空間

関数名	定義	入力レンジ & ステップ	広さ	出力レンジ
DeJong F_1	$-\sum_{i=1}^{3} x_i^2$	$-5.11 \leq x_i \leq 5.12$ $\Delta x_i = 0.01$	1.0×10^9	$-78.64 \leq y \leq 0$
DeJong F_2	$-\{100(x_1^2 - x_2)^2 + (1 - x_1)^2\}$	$-2.047 \leq x_i \leq 2.048$ $\Delta x_i = 0.001$	1.7×10^6	$-3899 \leq y \leq 0$
DeJong F_3	$-\sum_{i=1}^{5} \lfloor x_i \rfloor$	$-5.11 \leq x_i \leq 5.12$ $\Delta x_i = 0.01$	1.0×10^{15}	$-25 \leq y \leq 30$
DeJong F_4	$-\{\sum_{i=1}^{3} i x_i^4$ $+\frac{2}{151} \times gauss(0,1)\}$	$-1.27 \leq x_i \leq 1.28$ $\Delta x_i = 0.01$	1.7×10^7	$-16.11 \leq y \leq 0.01$
Schaffer F_1	$0.5 + \frac{(\sin\sqrt{\sum_{i=1}^{2} x_i^2})^2 - 0.5}{1.0 + 0.0001(\sum_{i=1}^{2} x_i^2)^2}$	$-81.91 \leq x_i \leq 81.92$ $\Delta x_i = 0.01$	2.7×10^8	$0 \leq y \leq 1$
Original	$\sum_{i=1}^{3} h_i \exp\left\{-\frac{{}^t(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu_i})\boldsymbol{A_i}^{-1}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu_i})}{2}\right\}$	$-8.191 \leq x_i \leq 8.192$ $\Delta x_i = 0.001$	2.7×10^8	$0 \leq y \leq 88.92$

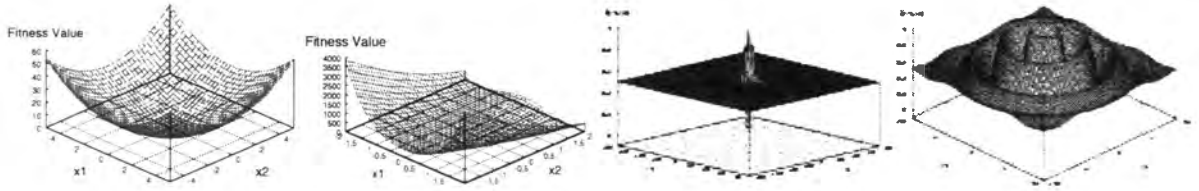


図 2: 問題空間の例: 左から DeJong's F_1, DeJong's F_2, Schaffer's F_1, 中央部分を拡大した Schaffer's F_1.

的に，Schaffer F1 のような問題空間の形状をモデル化できないことが明らかなため，この条件では実験を行わなかった．

表中の値は，モデルと問題空間の二乗平均誤差を，表 1 に示す問題空間の出力レンジに対する比 (単位は%) で表したものである．ここでは，サンプリング方法とモデル化方法の各組合せに対して，二乗平均誤差比率の差に片側 t 検定を施し，有意差を調べた．

表 2 に示すように，全条件において，GA サンプリングの方がメッシュサンプリングよりも近似精度が有意に高い，もしくは差がなかった．詳細を調べると，データ数がより少ない条件で，GA サンプリングの近似精度はメッシュサンプリングの近似精度より有意に高く，その差が大きかった．

2 章で推測した通り，メッシュサンプリングは，データ数が非常に少ない場合において，等分割線の交点が大局解周辺を捕らえられていない (図 1 右参照)．一方，GA サンプリングは，非常に少ないデータ数でも，素早い収束と多点探索によって，モデル化に重要な点を抽出できたと言える．以上より，データ数が極端に制限される条件下で，GA サンプリングの有効性が確認された．

今回のシミュレーションでは，データ数が増えるとともに，GA サンプリングとメッシュサンプリングの差が見られなくなった．このことから，さらにデータ数が増えると，図 3 に示すように，これらの性能が逆転すると推測される．なぜなら，データ数の増加に伴い，メッシュサンプリングでは，問題空間を細かく取り残しなくサンプリングできるようになるのに対し，GA サンプリングでは，個体が大局解周辺に集中するからである．

どの程度のデータ数で逆転が生じるかは，問題空間のサイズだけでなく，その形状の複雑さに依存すると考えられる．しかし，少なくとも，問題空間サイズに対するデータサイズの比率を，逆転現象のおおまかな指標と見なすことは可能である．今後，この指標と GA サンプリングの性能の関係を調べ，データ数と問題空間のどのような条件に対して，GA サンプリングが有効かを明確にしていきたい．

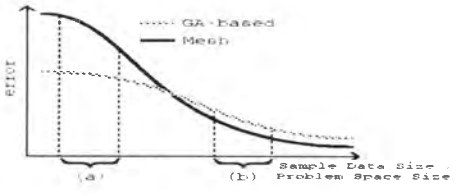


図 3: GA サンプリングとメッシュサンプリングの性能の関係

4 まとめと今後の課題

本研究では，限られたデータ数で問題空間をモデル化する問題を対象とし，GA に基づくサンプリングを提案，検証した．メッシュ状の等間隔サンプリングと比較し，様々な問題空間でのシミュレーションを通して，提案手法の性能評価を行った．その結果，問題空間に比べてデータ数が非常に少ない条件

表 2: DeJong's F_1, DeJong's F_2, Schaffer's F_1 における実験結果: 判定には片側 t 検定を用いた. **記号 は, 危険率 1%で GA サンプリングの近似精度の方が高い. -記号 は, GA, メッシュ両サンプリングに差はない.

DeJong's F_1

仮定関数	線形多項式			1 個のガウス関数			3 個のガウス関数和			5 個のガウス関数和		
データ数	サンプリング手法		判定	サンプリング手法		判定	サンプリング手法		判定	サンプリング手法		判定
	メッシュ	GA		メッシュ	GA		メッシュ	GA		メッシュ	GA	
64	7.50	0.00	**	6.54	2.85	**	15.87	4.74	**	17.33	3.99	**
125	0.00	0.00	-	5.27	2.77	-	3.72	3.17	-	15.20	2.55	**
216	0.00	0.00	-	4.60	2.77	-	2.62	2.65	-	3.86	2.25	**

DeJong's F_2

仮定関数	線形多項式			1 個のガウス関数			3 個のガウス関数和			5 個のガウス関数和		
データ数	サンプリング手法		判定	サンプリング手法		判定	サンプリング手法		判定	サンプリング手法		判定
	メッシュ	GA		メッシュ	GA		メッシュ	GA		メッシュ	GA	
64	6.14	7.10	-	9.66	8.36	-	4.28	4.27	-	9.82	3.90	-
121	5.96	6.28	-	9.08	8.01	-	3.81	3.86	-	3.55	2.80	-
196	5.88	6.35	-	8.80	7.91	-	3.60	3.62	-	1.74	2.63	-

Schaffer's F_1

仮定関数	1 個のガウス関数			3 個のガウス関数和			5 個のガウス関数和		
データ数	サンプリング		判定	サンプリング		判定	サンプリング		判定
	メッシュ	GA		メッシュ	GA		メッシュ	GA	
64	2.45	2.83	-	0.79	1.84	-	1.50	3.14	-
121	2.29	2.76	-	1.14	1.42	-	2.13	1.89	-
196	2.32	3.08	-	0.71	1.19	-	0.68	1.09	-

において, 提案手法は比較対象よりも有意に性能が高かった.

今後は, より複雑な問題空間に対して評価実験を行い, 問題空間の形状とモデル化の性能との関係を明確したい. また, 現在, 勾配情報を考慮した GA サンプリング, 可視化したモデルを使ったデータ不足の補償を考えており, これらの実現を試みたい.

参考文献

[1] K. A. DeJong. *An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems*. PhD thesis, Department of Computer and Communication Sciences, University of Michigan, 1975.

[2] R. A. Fisher. *The Design of Experiments (8 ed.)*. Oliver and Boyd, New York, USA, 1966.

[3] K. Ohnishi H. Takagi, T. Ingu. Accelerating a ga convergence by fitting a single-peak funct ion. *Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent In formatics*, 15(2):219–229, Apr. 2003.

[4] N. Hayashida and H. Takagi. Acceleration of ec convergence with landscape visualization and human intervention. *Applied Soft Computing*, 1(4F):245–256. 2002.

[5] F. Iida, H. Ayai, and F. Hara. Behavior learning of face robot using human natural instruction. In *Proc. of IEEE Int'l Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN'01)*, pages 171–176. Bordeaux/Paris, France, Sept. 2001.

[6] D. Katagami and S. Yamada. Interactive evolutionary robotics from different viewpoints of observation. In *Proc. of IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS-2002)*. pages 1108–1113, Switzerland, Oct. 2002.

[7] A. Kobsa, J. Koenemann, and W. Pohl. Personalizaed hypermedia presenation techniques for improving online customer relationships. *The Knowledge Engineering Review*, 16(2):111–155, 2001.

[8] J. H. Lee and S. B. Cho. Analysis of direct manipulation in interactive evolutionary computation on fitness landscape. In *Proc. of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'02)*, pages 460–465, Honolulu, Hawaii, USA, May 2002.

[9] R. H. Myers and D. C. Montgomery. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments (2nd ed.)*. Wiley, New York, USA, 2002.

[10] M. Ohsaki and H. Takagi. Improvement of presenting interface by predicting the evaluation order to reduce the burden of human interactive ec operators. In *Proc. of IEEE Int'l Conf. on System, Man, and Cybernetics (SMC'98)*, pages 1284–1289, San Diego, California, USA, Oct. 1998.

[11] J. D. Schaffer, R. A. Caruana, and L. J. R. Das. A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization. In *Proc. of Int'l Conf. on Genetic Algorithms (ICGA'89)*, pages 51–59, Fairfax, Virginia, USA, June 1989.

[12] C. Shannon. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, pages 379–423 and 623–656, 1948.

[13] H. Takagi. Interactive evolutionary computation: Fusion of the capacities of ec optimization and human evaluation. *Proc. of IEEE*, 89(9):1275–1296, 2001.

[14] M. Yamamoto, T. Hashiyama, and S. Okuma. Reducing computational time on using fitness estimationevolution under the real environment. In *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Industrial Electornics, Control, and Instrumentation (IECON'00)*, pages SS47–ECC–3. Nagoya, Japan, Oct. 2000.

GAを用いた看護師勤務表自動配置における制約条件の取り入れ方と探索効率への影響

The Effects of the Constraints in Nurse Scheduling Problem on the Search Efficiency of Genetic Algorithm

川中 普晴　吉川 大弘　篠木 剛　鶴岡 信治
Hiroharu Kawanaka　Tomohiro Yoshikawa　Tsuyoshi Shinogi　Shinji Tsuruoka

三重大学 工学部 電気電子工学科
Department of Electrical and Electronic Engineering,
Faculty of Engineering, Mie University

Abstract: The Nurse Scheduling problem (NSP) is that of allocating shifts for nurses under various constraints. Generally, the extensive number of constraints requires a great deal of knowledge and experience to make a nurse's scheduling table. This task requires a lot of time and effort and there is demand for an automatic scheduling. This study focuses the relationship between constraints and search efficiency, and discusses the affect for search efficiency with the way to take the constraints into GA. This paper especially focuses the constraints that must be satisfied absolutely in the coding and genetic operations, and shows that this method can reduce the search area of GA drastically using numerical approximation method. Scheduling tables are acquired by the conventional and proposed method, and the result shows that effective search can be done and effective nurse scheduling tables can be generated by the proposed method.

1 はじめに

看護師スケジューリング問題 (Nurse Scheduling Problem : NSP) は，通常，1ヶ月間の看護師の勤務表を，様々な制約条件のもとで作成する問題である [1]．しかしながら，NSP は一般的に多くの制約条件を持つため，それらすべての制約条件を満たした勤務表を作成するには，作成者の豊富な経験と知識が必要となる．そのため現在，病院における勤務表作成は，師長や専門家などによって手作業で行われている．しかし，手作業による勤務表の作成は，作成者に多大な負荷を課すこととなり，看護師勤務表の自動作成システムの開発が熱望されている [2, 3]．

一方，NSP の解探索手法に対する研究として，遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA)[4] を用いた研究が報告されている [5, 6]．これら従来法では，制約条件が多数存在する NSP に対して，制約条件を満たしていない個数をそのまま評価関数とすることにより，結果としてより多くの制約条件を満たす解を獲得するという方法が用いられている [5, 6, 7]．これらは，コーディングや遺伝的演算を工夫する必要がなく，インプリメンテーションが容易であるため，設計者にとっては自由度が高く，多種の問題に対して容易に適用できる．しかしながら，評価関数に取り入れる制約条件の数が増加すると，染色体の進化効率は低下するという問題がある．また，多くの制約条件を持つ問題においては，必ず満たさなければならない“強い制約条件”が存在するものも多い．しかし GA は本来，トライアルアンドエラーによる発見的手法であるため，初期世代や交叉・突然変異等の遺伝的演算により生成される染色体のほとんどの場合において，これら強い制約条件をすべて満たした解を得ることは困難と考えれる．NSP の場合においても，用いられる制約条件には，労働基準法等により定められた強い制約条件も多く存在し，これらの制約条件は勤務表作成時に必ず満たさなければならない．そのため，従来の GA により得られた勤務表では，結果に対して手作業等の方法により修正を加えなければならず，勤務表の自動作成システムの構築は困難であると考えられる．

ここでは，GA を用いた看護師勤務表自動作成システムにおいて，制約条件と探索効率の関係に焦点を絞り，これら制約条件の GA への取り入れ方による探索効率の影響について検討する．本稿では，実際の病院における勤務体制や制約条件を使用し，NSP に用いられる制約条件を“強い制約条件”と“弱い制約条件”の 2 種類に分類する．そして，これら強い制約条件を染色体のコーディングおよび遺伝的演算に取り入れる手法 [8] を用いることにより，GA における探索範囲が大幅に縮小されることを，近似を用いた計算により数値的に示す．

また，制約条件の評価関数への取り入れ方と進化効率との関係について考察する．従来法と本手法を用いて勤務表作成を行い，絶対条件を取り入れることで，GA による解の探索が効率的に行われ，有効な勤務表が自動で作成されることを示す．

2 勤務体制及び制約条件

看護師の勤務表は，毎月師長または専門家によって案が作成され，係長と主任によりチェックが行われた後，病棟の看護師全員に公開される．公開された勤務表は希望修正が加えられた後，正式に決定される．看護師は，管理職である師長，係長，主任の他に，ベテラン (A グループ)，中堅 (B グループ)，新人 (C グループ) の 3 つのグループに分けられている．表 1 に，実際の病院における 1 日の勤務体制と，それぞれの勤務時間を示す．ここで日勤の人数は，平日 5 人以上，休日 4 人以上である．勤務表を作成するためには，1 日の勤務人数と下記の複数の強い制約条件を全て満たさなければならない．本稿では，これらの制約条件を“絶対条件”と呼ぶ．

また NSP には，絶対条件ではないものの，勤務表作成時においてなるべく多く満たしている方が望ましい，“弱い制約条件”も存在する．本稿では，これらの条件を“希望条件”と呼ぶ．希望条件は，各勤務の平等性や各看護師の希望休日，夜勤の際の看護師同士の相性といったものであり，いわば快適に働くための条件と考えることができる．

表 1: 勤務体制

勤務の種類		人数	勤務時間帯
日勤リーダ	(R)	1	8:30〜17:00
日勤	(日)	5(4) 以上	8:30〜17:00
早出	(早)	1	8:00〜14:30
遅出	(遅)	1	13:00〜21:00
準夜勤	(準)	2	17:00〜24:00
深夜勤	(深)	2	24:00〜8:00

絶対条件

条件 1　リーダは A グループから選ぶ
条件 2　夜勤 (準夜勤・深夜勤) においては，少なくとも 1 人は A または B グループから選び，同じグループから 2 人は選ばない
条件 3　夜勤は 1ヵ月に 8 回以下でなくてはならない
条件 4　週 1 回は休みを入れる
条件 5　1ヵ月に休みをその月の土，日，祝日の数だけ入れなければならない
条件 6　深夜勤の次の日は，日勤，早出，遅出を入れてはならない

希望条件

条件 1　各看護師の勤務が平等に配置されているか
条件 2　希望休日に休みが配置されているか
条件 3　相性の悪い看護師と夜勤が重ならないか
条件 4　係長，主任について，平日に日勤，休日に休みが配置されているか
条件 5　日勤リーダがある程度連続して配置されているか
条件 6　早出勤務が C グループに配置されているか

3　絶対条件を取り入れたコーディング法と遺伝的演算 [8]

3.1　絶対条件を取り入れたコーディング法

本稿では，制約条件を染色体のコーディングおよび遺伝的演算に取り入れる方法として，筆者らが提案してきた手法を用いる [8]．図 1 に，本手法における処理の流れを示す．コーディングの詳細については，紙面の都合上ここでは割愛するが，2. で述べたすべての絶対条件をコーディングに取り入れ，それらすべてを満たした染色体の生成を行う．看護師の人数は，2. で用いた病院に基づき，A グループが 5 人，B グループが 5 人，C グループが 6 人と，師長以外の管理職である係長および主任を合わせた計 18 人とする．また，係長，主任は新人看護師や学生の指導のため，勤務は臨時の場合を除き，優先的に平日を日勤，休日を休みとする．

文献 [8] の方法により，生成された染色体の例を図 2 に示す．作成された染色体は，絶対条件 1〜6 をすべて満たしている．同様の方法で生成された複数の染色体を初期集団として GA を行うことにより，GA における解の探索が，効率良く行われると考えられる．

3.2　遺伝的演算

GA では，交叉や突然変異等の遺伝的演算において，親個体の特徴を維持しながらも，新しい特徴を持った個体を生成することが，染色体が効率よく進化するための重要な要素の 1 つとなる。本手法では，各染色体は，コーディングにおいてそれぞれの絶対条件を満たすように勤務が配置されているため，通常の遺伝的演算により生成された染色体 (勤務表) のほとんどは，絶対条件を満たさなくなると考えられる。しかしながら，与えられた絶対条件は，二次元的な制約を持つため，絶対条件を満たしたままでの遺伝的演算を行うことは困難である。そこで本稿では，通常の遺伝的演算を行った後，親個体から受け継がれた形質を極力維持したまま，再度勤務の入

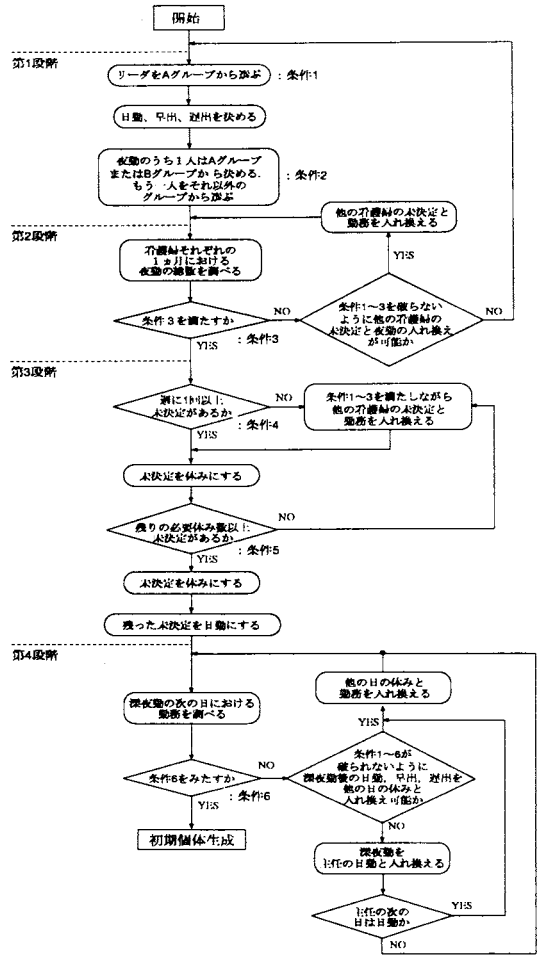


図 1: コーディングの流れ

れ替え等を行うことにより，遺伝的演算後も，絶対条件を満たす染色体を生成する方法を用いる。具体的には，条件 1，2 を満たしたままで遺伝的演算を行い，その後，生成された染色体中の全ての休みと，係長・主任の日勤と休み，および 1 日の必要人数より多い日勤を未決定に戻す。これにより，生成された染色体は図 1 に示す第 1 段階を終了したときと同じ状態になっている．そのため再度，第 2 段階から第 4 段階の勤務入れ替え処理を行うことにより，遺伝的演算で生成された染色体の形質をある程度残したまま，絶対条件を満たす染色体が生成される．

4　探索範囲縮小の効果

本コーディング法を用いることにより，GA における探索範囲を縮小させる効果があると考えられる．そこでここでは，3. で述べた方法により，探索範囲をどの程度縮小することができるかを検討するため，勤務配置の組合わせ数 (解候補数) の計算を行った．本来，この計算は 1ヵ月の勤務表を対象に行うべきであるが，制約条件の複雑さから計算が不可能である部分が存在するため，2. で述べた絶対条件を 1 週間の単位に縮小し，1 週間分の配置に対する近似的な計算を行った．また，第 1・2 段階においては，論理的に総組合せ数の計算を行ったが，第 3，第 4 段階の計算については確率論的な手法を用いた．具体的には，十分な試行回数のもとで直前の段階を満たしながら勤務を配置し，その中で次の段階を満たし

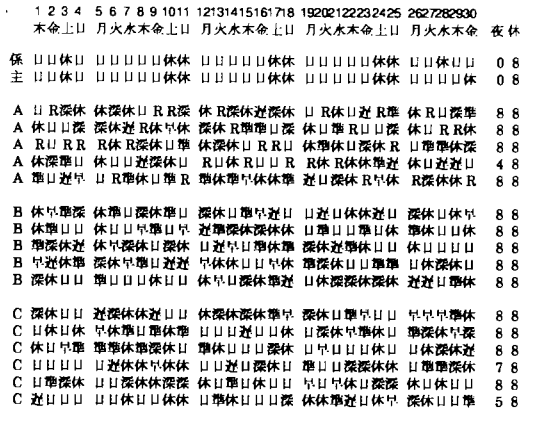


図 2: 生成された染色体の例

ている配置の数を求め，その確率を算出した．そして，得られた確率と直前の段階における組合わせ数との積を求めることにより，近似的に総組合わせ数を求めた．

4.1 絶対条件を考慮しない場合

まず，制約条件を全く考慮せず，表 1 の勤務体制のもとで，勤務を配置した時の総組合せ数 (NC_0) を求める．1 日の勤務体制は，リーダ 1 人，日勤 4 人，深夜勤 2 人，準夜勤 2 人，早出 1 人，遅出 1 人となるため，これらの勤務を 16 人の看護師に配置する場合，その組み合わせは以下の式により求められる．

$$ {}_{16}C_1 \times {}_{15}C_4 \times {}_{11}C_2 \times {}_9C_2 \times {}_7C_1 \times {}_6C_1 $$

すなわち，1 週間での総組み合わせ数は

$$ ({}_{16}C_1 \times {}_{15}C_4 \times {}_{11}C_2 \times {}_9C_2 \times {}_7C_1 \times {}_6C_1)^7 $$

により計算される．また，絶対条件 4 により，土・日曜日の数，すなわち，祭日のない 1 週間では土日 (2 日) × 16 人=32 個の休みを配置しなければならない．この場合，1 日に必要な看護師の人数は 11 人であるため，最低勤務人数を配置した後の未決定個所の数は $35((16-11)\times 7)$ となる．これら 35ヶ所の未決定部分に 32 個の休みを配置することにより，その組み合わせ数は ${}_{35}C_{32}$ により求められる．以上の過程により，NC_0 は (1) 式により求められる．

$$ NC_0 = ({}_{16}C_1 \times {}_{15}C_4 \times {}_{11}C_2 \times {}_9C_2 \times {}_7C_1 \times {}_6C_1)^7 \times {}_{35}C_{32} = 4.2 \times 10^{68} \quad (1) $$

4.2 絶対条件 1・2 を考慮した場合

次に，本コーディング法を適用した場合，第 1 段階では条件 1・2 を満たすように勤務の配置を行う．すなわち，リーダは必ず A グループの看護師 5 人の中から選ばれ (${}_5C_1$)，夜勤に関しては，条件 2 を満たすように勤務が配置される．条件 2 より考えられる勤務の選ばれ方の組み合わせは表 2 に示す 9 通りであるため，以下の式が導かれる (A グループについては，リーダを除いた 4 人から選ぶため，${}_4C_1$ となる)．日勤，早出，遅出に関しては，NC_0 の場合と同様の計算により求められる．以上の過程により，条件 1・2 を考慮した場合の総組み合わせ数 NC_1 は以下の式により求められる．NC_2 については，記述が困難なためここでは詳細を割愛するが，取り得る複数の場合に分割し，それぞれについて計算機により総場合数を計算し，それらを組合わせることで算出した．なお，NC_3，NC_4 については前述の確率論的な手法により求めた．

$$ NC_1 = ({}_5C_1 \times (x+y+z) \times {}_{11}C_4 \times {}_7C_1 \times {}_6C_1)^7 \times {}_{35}C_{32} = 9.4 \times 10^{62} \quad (2) $$

表 2: 夜勤グループの組み合わせ

(x)		(y)		(z)	
準夜	深夜	準夜	深夜	準夜	深夜
A, B	A, B	A, C	A, B	B,C	A, B
	A, C		A, C		A, C
	B, C		B, C		B, C

$$ x = {}_4C_1 \times {}_5C_1 \times ({}_3C_1 \times {}_4C_1 + {}_3C_1 \times {}_6C_1 + {}_4C_1 \times {}_6C_1) $$
$$ y = {}_4C_1 \times {}_6C_1 \times ({}_3C_1 \times {}_5C_1 + {}_3C_1 \times {}_5C_1 + {}_5C_1 \times {}_5C_1) $$
$$ z = {}_5C_1 \times {}_6C_1 \times ({}_4C_1 \times {}_4C_1 + {}_4C_1 \times {}_5C_1 + {}_4C_1 \times {}_5C_1) $$

以上の方法により得られた 1 週間での勤務配置の組合わせ数を用いて，近似的に 1ヶ月での組合わせ数を求めた．ここでは 1ヶ月を 28 日 (4 週間) とし，1 週間の組合わせ数を 4 乗することで算出した．各段階後における勤務配置の総組合せ数を表 3 に示す．

1. で述べたように，絶対条件は勤務表作成にあたり，必ず満たさなければならないため，それらも探索により求める従来法と比較すると，本コーディング法を用いることで，探索範囲を約 6×10^{74} 分の 1 に縮小することができていることがわかる．これにより，本手法を用いることで，GA における探索範囲を大きく縮小させることができ，探索が効率よく行われると考えられる．また，絶対条件を考慮しないで GA を用いた場合，絶対条件を満たす解を発見する割合は，本手法を用いた場合に比べ約 6×10^{74} 分の 1 となることになり，評価関数にこれらの条件を加味しても，探索効率を飛躍的に向上させることは困難であると考えられる．

表 3: 各段階における組合せ数

	1 週間	1ヵ月
条件考慮せず	4.3×10^{68}	3.3×10^{274}
第 1 段階	9.5×10^{62}	8.0×10^{251}
第 2 段階	1.3×10^{59}	2.9×10^{236}
第 3 段階	3.1×10^{54}	9.2×10^{217}
第 4 段階	8.6×10^{49}	5.4×10^{199}

5 制約条件の取り入れ方と探索効率

5.1 GA を用いた勤務表作成

4. で示したように，絶対条件を GA のコーディング法と遺伝的演算に取り入れることにより，GA の探索効率が向上すると考えられる．そこでここでは，制約条件の取り入れ方が GA の探索効率に与える影響について検討するため，2 で述べた絶対条件と希望条件を使用し，本手法と従来法とでそれぞれ実際の勤務表作成を行った．従来法については，本稿では，以下の (3) 式に示す評価関数を用いた．ここでは，勤務表中の絶対条件，もしくは希望条件を満たしていない部分の個数と，それらに対する重視度との積をとり，それらの総和を染色体の適応度として与える．なお，本手法については，(3) 式の N_a は常に 0 となる．本手法，従来法ともに，与えられる適応度の最大値は 0 であり，その時全ての絶対条件と希望条件が満たされたことになる．本節では，(3) 式において，絶対・希望条件に対する重視度は全て 1.0 として実験を行った．

$$ fitness = -(w_a N_a + w_h N_h) \quad (3) $$

w_a : 絶対条件に対する重視度
N_a : 絶対条件を満たしていない個数
w_h : 希望条件に対する重視度
N_h : 希望条件を満たしていない個数

5.2 結果と考察

図 3 に，(A) 本手法，(B) 従来法における 10000 世代までの適応度と，(C) 従来法において絶対条件を満たし

ていない個数 ((3) 式第 1 項) の推移を示す．図は 50 回試行の平均値である．また表 4 に，最終世代において得られた勤務表について，その適応度と制約条件を満たしていない個数 (平均値) を示す．本手法では，初期世代から絶対条件をすべて満たしているため，探索の初期段階から高い適応度が得られている．またその後も，希望条件を満足するように染色体は進化しており，最終世代において高い適応度を持つ勤務表が獲得されている．それに対し従来法では，全ての制約条件を評価関数に取り入れていることにより，初期世代において絶対条件を満たしていない数だけ，適応度が低下していることがわかる．また，最終世代においても，絶対条件をすべて満たす勤務表は作成できていない．従来法では絶対条件を評価関数に取り入れることにより，希望条件とともに絶対条件を満たすように染色体は進化する．それに対し本手法では，コーディングおよび遺伝的演算により全ての絶対条件はすでに満たしており，希望条件を満たすことのみに GA の探索能力を注ぐことができる．その結果，本手法は従来法と比較して，探索効率が上昇しているものと考えられる．表 4 からも，希望条件のみで比較しても，本手法が多くの希望条件を満たした勤務表を作成していることがわかる．

また表 4 により，全ての制約条件を評価関数に取り入れた GA(従来法) により得られた勤務表には，平均 16.9 箇所の絶対条件を満たさない部分が含まれていることがわかる．得られたこれらの勤務表においては，満たしていない絶対条件に対し，手作業等により修正を加える必要が生じる．

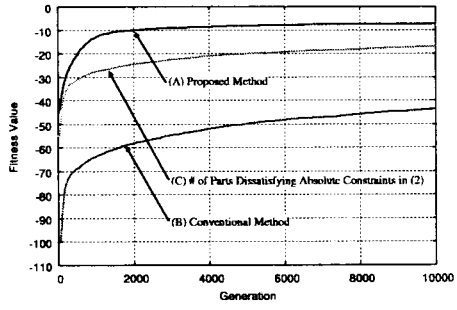


図 3: 各手法における適応度の推移

表 4: 満足していない制約条件の数と適応度

手法	希望条件	絶対条件	適応度
(A)	7.32	0.0	-7.32
(B)	26.6	16.9	-43.6

次に従来法の検討として，(3) 式中の重視度 w_a を 0.1 から 2.0 まで変化させ，減点の度合いに対する検討を行った．図 4 に，重視度 w_a を (I)0.1, (II)0.5, (III)1.0, (VI)1.5, (V)2.0 とした場合の適応度の推移を，表 5 に最終世代で獲得された勤務表の適応度と満たされていない制約条件の数を示す．図より，重視度 w_a の値が大きくなるほど，進化効率が低下しているのがわかる．これは，本 NSP においては，絶対条件よりも，希望条件の方が探索が行いやすく，絶対条件に対する減点を大きくするほど染色体が絶対条件を満たす方向に進化するため，効率的な解探索が行われていないためと考えられる．また表より，重視度の値が小さい場合においては，得られる勤務表の適応度は高くなるが，絶対条件を満たしていない箇所が多く，逆に重視度の値が大きい場合においては，絶対条件をより満足するものの，適応度が低いという傾向が見られた．これらの結果から，絶対条件のように必ず満たさなければならない制約条件が与えられる問題においても GA を適用する場合，それらの条件を満たしながら染色体を進化させることで，進化効率が高く，有効な解を獲得できると考えられる．

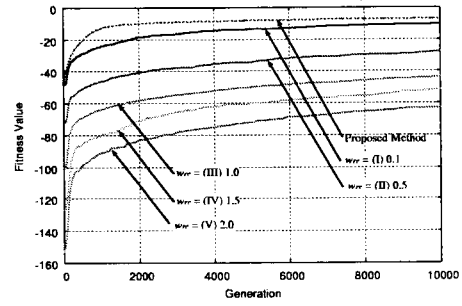


図 4: 絶対条件の重視度による適応度の推移 (従来法)

表 5: 満足していない制約条件の数と適応度 (従来法，重視度を変化させた場合)

w_a の値	希望条件	絶対条件	適応度
0.1	8.2	23.6	-10.6
0.5	10.2	22.2	-15.8
1.0	26.6	16.9	-27.7
1.5	30.4	14.1	-51.6
2.0	36.7	13.0	-62.7

6 おわりに

本稿では，GA を用いた看護師勤務表自動作成システムにおいて，制約条件の GA への取り入れ方による，探索効率への影響について検討を行った．実際の病院における勤務体制や制約条件を使用し，染色体のコーディングもしくは遺伝的演算に対して絶対条件を取り入れることにより，GA における探索範囲が大幅に縮小されることを，近似を用いた計算により数値的に示した．また，従来法と本手法とで実際の勤務表作成を行い，本手法を用いることで，GA による解の探索が効率的に行われ，絶対条件を全て満たし，かつ希望条件をより多く満たす勤務表が自動で作成されることを示した．

参考文献

[1] Arthur, J. L. and Ravindran, A. : A Multiple Objective Nurse Scheduling Model, *AIIE Transactions*, Vol.13, No.1, pp.55–60, 1981

[2] 太田有人，山村雅幸，小林重信：“遺伝的アルゴリズムを用いた Nurse Scheduling Problem の解法”，第 16 回知能システムシンポジウム，pp.123–130, 1992

[3] Ozkarahan, I. and Bailey, J. E. : Goal Programming Model Subsystem of a Flexible Nurse Scheduling Support System, *IIE Transactions*, Vol.20, No.3, pp.306–316, 1988

[4] D.E.Goldberg : “Genetic Algorithm in Search”, Optimization and Machine Learning, Addition Wesley, 1989

[5] 後藤高志，阿瀬始，山岸誠，廣田晴美，藤井聡：“計画問題への AI，ニューラルネット，GA の応用”，NHK 技報，No.144, pp.78–85, 1993

[6] 山村雅幸，小林重信 他：“遺伝的アルゴリズムにおけるナースススケジューリング”，北野宏明著．遺伝的アルゴリズム (2)，pp.89–125, 1995

[7] 井上武士，古橋武，藤井誠，前田宏，高羽実：“進化的計算を用いたインタラクティブシステムによる看護婦勤務表作成支援システムの開発”，第 15 回ファジィシステムシンポジウム，pp.385–388, 1999

[8] 川中普晴，山本康高，吉川大弘，篠木剛，鶴岡信治，“遺伝的アルゴリズムを用いた看護婦勤務表の自動生成～制約条件を取り入れたコーディング法と遺伝的演算～”，電気学会論文誌 C 分冊，Vol.122-C, No.6, pp.1023-1032, 2002

問い合わせ先

〒 514-8507　三重県 津市 上浜町 1515
三重大学 工学部 電気電子工学科
川中 普晴
TEL & FAX (059)231-9737
E-mail kawanaka@ip.elec.mie-u.ac.jp

多目的進化型最適化手法を用いたアンサンブルファジィ識別システムの設計

Evolutionary Multiobjective Optimization for Designing an Ensemble of Fuzzy Rule-Based Classifiers

山本　隆　　石渕　久生
Takashi Yamamoto　　Hisao Ishibuchi
大阪府立大学 工学研究科
Osaka Prefecture University

Abstract　One advantage of evolutionary multiobjective optimization (EMO) algorithms over classical approaches is that many non-dominated solutions can be simultaneously obtained by their single run. In this paper, we propose an idea of using EMO algorithms for constructing an ensemble of fuzzy rule-based classifiers with high diversity. The classification of new patterns is performed based on the vote of multiple classifiers generated by a single run of EMO algorithms. Even when the classification performance of individual classifiers is not high, their ensemble often works well. The point is to generate multiple classifiers with high diversity. We demonstrate the ability of EMO algorithms to generate various non-dominated fuzzy rule-based classifiers with high diversity by their single run. Through computational experiments on some well-known benchmark data sets, it is shown that the vote of generated fuzzy rule-based classifiers leads to high classification performance on test patterns.

1　はじめに

信頼性のある識別器を設計する方法の1つに，複数の識別器を1つの識別器に統合するという手法がある．複数の識別器を生成するための手法として，バギングやブースティングなど様々な手法が提案されている．バギングでは，異なるデータ集合がブートストラップよって生成され，そのデータ集合を用いて複数の識別器が生成される．そのため，複数の識別器の設計は平行して行うことができる．一方，ブースティングでは複数の識別器は逐次的に設計される．1つの識別器が設計された後，識別の結果に基づいて各学習用データの重みが更新される．更新された学習用データを用いて，次の識別器が設計される．識別器の設計と学習用データの更新が，複数の識別器を生成するために繰り返される．識別器の統合は様々な分野で研究されており，進化型計算が用いられている例もある．ニューラルネットワークやファジィ理論の分野においても，識別器の統合は研究されている．

識別器の統合において重用な点は，高い多様性を持った識別器のアンサンブルを構築することである．本論文では，そのようなアンサンブルシステムを構築するために，進化型多目的最適化 (EMO) 手法を用いることを提案する．数値実験では，NSGA-II を3目的ルール選択問題に適用する．識別精度，ルール数，ルール長の総和という3つの目的に関して非劣であるファジィ識別器を生成する．

古典的な手法に対する EMO 手法の1つの利点は，1回の実行から複数の非劣解集合が得られるということである．つまり，EMO 手法を1度だけ学習用データに適用することで，複数の識別器を生成することができる．非劣である複数のファジィ識別器の投票により評価用データに対する高い識別能力が得られることを，いくつかのベンチマーク問題に対する数値実験で示す．すなわち，識別器の生成段階で EMO 手法を用い，新しいパターンの識別段階では複数の識別器に基づく多数決を行うという方法により，高い識別能力を持つファジイ識別器のアンサブンルシステムを設計することができる．

2　ファジィ識別器

n 次元連続空間内に，m 個の学習用パターン $\boldsymbol{x}_p = (x_{p1}, \ldots, x_{pn})$, $p = 1, 2, \ldots, m$ が与えられている M クラス識別問題を考える．この問題に対して，以下の形式のファジィルールを用いる．

$$\text{Rule } R_q : \text{If } x_1 \text{ is } A_{q1} \text{ and } \ldots \text{ and } x_n \text{ is } A_{qn} \text{ then Class } C_q \text{ with } CF_q \quad (1)$$

ここで，$\boldsymbol{x}=(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ は n 次元入力ベクトル，A_{qi} は i 番目の属性に対する条件部ファジィ集合，C_q は結論部クラス，CF_q はルールの重みである．また，学習用パターン $\boldsymbol{x}_p$ と条件部 $\boldsymbol{A}_q = (A_{q1}, \ldots, A_{qn})$ との適合度を積演算によって以下のように定義する．

$$\mu_{\boldsymbol{A}_q}(\boldsymbol{x}_p) = \mu_{Aq1}(x_{p1}) \times \cdots \times \mu_{Aqn}(x_{pn}) \quad (2)$$

ここで，$\mu_{Aqi}(x_{pi})$ は条件部ファジィ集合 A_{qi} のメンバーシップ関数である．

結論部 C_q とルールの重み CF_q を決定するために，相関ルールの定義 [1] を拡張することで，ファジィ相関ルー

ルの信頼度を次のように計算する．

$$c(\boldsymbol{A}_q \Rightarrow h) = \frac{\sum_{p \in \text{Class } h} \mu_{\boldsymbol{A}q}(\boldsymbol{x}_p)}{\sum_{p=1}^{m} \mu_{\boldsymbol{A}q}(\boldsymbol{x}_p)} \quad (3)$$

信頼度 $c(\cdot)$ はクラス h のファジィ条件付確率として見ることもできる．結論部 C_q は最大の信頼度を持つクラスとして決定される．

$$c(\boldsymbol{A}_q \Rightarrow C_q) = \max_h \{c(\boldsymbol{A}_q \Rightarrow \text{Class } h)\} \quad (4)$$

一方，ルールの重み CF_q は以下のように決定される．

$$c(\boldsymbol{A}_q \Rightarrow C_q) - \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq C_q}}^{M} \{c(\boldsymbol{A}_q \Rightarrow \text{Class } h)\} \quad (5)$$

各ファジィルールの重みはファジィ識別器の識別能力に非常に大きな影響を持つ．

S をファジィ識別システムに含まれるファジィルールの集合とする．ある入力パターン $\boldsymbol{x}_p$ に対して，勝利ルールは以下のように選択される．

$$\mu_{\boldsymbol{A}w}(\boldsymbol{x}_p) \cdot CF_w = \max\{\mu_{\boldsymbol{A}q}(\boldsymbol{x}_p) \cdot CF_q | \ R_q \in S\} \quad (6)$$

つまり，勝利ルールは入力パターンとの適合度とルール重みの積が最大のルールである．入力パターンの識別結果として，勝利ルールの結論部クラスを出力する．本論文では，入力パターンを識別するために複数のファジィ識別器を用いる．入力パターンは，単一勝利ルールに基づく推論方法により，それぞれの識別器によって独立に識別される．その後，個々の識別結果の投票により，最終的な識別が行われる．

3 ファジィルールの選択

高い精度と分かり易さを持つファジィ識別器を設計するために，遺伝的アルゴリズムに基づくルール選択手法が提案されている．文献 [4] では，スカラーの適応度関数が 2 つの目的（識別率とルール数）の重み付け和として定義されていた．本研究では，遺伝的ルール選択を以下の 3 目的最適化問題として取り扱う．

$$\text{Maximize } f_1(S), \ \text{minimize } f_2(S), \ f_3(S) \quad (7)$$

ここで，S は選択されたルール集合，$f_1(S)$ はルール集合 S によって正しく識別された学習用パターンの数，$f_2(S)$ は S に含まれるファジィルールの数，$f_3(S)$ は S に含まれるファジィルールの長さの総和である．3 番目の目的が，平均ルール長ではなく，ルール長の総和であることは重要である．これは，平均ルール長を 3 番目の目的として用いた場合，意味のない非劣ルール集合が多数得られるからである．多次元の識別問題を取り扱うために，ルール選択問題に対する 2 段階手法が提案されている [5]．以下では，この手法を簡単に説明する．

3.1 候補ルールの選択

条件部ファジィ集合として K 個の言語値と “*don't care*” を用いるとき，$(K+1)$ 個の条件部ファジィ集合の可能な組合せの総数は，$(K+1)^n$ となる．これらの組合せのなか中で，事前に設定した数のファジィルールがデータマイニングのルール評価基準を用いて生成される．データマイニングの分野では，信頼度と支持度が相関ルールの選択基準として用いられている．(3) 式のファジィルールに対する信頼度と同様にして，支持度の定義も以下のように拡張される．

$$s(\boldsymbol{A}_q \Rightarrow C_q) = \frac{1}{m} \sum_{p \in \text{Class } C_q} \mu_{\boldsymbol{A}q}(\boldsymbol{x}_p) \quad (8)$$

支持度 $s(\cdot)$ はファジィルールが学習用パターンを覆っている広さを測る尺度とみなすことができる．

本論文では，以下のルールの評価基準を用いる．

$$f(R_q) \Rightarrow s(\boldsymbol{A}_q \Rightarrow C_q) - \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq C_q}}^{M} s(\boldsymbol{A}_q \Rightarrow \text{Class } h) \quad (9)$$

この基準は，SLAVE と呼ばれる繰り返しファジィ遺伝的機械学習アルゴリズム [3] で用いられていた評価基準を変形したものである．

候補ルールの選択において，ルール評価基準の大きな値を持つファジィルールが，各クラスに対して事前に設定した数だけ選択される．分かり易いファジィ識別システムの設計のために，短いファジィルールだけが候補ルールとして調べられる．このルール長における制約は，3 目的ルール選択問題の 3 番目の目的と一致している．

3.2 EMO 手法による選択

(9) 式の基準を用いて，N 個のファジィルールが選択されたとする．N 個の候補ルールの部分集合 S は，EMO アルゴリズムにおいて個体として扱われ，長さ N のバイナリーの記号列によって表現される．

$$S = s_1 \, s_2 \cdots s_j \cdots s_N \quad (10)$$

ここで，$s_j = 1$ は j 番目の候補ルールがルール集合 S に含まれることを表わし，$s_j = 0$ は S に含まれないことを表わしている．

数値実験では，NSGA-II に問題特有の 2 つのヒューリスティックを組み込んだ．1 つは，バイアスのある突然変異操作である．この操作では，0 から 1 への突然変異確率と 1 から 0 への確率が異なっている．具体的には，ルールを減らす方向に大きな確率が割り当てられており，ルール集合のなかのルールを効率的に減らすことができる．もう 1 つは，不必要なルールの削除である．入力パターンを識別する際に，単一勝利ルールに基づく推論方法を用いているので，ルール集合 S 内のいくつ

表 1: 数値実験で用いたデータ集合

データ名	属性数	パターン数	クラス数
Breast W	9	683*	2
Diabetes	8	768	2
Glass	9	214	6
Heart C	13	297*	5
Sonar	60	208	2
Wine	13	178	3

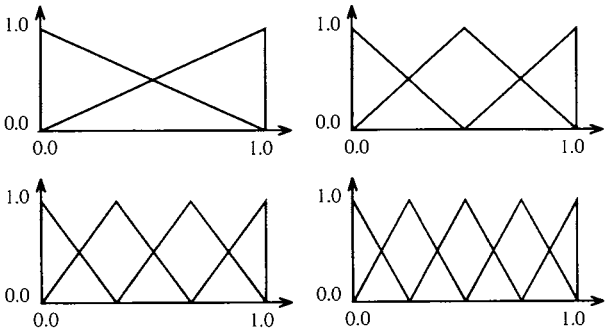


図 1: 4 種類のファジィ分割

かのルールは，どのパターンに対しても勝利ルールにならない可能性がある．この場合，識別性能（1 番目の目的）に影響を与えることなく，それらのルールを削除することができる．それと同時に，ルール数（2 番目の目的）とルールの長さの総和（3 番目の目的）を減らすことができる．したがって，どのパターンに対しても勝利ルールになっていないすべてのルールの削除を行う．

4 数値実験

数値実験では，UCI ML repository から利用可能なデータ集合のなかで，表 1 に示すデータ集合を用いた．ルール選択手法を各データに適用し，複数の非劣ルール集合を獲得した．それらのアンサンブル識別器の性能を調べ，文献 [2] で報告されている C4.5 の変種の性能との比較を行った．C4.5 の変種の性能は，ten-fold cross-validation (10CV) 手法の 10 回繰り返しによって評価されている．表 1 では，欠測値を含むデータ集合は，パターン数の欄に*が付けられており，欠測値を含むパターンを除いた数が示されている．

4.1 実験条件

文献 [2] と同様に，評価用データに対する性能評価は 10CV 手法の 10 回繰り返しにより行った．1 回の 10CV 手法において，アンサンブル識別器の設計とその評価を 10 回の繰り返すことになるため，NSGA-II は各データ集合に対して 100 回適用されることになる．NSGA-II の 1 回の実行ごとに，複数の非劣ルール集合が同時に獲得された．これらの非劣ルール集合のなかから，クラス数未満のファジィルールを含むルール集合を削除して，アンサンブル識別器を設計した．たとえば，ガラスデータに対しては，6 個以上のファジィルールを含んだルール集合だけが，アンサンブル識別器の構築に用いられている．各入力パターンは，個々のファジィ識別器によって独立に識別され，その結果の多数決により最終的な識別が行われた．

データ集合のすべての属性は，単位区間 [0,1] に正規化された．条件部ファジィ集合として，“*don't care*” と図 1 に示す 14 個の三角型ファジィ集合を用いた．まず，ルール選択基準 (9) 式を用いて，各クラスに対して 300 個のファジィルールが候補ルールとして選択された．したがって，候補ルールの総数は $300M$ 個となる．候補ルールの長さの制約は，ソナーデータに対しては長さが 2 以下，他のデータ集合に対しては 3 以下とした．次に，選択された $300M$ 個の候補ルールから非劣ルール集合を見つけるために，NSGA-II を適用した．NSGA-II のパラメータは以下のように設定した．

個体群サイズ	: 200 個体
交叉確率	: 0.8
突然変異確率	: $p_m(0 \to 1) = 1/300M$
	$p_m(1 \to 0) = 0.1$
終了条件	: 5000 世代

4.2 実験結果

各データに対する実験結果を，図 2 から図 7 に示す．左側の図は学習用データに対する性能，右側が評価用データに対する性能を示している．すべての図において，アンサンブル識別器による平均誤識別率が実線で示されている．評価用データの図における点線と破線は，文献 [2] で報告されている C4.5 の最良と最悪の結果を示している．白丸と黒丸は，アンサンブルを構成している個々の識別器を示している．黒丸は，同じルール数から構成される識別器のなかで学習用データに対して最も性能の良い識別器を表わしており，右側の図の黒丸と対応している．

Glass データ以外のデータ集合では，学習用データに対して低い誤識別率を持つ識別器は，必ずしも評価用データに対して低い誤識別率を持っていない．これは，

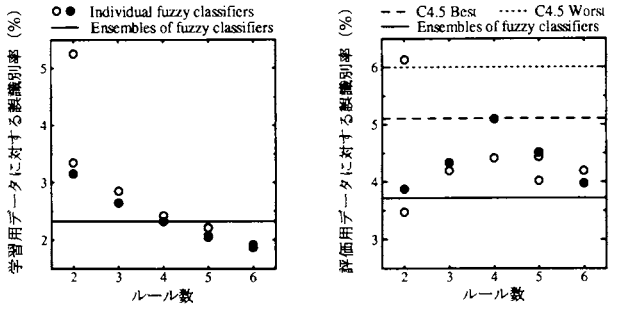


図 2: Breast W データに対する実験結果

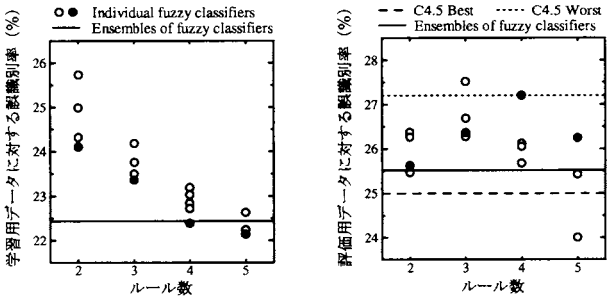


図 3: Diabetes データに対する実験結果

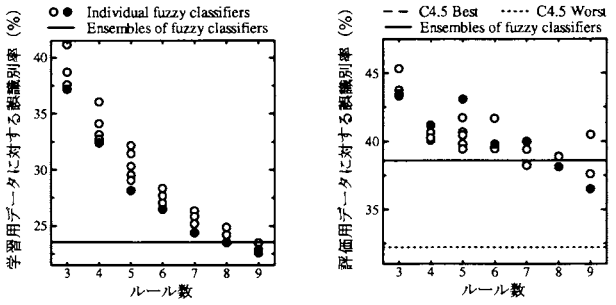


図 4: Glass データに対する実験結果

学習用データに対する性能だけの情報では，複数の識別器から 1 つの識別器を選択することが非常に困難であることを意味している．一方，アンサンブル識別器の性能は，評価用データに対して最も良い識別器の性能に近いことがわかる．

5 終わりに

我々は，高い多様性を持つアンサンブル識別器を設計するために EMO 手法を用いるというアイデアを提案した．EMO 手法の 1 度の実行で複数の非劣解を同時に獲得することができるので，この提案法は適切であるように思われる．数値実験では，NSGA-II を 3 目的ルール選択問題に適用することにより，複数の非劣ファジィ集合を生成することができた．多くのベンチマーク問題に対して，アンサンブル識別器の性能が文献 [2] で報告されている C4.5 の最良の結果と等しいかそれ以上の性能を持つことがわかった．

本論文での数値実験結果は，EMO 手法の使用がアンサンブル識別器の設計に対する有望な手法であることを示唆している．また，提案手法を用いることで，パレート解への収束性および獲得された解集合の広がりを同時に考慮しなければならない EMO アルゴリズムの性能評価を簡単に行うことが可能となる．

なお，本研究の一部はカシオ科学振興財団からの研究助成を受けて行われたものである．

参考文献

[1] R. Agrawal at el.: Fast Discovery of Association Rules; *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*(U. M. Fayyad et al.), AAAI Press, Metro Park, pp. 307-328 (1996).

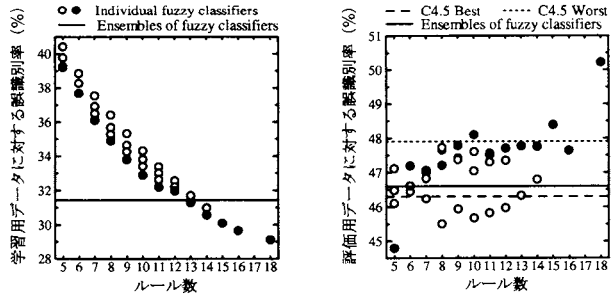


図 5: Heart C データに対する実験結果

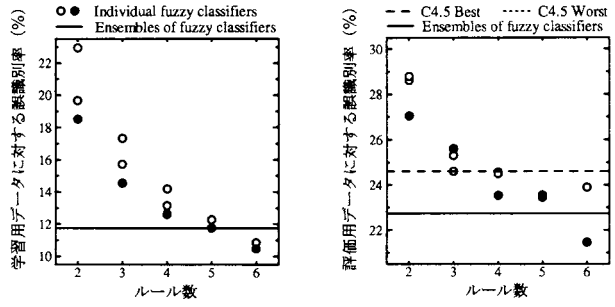


図 6: Sonar データに対する実験結果

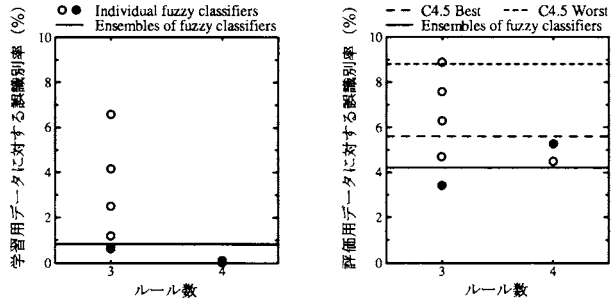


図 7: Wine データに対する実験結果

[2] T. Elomaa, and J. Rousu: General and Efficient Multisplitting of Numerical Attributes; *Machine Learning*, vol. 36, pp. 201-244 (1999).

[3] A. Gonzalez, and R. Perez: SLAVE: A Genetic Learning System Based on an Iterative Approach; *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol. 7, pp. 176-191 (1999).

[4] H. Ishibuchi, K. Nozaki, N. Yamamoto, and H. Tanaka: Selecting Fuzzy If-Then Rules for Classification Problems Using Genetic Algorithms; *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol. 3, pp. 260-270 (1995).

[5] H. Ishibuchi and T. Yamamoto: Effects of Three-Objective Genetic Rule Selection on the Generalization Ability of Fuzzy Ruled-based Systems; *Proc. of 2nd International Conference on Evolutionary multi-criteria Optimization*, pp. 608-622 (2003).

問い合わせ先

〒 599-8531　大阪府堺市学園町 1-1
大阪府立大学大学院 工学研究科
電気・情報系専攻 経営工学分野　　石渕久生
TEL: 072-254-9350 FAX: 072-254-9915
E-mail:hisaoi@ie.osakafu-u.ac.jp

インタラクティブECを用いた医療画像強調処理

Medical Image Enhancement Using Interactive EC

中野 晶太　　高木 英行
Shota NAKANO　Hideyuki TAKAGI
九州芸術工科大学
Kyushu Institute of Design
nakano@artemis.kyushu-id.ac.jp　takagi@kyushu-id.ac.jp

We investigate the applicability of interactive evolutionary (IEC)-based image processing to a practical task, medical image enhancement. Although evaluation is still on going, experiment showed that it became easier for the expert of medical image diagnostic to make his decision making by using the enhanced images obtained by his visual inspection and IEC, which implies the practical potential of this IEC approach.
Keywords: interactive evolutionary computation, medical image enhancement

1. はじめに

インタラクティブ進化計算（IEC）は，人間の主観評価に基づいて進化計算（EC）が対象システムを最適化する技術であり，その応用はアート，工学，教育など広い分野に広がっている [5]．本論文が扱う信号処理への応用もその1つで，筆者らはこれまで，音声処理 [8, 9]，補聴器フィッティング [2, 4]，画像強調 [1, 3, 6, 7] に IEC 技術を適用し評価をしてきた．

医療画像処理や補聴器フィッティングのような分野では，信号処理のユーザが信号処理の専門家ではないため，各分野の知識だけを利用して信号処理の設計ができることが望まれる．IEC 技術を用いた視聴覚ベースの信号処理はこの枠組みを与える．

筆者らの IEC ベース画像強調処理では，研究の第1フェーズとして，IEC と視覚的判断だけに基づいて画像強調フィルタを設計した場合どの程度の性能が得られるかを評価し，信号処理の事前知識をまったく使わずに IEC と視覚的判断だけで，従来の線形フィルタリングと同等性能の画像処理フィルタが設計できることを確かめた [6, 7]．現在は実用的なタスクでの評価という研究の第2フェーズに入っており，医療画像や航空写真を題材にして取り組み始めている [1, 3]．本論文は，このうちの医療画像強調への適用についての中間報告である．

2. 画像強調フィルタ

本論文での実験では，グレースケールの医療画像を入力し，画素単位で濃度変換とカラー化を行うフィルタを設計する．フィルタへの入力は1画素のグレースケール濃度値である．3種類の濃度変換特性のフィルタを設計し，各々を当該画素の RGB 出力濃度とすることでカラー化を実現する．

フィルタの特性は，図1に示す入出力空間上の n 点を線形補間することで表現される．医療画像診断の医師はこの画像強調フィルタで処理された画像が医療判断の手助けになったかどうかの主観評価を行い，その評価値に基づいて，IEC がこれら n 点の座標を決定する．

前回の実験では $n = 4$ として実験を行ったが [1, 3]，今回は $n = 20$ 点に拡張して行った．少ない点数でフィルタの入出力特性が記述され得るのであれば，20点で特性を記述しても，何個かずつは近傍に集まり大局的にみることで少ない点数での特性に近似できるが，その逆はできない，と考えてのことである．両端を除いて各点には (x, y) の2座標値があるので，IEC で決定するパラメータ数は $2(n-1)$ 点 $\times 3$ 色であるが，今回の実験では前報のようなカラー化を行わず，1つの濃度変換特性（$2(n-1)$ 点パラメータ）で実験を行った．

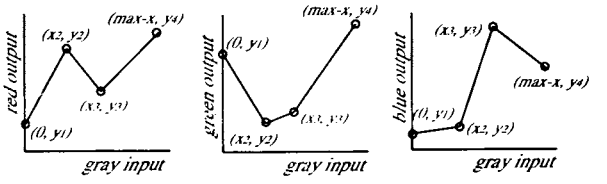


図 1: IEC による濃度変換カラーフィルタの設計．画素濃度の入出力空間上の n 点座標（この図の場合は $n = 4$）を IEC で決定し線形スプライン関数で濃度変換特性を決定する．この特性を RGB 毎に設計することで，グレースケールの画像を色づけする．

3. 評価実験

図 2(a)(c) のリンパ節の超音波画像を用い，リンパ節内部の不均一なエコーを見やすくするような画像強調フィルタを設計する実験を行った．リンパ節は図 2(a) では上部中央の楕円形部分，図 2(b) では中央全体を覆う楕円形部分であり，この内部の濃淡分布が診断の手がかりになる．

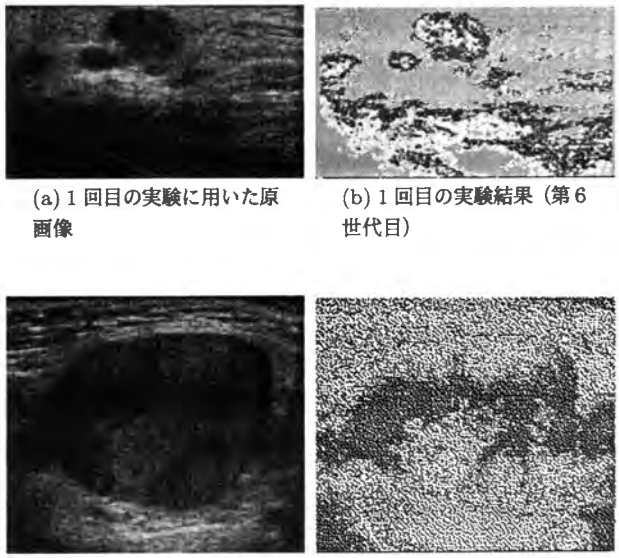
IEC での数値最適化には遺伝的アルゴリズム（GA）を用いる．GA の遺伝子数は前述の 38(=2(20-1)×1 色）パラメータで，各値は8ビットずつのバイナリコーディングされる．被験者に提示し評価を求める個体数には限りがあるため，IEC で用いる個体数は通常の EC 探索に比べて極端に少ないことが普通である．今回の実験でもディスプレイ上に表示できる画像数の制約と疲労問題から9個体で行った．GA 演算は，エリート戦略で1個体を親世代から，残り8個体をすべて交差演算で生成する．交差には2点交差を用い，突然変異率は1%とした．

視覚判断を行う IEC の被験者には，医療画像診断の専門家が務めた．被験者の負担を減らすため，被験者には

各世代毎に 9 枚の処理画像が診断上見やすいかどうかを 5 段階評価で口頭回答してもらい，評価値入力や世代交代などの IEC 操作は実験者が行った．評価は，毎世代 1 ～5 点を与える相対評価である．

4. 実験結果と考察

2 つの入力画像に対して行った実験結果を図 2(b)(d) に示す．1 回目実験の 6 世代目結果が得られるまでに約 10 分，2 回目実験の 9 世代目結果が得られるまで約 15 分かかった．この終了世代数は，被験者がこれでよいと判断するまで続けたものである．実際，2 回目実験では，3 世代目以降同じエリートが生き残り続けていたので，実質 3 世代目（約 3 分間）で最終結果が得られていた．図 2(a) のリンパ節部は画像全体の中では小さい面積であるが，診断医はこの内部のみに着目して画像処理フィルタを進化させている．



(a) 1 回目の実験に用いた原画像　(b) 1 回目の実験結果（第 6 世代目）

(c) 2 回目の実験に用いた原画像　(d) 2 回目の実験結果（第 9 世代目）

図 2: 原画像と IEC によるリンパ節の強調画像

今回の報告は，実用的な応用に入っていることの中間報告であり，まだ得られた強調画像に対する評価は完了していない．最終的には，従来通りの目視診断では疾患の有無の判断が難しいと判断された画像に対して本手法を適用し，どの程度この診断のグレーゾーンから外れて疾患の有無判断ができるようになったか，および，その結果はどの程度正しかったかを予後調査で追跡することになる．しかしこの評価には相当長期間の月日が必要である．そこでこの最終評価とは平行し，複数の画像診断医を被験者にして，グレーゾーン診断の原画像とその強調処理画像を比較する主観評価実験で簡易評価を行うことを検討している．

本報告では，今回の実験において被験者の診断医にとって見やすくなるような画像処理ができたことをもって中間報告とする．今回の作業時間が数分であることは，実用性の可能性の大きさを示す第 2 の根拠となろう．

5. 結論

現場の医師が画像処理知識を用いることなく，医療画像診断能力のみを用いて診断を助ける画像強調フィルタを生成できる IEC 法は現場の医師の画像診断を助けになる実用技術になり得る．本報告では，医療画像診断医を被験者とし，リンパ節の超音波画像から疾患の有無の判断が難しい 2 枚に対して IEC による画像強調処理を行うという，現場での実用性を評価する研究の中間報告を行った．本格的評価は今後相当時間をかける必要があるが，今回の実験結果からだけでも，実用性の可能性の大きさを示唆できた．

謝辞 医療画像のご提供および被験者実験にご協力いただきました福岡歯科大学の湯浅賢治教授ほか診断・全身管理学講座の皆様に感謝致します．本研究は，科学研究費基盤研究 (C)(2)（課題番号 13680451）の補助を受けている．

参考文献

[1] 中野晶太, 高木英行, “インタラクティブ EC による視覚ベースの信号処理の応用可能性,” 第 4 回日本ファジィ学会九州支部学術講演会, 北九州, pp.43–46 (2002 年 12 月).

[2] 大崎美穂, 高木英行, “ディジタル補聴器フィッティングへの対話型 EC の応用,” 第 14 回ファジィシステムシンポジウム, 岐阜, pp.193–194 (1998 年 6 月).

[3] Jakša, R. and Takagi, H., “Analysis and Evaluation for Interactive Evolutionary Computation-based Image Processing,” MPS シンポジウム, 京田辺, 情報処理学会シンポジウムシリーズ, Vol.2003, No.2, pp.243–250 (2003 年 1 月).

[4] 高木英行, 大崎美穂, “聴覚障害者の聴こえに基づく聴覚補償の自動最適化,” 日本音響学会講演論文集 1-2-18, pp.359–360 (1999 年 3 月).

[5] Takagi, H., “Interactive Evolutionary Computation: Fusion of the Capacities of EC Optimization and Human Evaluation,” Proceedings of the IEEE, Vol. 89, No. 9, pp.1275–1296 (2001).

[6] 高木 英行, 林田憲昌, “IEC による視覚ベース信号処理,” 第 18 回ファジィシステムシンポジウム, 名古屋, pp.211–212 (2002 年 8 月).

[7] Takagi, H. and Hayashida, N., “Interactive EC-based Signal Processing,” 4th Asia-Pacific Conference on Simulated Evolution and Learning (SEAL2002), Singapore, pp.375–379 (Nov., 2002).

[8] 渡辺辰巳, 高木英行, “対話型ＧＡを用いた歪音声の音質の改善,” 第 11 回ファジィ・システム・シンポジウム, 沖縄, pp.183–186 (1995 年 7 月).

[9] Watanabe, T. and Takagi, H., “Recovering System of the Distorted Speech Using Interactive Genetic Algorithms,” IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics (SMC'95), Vancouver, Canada, Vol.1, pp.684-689 (Oct., 1995).

問い合わせ先
〒 815-8540　福岡市南区塩原 4-9-1
九州大学大学院 芸術工学研究院
高木 英行
Tel&FAX　092-553-4555
E-mail　takagi@design.kyushu-u.ac.jp
(H15 年 9 月 30 日までは九州芸術工科大学)

FINNを用いた車載カメラ画像からの領域認識及び知識抽出における一考察

A Study on Object Recognition and Knowledge Extraction using FINN from an In-vehicle Camera Image

前本 啓貴* 矢野 良和 大熊 繁
Hiroki Maemoto Yoshikazu Yano Shigeru Okuma

名古屋大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University

Abstract: It is desired to construct the knowledge database on the surroundings of the vehicle in order to recognize objects and environments from the view images. We proposed to extract knowledge from segmented areas on input image. A FINN, one of fuzzy neural networks, can extract rules from input data. During a training session, Diverged parameters might appear on account of update procedure of LMS. So we proposed the appropriate update procedure to extract knowledge. And we considered rules extracted by FINN from the complicated view images

1 はじめに

近年，カメラの低価格化に伴い，カメラ画像による車外環境認識への期待が高まっている．カメラによる画像取得は，同時に多量のデータを獲得できることから車外環境を認識するためのセンサとして広く利用されている．しかし，時々刻々カメラから取得される画像のデータ量が膨大であるため，画素単位での処理や認識には多量の計算コストを必要とする．また，背景など不要な情報を含んだ膨大な画素情報から，認識などに利用できる有用な情報を取得することは，画素を基準とした処理では非常に困難である．

そこで，画像領域として切り出された物体の認識に対して Coarse-to-Fine アプローチをとる．まず画像を大まかに荒く見ることで細かなノイズなどの影響を受けなくなり，また，多量の画素に対して繰り返し演算する必要がないため高速に認識を行うことができる．そして，認識された情報をもとに必要に応じて精度の高い演算に切り替え，情報が細かい人物の領域などの検出・認識を行う．本稿では画像を似た情報ごとに分割し，分割された領域に対して認識を行う．さらには汎化性，蓄えられた情報の再利用性を目的とし，対象ごとに共通な特徴として知識を抽出する．

萩原ら [1] は画素情報を利用しない認識器の構築として，領域分割した画像を入力として，領域認識および入力される分割画像におけるルールの取得を行った．しかし，初期値の設定によってはFINN 学習の過程に適切でないルールが生成される．また，繁雑でない風景画像を用いており，ルールの構築が容易であった．

そこで，本稿では FINN の学習則を修正し，適切なルールを抽出させた．また，複雑な画像情報の入力に対して FINN が抽出したルールの考察を行った．

2 FINN

2.1 FINN の構造

FINN の構造を図 1 に示す．FINN は入力層，ルール層，出力層の 3 層からなるニューラルネットワークである．入力層とルール層の間，ルール層と出力層の間は全結合となっている．入力層からルール層の間には図 2 のようなメンバシップ関数が配置されている．入力層からルール層でファジィ推論における前件部を表し，ルール層から出力層で後件部を表す．

2.2 FINN の動作

入力層のノード数を N_1，ルール層のノード数を N_2，出力層のノード数を N_3 とする．入力は

$$U = (u_1, u_2, \ldots, u_{N_1}) \tag{1}$$

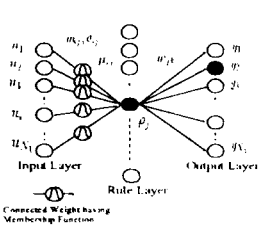


図 1: FINN の構造

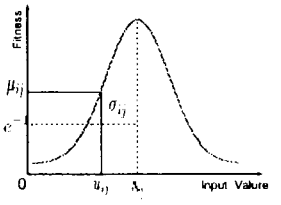


図 2: メンバシップ関数

と表される．

ルール層上のノード j から得られるファジィ推論ルールは，式 (2) で与えられる．

$$\textbf{If } u_1 \textit{ is } \tilde{m_{1j}},\ \textit{and } u_2 \textit{ is } \tilde{m_{2j}},\ \textit{and } \ldots, u_{N_1} \textit{ is } \tilde{m_{N_1 j}} \quad \textbf{then } \hat{y_k} \textit{ is } w_{jk} \tag{2}$$

入力層とルール層の間のメンバシップ関数は，中心値 m_{ij}，分散値 σ_{ij} で決まる Bell 型関数で，式 (3) で表される．

$$\mu_{ij} = \exp\left(-\frac{|u_i - m_{ij}|^2}{\sigma_{ij}^2}\right) \quad j = (1, 2, \ldots, N_2) \tag{3}$$

ルール層では，各ノードに入力されるあいまいさ μ_{ij} の最小値をとり，適応度と呼ばれる確かさ ρ_j を計算する．これにより前件部の AND 演算を実現する．

$$\rho_j = min[\mu_{1j}, \mu_{2j}, \ldots, \mu_{N_2 j}] \tag{4}$$

そして，式 (5) で各ルールの重み w_{jk} を各ファジィ推論規則の適応度 ρ_j で重み付け平均することにより出力結果 $\hat{y}_k$ を得る．ここで $\hat{y}_k$ は，入力 U がクラス k にどの程度属するのかを表す値である．

$$\hat{y_k} = \frac{\sum_{j=0}^{N_2}(\rho_j w_{jk})}{\sum_{j=0}^{N_2}\rho_j} \qquad k = (1, 2, \ldots, N_3) \tag{5}$$

2.3 FINN の学習

FINN の学習は，自己組織化学習，最小二乗学習の 2 段階で行う．まず，自己組織化学習段階において FINN の各パラメータの初期値を決め，ネットワークの基本構成を決定する．その後，最小二乗学習段階においてパラメータの最適化を行ない，ルールの適用範囲を決定する．更新則は繰り返し演算中に σ_{ij} が発散しな

図 3: 入力画像 (左) と領域分割後の画像 (右)

表 1: 人間と FINN の認識の違い

		FINN の認識			
		道路	空	建物	その他
人の認識	道路	**13**	**0**	**1**	**2**
	空	0	13	1	0
	建物	1	1	9	1
	その他	3	1	4	10

いように修正した式 (6)〜式 (10) を用いる．ここで，$\epsilon(t)$ は学習係数である．

$$m_{ij}(t+1) = m_{ij}(t) + \epsilon(t) \times \left(\frac{2}{1+exp(x_1)} - 1.0 \right) \quad (6)$$

$$x_1 = \sum_k^{N_3} (y_k - \hat{y}_k) \times \frac{w_{jk} \sum_n^{N_2} \rho_n - \sum_n^{N_2} (w_{nk}\rho_n)}{\sum_n^{N_2} \rho_n} \times q_{ij}\mu_{ij} \frac{2(u_i - m_{ij})}{\sigma_{ij}^2} \quad (7)$$

$$\sigma_{ij}(t+1) = \sigma_{ij}(t) + \epsilon(t) \times \left(\frac{2}{1+exp(x_2)} - 1.0 \right) \quad (8)$$

$$x_2 = \sum_k^{N_3} (y_k - \hat{y}_k) \times \frac{w_{jk} \sum_n^{N_2} \rho_n - \sum_n^{N_2} (w_{nk}\rho_n)}{\sum_n^{N_2} \rho_n} \times q_{ij}\mu_{ij} \frac{2(u_i - m_{ij})^2}{\sigma_{ij}^3} \quad (9)$$

$$q_{ij} = \begin{cases} 1 & \rho_j (= min[\mu_{1j}, \ldots, \mu_{ij}]) = \mu_{ij} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

3 実験

3.1 学習方法と学習用画像に対する認識

車載カメラを用いて 13 枚の画像を取得し，10 枚を学習用，3 枚を検証用とした．各画像の領域分割には，各画素の色，位置情報を元に k-平均法を適用した．分割された領域は位置，色ともに距離の近い画素をまとめたものとなっている．学習及び検出に用いた領域の属性としては色 (RGB)，面積，重心位置を用いた．各領域は道路，空，建物，その他のいずれかのラベルに属することとした．用いた入力画像と領域分割後の画像例を図 3 に示す．

学習用画像から生成した属性情報を入力し学習を行った．学習後の FINN で学習に用いた属性情報を入力したところ 95.0 %の正答率を得た．

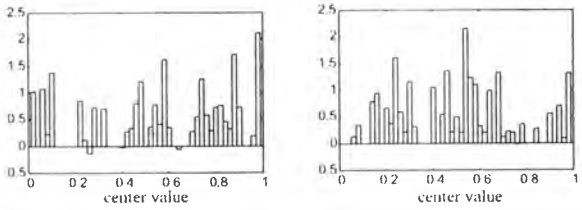
3.2 検証用画像の認識

検証用画像 3 枚 (合計 60 の領域情報) に対する認識結果を表 1 に示す．表 1 には人間による認識と FINN による認識の結果をまとめた．最も大きく発火している出力ラベルを FINN の認識結果とした．

ここで道路領域の認識結果について考察する．道路領域のデータの一部は表 2 が示すように，建物やその他と誤って認識した．これら誤認識した道路領域は消失点付近であり位置や色の特徴が建物やその他の領域のものとほぼ同じだった．そのため表 2 に示すように，FINN の出力値に有意な差はなかった．

表 2: 道路領域の誤認識時における FINN の出力結果

	FINN の出力値			
	道路	空	建物	その他
data1	0.508745	0.094165	**0.599061**	0.559901
data2	0.555718	0.098985	0.244748	**0.624545**
data3	0.607893	-0.054188	0.380271	**0.779004**



(a) 色情報 (B)　(b) 重心座標 (y)

図 4: 重み係数のヒストグラム

3.3 ルールの検討

抽出されたルールの検討を行う．各ルール層のニューロンにおいて，メンバーシップ関数の中心値と出力層への重み w_{jk} の関係を調べるために，メンバシップ関数の中心値に対する，重み w_{jk} のヒストグラムを生成した．図 4 に色情報 (B)，重心の y 座標における道路ラベルに対する重み係数のヒストグラムを示す．ヒストグラムの値が大きいほどその中心値付近の情報に，少ない重みだが多量のニューロンが割り当てられている，もしくは大きな重みをもつニューロンが割り当てられている，と考えることができる．この結果では，ある値に対して集中して重みが割り当てられることはなく，全体に重みが分散していることが確認できる．道路領域は画面中下の領域であるため，図 4(b) のように道路領域を表現するルールとして領域重心 y 座標が上を意味する 0 のあたりに大きな重みを持って出現することは不適切であると考えられる．このような現象は他の属性情報でも確認することができた．

重みが全体に散らばった理由としては，すべてのラベルに対する入力を均一な重みでルール層に学習させたことが考えられる．そのためルール層における各ニューロンは，それぞれの領域に対して共通となる情報を SOM により与えられていると考えられる．つまり，入力情報の情報を圧縮することでルール層でのルールを構築しているが，出力層からルールを見ると混在していると考えられる．一方で認識率が高い値を維持できたのは，ルール層から出力層までがニューラルネットワークと同じ働きになっていたためであると考えられる．

FINN は，ネットワークの意味分析こそ容易であるものの，現状ではその特徴が知識としては利用が困難であると考えられ，知識として利用できるような情報の統合が今後の課題になる．

4 まとめ

本稿では，FINN を車載カメラから得られた画像に適用して，認識及び生成されたルールの検討を行った．FINN による認識は高い精度を期待できるが，ルール抽出の点では，車載カメラから得られる画像のように複雑なものに対しては，容易ではないことがわかった．今後は，車載カメラからの画像に対してもルール生成が可能なシステムの構築を目指す．

参考文献

[1] 山村 敦, 萩原 将文 "ファジィ推論ニューラルネットワークによる位置関係を考慮した風景画像の認識" 電気学会論文誌 Vol.122-C,No.3,506-511,2002

連絡先:
〒 466-8603 愛知県名古屋市千種区不老町
名古屋大学 工学研究科 電子情報学専攻
前本 啓貴
電話:052-789-2776 FAX:052-789-3140
Email:maemoto@okuma.nuee.nagoya-u.ac.jp

二次計画問題のメタ制御型ボルツマンマシンによる解法

Solution of Quadratic Programming Problem by a Meta-Controlled Boltzmann Machine

和多田淳三[1]　○渡邊輝幸[2]　杉田久人[2]

Junzo Watada　Teruyuki Watanabe　Hisato Sugita

[1] 早稲田大学　[2] 大阪工業大学

Waseda University　Osaka Institute of Technology

Abstract- It is hardly to solve a large-scale quadratic programming problem. In this paper, we employ a Meta-controlled Boltzmann machine to solve a large-scale quadratic programming problem efficiently. This model deletes the units of lowere layer which is corresponding selected units in the meta-controlling layer in a process of executing. Then the lower layer is restructured by using the selected units. Executing a Meta-controlled Boltzmann machine according to above algorithm, a Meta-controlled Boltzmann machine converges more efficiently than a conventional method.

1　はじめに

二次計画問題は問題の規模が大きくなると最適解を効率的に得ることが困難である．二次計画問題の計算量は，少なくとも変数の数 n の 3 乗に比例して増加する [1] ことがわかっている．実際の投資問題などでは全ての投資対象に資金を投資するわけではなく，資金投資が行われない対象も存在する．最終的に投資対象から外れる変数のために計算負荷が大きくなる．

相互結合型ニューラルネットワークのホップフィールドネットワーク [2] やボルツマンマシン [3] のエネルギー関数の形に二次計画問題を変換することで近似的に解を得ることができる．本論文では，エネルギー関数が十分に小さくなった時点で冗長なユニットを削除するメタ制御型ボルツマンマシン [5] を用いることで効率的に大規模二次計画問題の解を得る方法を提案する．

2　メタ制御型ボルツマンマシン

ニューラルネットワークの一つであるホップフィールドネットワークやボルツマンマシンはその評価関数であるエネルギー関数が極小値（ボルツマンマシンの場合は大域的最小値）になるように動作する [4]．この性質を利用して目的関数最小化が目的の二次計画問題をエネルギー関数に変換することで二次計画問題の解を近似的に得ることができる．ところがボルツマンマシンはエネルギー関数が局所的最小値に陥らないように焼きなまし法が用いられているため，二次計画問題と同じく問題の規模が大きくなる，つまりネットワークを構成するユニット数が増えると計算時間が急激に増加するという問題点がある [4]．この問題に対して，冗長なユニットを削除することで計算効率を高めるメタ制御型ボルツマンマシンが提案されている [5]．メタ制御型ボルツマンマシンは二層構造になっており，メタ制御層にはホップフィールドネットワーク，下位階層にはボルツマンマシンが用いられる．エネルギー関数の値は，ある程度収束してきたら値の降下幅が小さくなるため，実際には最小値に近い値にもかかわらず動作終了まで時間がかかる．そこでこの段階で冗長なユニットを削除することで計算負荷を小さくし，収束までの時間短縮を図っている．

次節では二次計画問題の一つである平均分散モデルの解を得るためのエネルギー関数を定式化する．

3　エネルギー関数の定式化

本論文では以下に示す平均分散モデルを解くためのエネルギー関数を定式化する．

$$\text{minimize} \quad \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sigma_{ij}x_i x_j \tag{1}$$

$$\text{maximize} \quad \sum_{i=1}^{n}\mu_i x_i \tag{2}$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{i=1}^{n}x_i = 1 \tag{3}$$

$$x_i \geq 0 \quad (i=1,2,\ldots,n) \tag{4}$$

ただし，σ_{ij} は第 i 投資対象と第 j 投資対象の収益率の共分散，μ_i は第 i 投資対象の期待収益率，x_i は第 i 投資対象への投資比率である．

この平均分散モデルをエネルギー関数の形に変換すると以下の二つの関数が得られる．

メタ制御層

$$E_u = -\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sigma_{ij}s_i s_j + K_u\sum_{i=1}^{n}\mu_i s_i \tag{5}$$

表 1: メタ制御型ボルツマンマシンと従来のボルツマンマシンとの計算結果の比較

初期	計算時間（秒）		計算	期待収益率		リスク		選択銘柄数	
ユニット数	従来	メタ制御型	効率 (%)	従来	メタ制御型	従来	メタ制御型	従来	メタ制御型
10	7.28	6.20	85.2	0.00138	0.00138	0.00088	0.00088	6	3
20	9.03	6.44	71.3	0.00090	0.00091	0.00073	0.00073	4	3
40	13.08	7.38	56.4	0.00081	0.00080	0.00053	0.00052	5	5
80	21.81	8.56	39.2	0.00137	0.00138	0.00063	0.00063	8	7
160	39.50	9.96	25.2	0.00306	0.00307	0.00057	0.00058	4	6
320	103.56	19.18	18.5	0.00402	0.00400	0.00044	0.00042	5	9
640	229.43	38.02	16.6	0.00738	0.00739	0.00095	0.00096	6	15
1286	491.49	87.96	17.9	0.00736	0.00742	0.00092	0.00099	6	15

下位階層

$$E_l = -\frac{1}{2}\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sigma_{ij}x_ix_j + 2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}x_ix_j\right) + 2\sum_{i=1}^{n}x_i + K_l\sum_{i=1}^{n}\mu_ix_i \quad (6)$$

ここで，K_u, K_l は各階層において期待収益率にかかる重みである．またメタ制御層の出力値 s_i は 0 か 1 を出力する変数である．

4 数値例

本節では様々なサイズの株価データを用いた数値実験を行う．

初期ユニット数は 10,20,40,80,160,320,640,1286 の 8 パターンで行った．従来のボルツマンマシンを用いた場合も同様の計算を行い結果を比較する．計算結果は表 1 のとおりである．なお従来モデルの最終ユニット数は収束段階でユニットの値が 0 になったユニット数を初期ユニット数から引いた物である．提案モデルが初期ユニット数が多い場合に従来モデルより最終ユニット数が多くなるのはある程度収束した段階では 0 に近いが 0 と判断されないユニットがあるためだと考えられる．期待収益率やリスクの値は，動作途中でユニットを削除して計算したメタ制御型ボルツマンマシンの解は従来法と比較してもほとんど差が無いため問題ない．

計算効率は表 1 を見ても明らかなように，ユニット数が少ない場合はほとんど差が出ないが，多くなるにしたがって非常に計算効率が向上していることが分かる．

以上のことから提案するメタ制御型ボルツマンマシンは二次計画問題の効率的解法として有効な手法であるといえる．

5 おわりに

本論文では大規模二次計画問題の解を効率的に得るためにメタ制御型ボルツマンマシンを用いた解法を提案した．

提案モデルは大規模問題の計算効率悪化につながる冗長変数を計算途中で削除することで効率的に解を得ることが目的である．数値例を用いて有効性を示した．

参考文献

[1] 今野浩 理財工学 I, 日科技連出版社, 1995

[2] J. J. Hopfield : Neural netwoks and physical systems with emergent collective comp-utational abilities, Proc.Natl.Acad.Sci., pp.2554-2558,1982

[3] D. H. Ackley, G. E. Hinton and T. J. Sejnowski,"A Learning Algorithm for Boltzmann machines", *Cognitive Sci.*, Vol.9, 1985

[4] 馬場則夫, 小島史男, 小澤誠一, ニューラルネットの基礎と応用, 共立出版株式会社, 1994

[5] T. Watanabe and J. Watada, "A Meta-Controlled Boltzmann Machine for Rebalancing Portfolio Selection," *Central European Journal of Operations Research*, to appear

[問い合わせ先]

和多田　淳三
早稲田大学大学院　情報生産システム研究科
〒 808-035 北九州市若松区ひびきの 2-7
TEL 093-692-5179
FAX 093-692-5179
E-mail:junzow@osb.att.ne.jp

混合分布と状態空間モデルによるユーザタイプの推定とそのユーザ適応インタフェースへの応用

Estimation user type by state space model with mixture and its application to user adaptive interface

○百留　貴弘　馬場　恵子　松本　洋介　生駒　哲一　前田　博
Takahiro Hyakudome　Keiko Baba　Yosuke Matsumoto　Norikazu Ikoma　Hiroshi Maeda

九州工業大学　工学部
Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract: This study aims at an adaptive user interface using mixture model and state space model. Mixture model is applied to response data of many users to extract user types in a preliminary experiment. Estimated components are regarded as "user types". Online estimation of the type of a new user from his/her response series is done by state space model, where the indicator of user types constitute the state vector. We propose to use the estimation result of the type of new user to an adaptive user interface by showing the appropriate screen based on the estimated indicator of user type. Verification experiments for key-typing task and touch-panel operation of intelligent wheel chairs are reported.

1　はじめに

現在，コンピュータは小型・大容量・高速化が進み，様々な電化製品に搭載され，その高性能化に欠かせないものになっている．一方で，電化製品等の高性能化，ネットワーク化に伴い，それを操作するインタフェースもだんだん複雑になってきている．複雑なインタフェースは，予めインタフェースに関する知識を持っているユーザや熟練したユーザはその機能を十分に活用することができるが，そうでないユーザや身体障害者，高齢者は上手く使いこなすことができない場合がある．この問題に対し，ユーザの操作特性に応じてインタフェースを動的に変化させるユーザ適応インタフェースが提案されている[3][4][5][6].

ユーザ適応インタフェースの既存の研究の1つに，インタフェースを状態遷移モデルで表し，ユーザの操作能力に応じて状態遷移を変更することでユーザ適応を実現するものがある[3][4]．そこでは，ユーザの個人差や熟練度を表す「ユーザレベル」という概念を定義し，ユーザの操作履歴からユーザレベルを判定する．ユーザ適応は，判定されたユーザレベルに基づき，状態遷移を変更することにより行われる．しかし，ユーザレベルの判定には，設計者の主観に基づいた評価関数が用いられているため，実際にユーザ適応して提示したインタフェースがユーザにとって使いやすいものであるかどうか判らないという問題点がある．

この問題を解決するために，[5]にて，設計者の主観に基づかない適応方法として，ユーザをいくつかの典型的なグループに分類し，この情報を効果的に用いてユーザ適応を行う方法が提案されている．そこでは，同一な状況における反応の共通な特性を持つユーザグループを「ユーザタイプ」と定義し，新たにサービスを提供したいユーザ(以下，新規ユーザと呼ぶ)に対して，ユーザタイプを推定し，推定されたユーザタイプに応じて適応する．ユーザタイプ推定・適応に先立って，まず事前の実験で，多数のユーザの操作特性を表す反応データを混合分布でモデル化し，ユーザタイプを抽出する．ここでは，推定された各コンポーネント分布をユーザタイプと見なす．新規ユーザに対するタイプ推定は，反応データが与えられた下での混合比率を推定することにより行われる．ユーザ適応は，予め別の調査により用意したユーザタイプ毎の最適インタフェースを，推定された混合比率で重み付けすることにより行う．

本論文では，[5]で提案された方法を厳密に定式化する．新規ユーザに対するタイプ推定は，どのコンポーネント分布から反応データが生成されたのかを隠れ状態として，各コンポーネント分布からの反応データの生起確率を推定することにより行う．ここで，反応データがあるコンポーネント分布から生起する確率を，対応するコンポーネント分布の混合比率と見なす．反応データが与えられる毎に，状態空間モデルを用いたベイズ推定により混合比率を更新する．検証実験として，キータイピング操作と自律移動可能なインテリジェント車椅子のタッチパネル操作におけるユーザタイプの推定実験を行った．また，タッチパネル操作では，ユーザ適応実験も行った．

本文の構成は，次の通りである．まず2章にてユーザタイプを定義し，ユーザタイプの抽出方法について述べる．そして状態空間モデルを用いたユーザタイプ推定モデルの定義を行い，ユーザタイプの推定方法とユーザ適応の方法について述べる．3章ではキータイピング操作とタッチパネル操作での検証実験を報告する．そして，4章でまとめと今後の課題について述べる．

2　原理

2.1　混合分布モデルによるユーザタイプの抽出

ユーザへの提示インタフェース $\mathbf{x}$，制御不可能な外部入力 $\mathbf{z}$ が与えられた時の，反応の共通な特性を持つユーザグループを「ユーザタイプ」と定義する．

あるユーザタイプについて，インタフェース $\mathbf{x}$，外部入力 $\mathbf{z}$ が与えられた時の，ユーザの操作特性を表す反応 $\mathbf{y}$ は，θ_j をパラメータとする確率密度関数

$$f_j(\mathbf{y}|\mathbf{x},\mathbf{z};\theta_j) \tag{1}$$

で表される確率分布に従うものとする．ここで，$j \in \{1,2,\ldots,p\}$ はユーザタイプの番号を表す．

複数のユーザタイプについて，それらに属する多数のユーザについて，インタフェース $\mathbf{x}$，外部入力 $\mathbf{z}$ が与えられた時のユーザの反応 $\mathbf{y}$ は，混合分布モデル

$$f(\mathbf{y}|\mathbf{x},\mathbf{z};\mathbf{w},\boldsymbol{\Theta}) = \sum_{j=1}^{p} w_j f_j(\mathbf{y}|\mathbf{x},\mathbf{z};\theta_j) \tag{2}$$

により表せる．ここで $\boldsymbol{\Theta} = \{\theta_1,\theta_2,\ldots\theta_p\}$ は，コンポーネント分布のパラメータ集合，$\mathbf{w} = [w_1,w_2,\ldots,w_p]$ は混合比率のベクトルで，制約条件

$$\sum_{j=1}^{p} w_j = 1,\ w_j \geq 0 \qquad (j = 1,\ldots,p) \tag{3}$$

を満たす.

多数のユーザについて，様々なインタフェース/外部入力に対する反応データから，混合分布モデルを推定することを，ここでは「ユーザタイプの抽出」と言う．ユーザタイプを抽出することによって，コンポーネント分布のパラメータ $\hat{\boldsymbol{\Theta}} = \left\{\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \ldots, \hat{\theta}_p\right\}$ と混合比率ベクトル $\hat{\mathbf{w}} = [\hat{w}_1, \hat{w}_2, \ldots, \hat{w}_p]$ の推定値を得る．事前にユーザタイプが分類できる場合には，$\boldsymbol{\Theta}$ はコンポーネント分布毎に推定を行い，$\mathbf{w}$ はタイプ毎に分類したデータの割合とする．事前にどのようなユーザタイプが存在するのか，また，各ユーザがどのユーザタイプに属するのかが判らない場合には，混合分布モデルの推定に EM アルゴリズム[1][2]等の教師なし学習を使用し，ユーザタイプを抽出する．

2.2 状態空間モデルによるユーザタイプの推定

タイプ未知の新規ユーザがインタフェースを操作している状況にて，オンラインでユーザタイプを推定する．その推定結果に応じてユーザ適応を行うことを想定する．この状況では，新規ユーザに対して様々なインタフェース/外部入力に対するユーザの反応を測定することはできない．インタフェース操作中に得られる少数の反応データに基づきユーザタイプを推定することになる．少数の反応データにて効果的に推定を行うために，状態空間モデルを用いたベイズ推定を利用する．

ユーザタイプの推定は，どのコンポーネント分布から反応データが生成されたかを「隠れ状態」とし，各コンポーネント分布からの反応データの生起確率を推定することにより行われる．ここで，反応データがあるコンポーネント分布から生起する確率を，ユーザタイプに対応するコンポーネント分布の混合比率と見なす．つまり，与えられる反応データを整数 k でカウントし，これを時刻と呼ぶものとすると，混合比率ベクトルは，時刻 k に従って変化し

$$\mathbf{w}_k = [w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \ldots, w_p^{(k)}] \tag{4}$$

となる．

ユーザタイプ番号 j_k は，マルコフ過程に従って遷移すると仮定する．1 時刻前と同じユーザタイプである確率を q，その他のユーザタイプに遷移する確率を $(1-q)/(p-1)$ とすると，j_k の時間進展は

$$j_k = \begin{cases} j_{k-1} & , \quad q \\ j(\neq j_{k-1}) & , (1-q)/(p-1) \end{cases} \tag{5}$$

と表される．これをシステム方程式とする．

時刻 k において観測される反応を $\mathbf{y}_k$ と表すと，$\mathbf{y}_k$ は

$$\mathbf{y}_k \sim f(\cdot \mid \mathbf{x}_k, \mathbf{z}_k; \hat{\mathbf{w}}_k, \boldsymbol{\Theta}) \tag{6}$$

と，混合比率が $\hat{\mathbf{w}}_k$ の混合分布モデルに従うものとする．これを観測方程式とする．

観測された反応データ系列

$$\mathbf{y}_{1:k} = [\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \ldots, \mathbf{y}_k] \tag{7}$$

が与えられたとき，式(5)のシステム方程式と式(6)の観測方程式から成る状態空間モデルに基づいて，各コンポーネント分布からの反応データの生起確率を推定することにより，ユーザタイプの推定を行う．つまり，

$$\hat{w}_j^{(k)} = p(j_k \mid \mathbf{y}_{1:k}) \tag{8}$$

とする．

2.3 ユーザ適応

ユーザタイプの推定結果に応じて，最適なインタフェースを提示することでユーザ適応が可能となる．そのために，ユーザタイプの抽出で得られた各ユーザタイプについて，様々なインタフェース/外部入力における好みを予め調べておく．この調査結果から，各ユーザタイプの評価関数 $I_j(\mathbf{x} \mid \mathbf{z})$ を構築する．これに，ユーザタイプ推定の結果，得られた混合比率による線形和

$$I(\mathbf{x} \mid \mathbf{z}; \hat{\mathbf{w}}) = \sum_{j=1}^{p} \hat{w}_j I_j(\mathbf{x} \mid \mathbf{z}) \tag{9}$$

を新規ユーザの評価関数とする．評価関数が最大となるインタフェース $\mathbf{x}$ を求め，このインタフェースをユーザに提示することでユーザ適応を行う．

3 実験

検証実験として，キータイピング操作と，インテリジェント車椅子のタッチパネル操作についてユーザタイプの推定を行った．ここでは，ユーザの操作特性として「速さ Q (*Quickness*)」，「正確さ A (*Accuracy*)」，「訂正度 C (*Correction rate*)」の 3 つの項目を測定し，これを反応データとした．

3.1 キータイピング実験

日常的にパソコンを使用している 13 名の被験者について，(1)両手，(2)利き手，(3)非利き手，(4)指 1 本の 4 つ入力方法で，「英字新聞」という情報源から無作為抽出された 1 段落の文章を入力してもらい，キーを入力した時刻とそのアスキーコードを記録した．

この記録データから，Q として「キー入力平均時間間隔」，A として「誤り率」，C として「バックスペースキー入力平均時間間隔」の 3 つの項目の値を算出し，これを反応データとした．

13 名の被験者に対して，各入力方法毎に 8 回，計 13(人)×8(回)=104 個のデータを採取した．

この実験では，各入力方法をユーザタイプと見なす．採取したデータのタイプは既知であるため，各タイプ毎にデータを分け，コンポーネント分布を推定した．各項目は相関が小さかったため，独立であると仮定した．コンポーネント分布には，正規分布やベータ分布，ポアソン分布，ガンマ分布の中から尤度の最も大きかったガンマ分布を採用した．

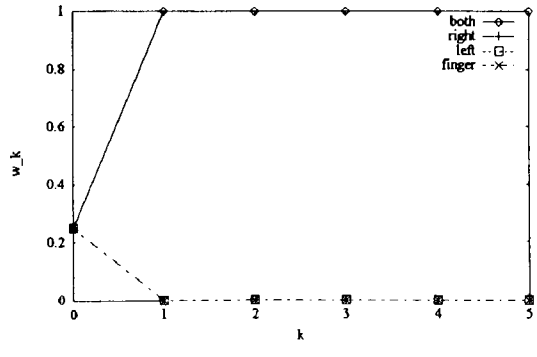


図 1　両手のタイプ推定結果

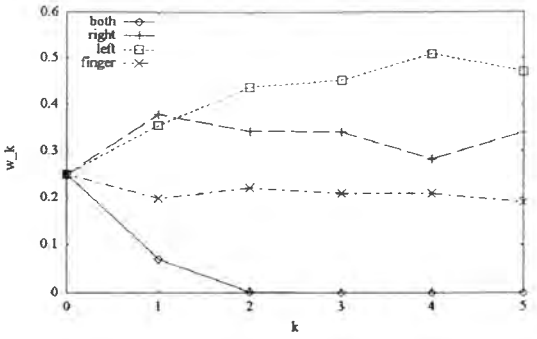


図2　利き手のタイプ推定結果

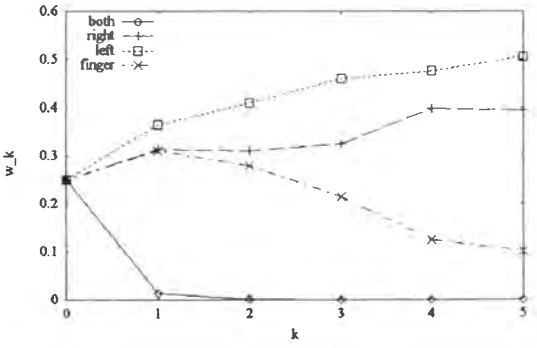


図3　非利き手のタイプ推定結果

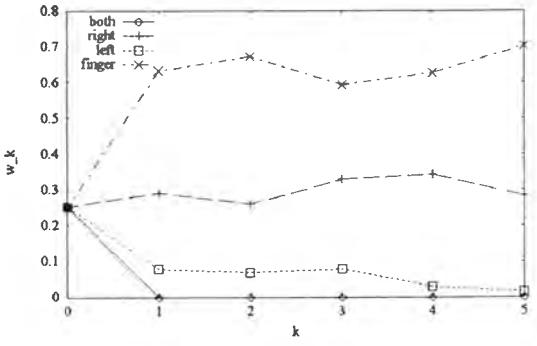


図4　指1本のタイプ推定結果

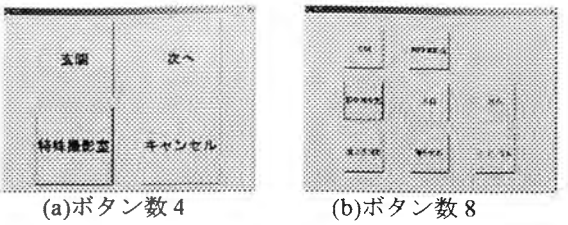
ユーザタイプの推定には，新規ユーザの反応データとして，1名の被験者について，各入力方法毎に5個ずつデータを採取した．このデータでユーザタイプの推定を行った．推定結果を図1,2,3,4に示す．図1,2,3,4より，利き手を除き，各タイプと推定された混合比率が最大となったタイプが一致しており，利き手以外のタイプは正しく推定できたことがわかる．

3.2　タッチパネル実験

自律移動機能を持つインテリジェント車椅子のユーザインタフェースとしてタッチパネルを想定し，その操作について，ユーザタイプの推定実験とユーザ適応実験を行った．

3.2.1　想定する状況

自律走行可能で，経路生成機能や障害物の自動回避機能を持つインテリジェント車椅子を想定し，タッチパネルインタフェースから目的地を選択することにより車椅子は自律走行するものとする．この実験では，高齢者や障害者，怪我人が病院内を移動する際にインテリジェント車椅子を利用する場合を想定している．タッチパネルインタフェースには，目的地が書かれたボタンをもつグラフィカルユーザインタフェース(GUI)を表示する．この車椅子に実装



(a)ボタン数4　　(b)ボタン数8
サイズ6.5[cm]×6.5[cm]　　サイズ3.5[cm]×3.5[cm]

図5　ユーザ適応インタフェースの画面表示例

するユーザ適応インタフェースは，適応項目として，目的地が書かれたボタンの数と大きさが変化する．表示されるGUIは，ボタンの数が3種類，大きさが3種類の組み合わせで，合計6種類の画面を用意した．図5に画面の表示例を示す．

3.2.2　ユーザタイプの推定

インテリジェント車椅子が研究段階で現存しないことと，実験場所の確保が困難なため，操作に応じた病院内の移動風景を表示させるバーチャルリアリティ(VR)を使用した．また，実際に高齢者や障害者，怪我人に実験に参加してもらうことは困難を伴うために，高齢者のもつ障害を擬似的に体験することができる高齢者体験器具を用いて，高齢者や障害者や怪我人の模擬をした．使用した高齢者体験器具の装着例を図6に示す．

図6　高齢者体験器具の装着例

12名の被験者に，(1)高齢者，(2)障害者，(3)怪我人の3つのユーザタイプを模擬するために，適切な組み合わせで器具を装着してもらった．そして指定された目的地まで操作してもらい，画面にタッチした時刻，タッチした位置と最も近いボタンの中心までの距離，タッチしたボタンのコードを記録した．

この記録データから，Qとして「画面タッチ平均時間間隔」，Aとして「タッチ位置とボタン中心間の平均距離」，Cとして「キャンセル平均時間間隔」の3つの項目を算出し，これを反応データとした．

12名の被験者に対して，各ユーザタイプ毎に8回，計12(人)×8(回)=96個のデータを採取した．

採取したデータのタイプは既知であるため，各タイプ毎にデータを分け，コンポーネント分布を推定した．各項目は相関が小さかったため，独立であると仮定した．コンポーネント分布には，正規分布やベータ分布，ポアソン分布，ガンマ分布の中から尤度の最も大きかったガンマ分布を採用した．

ユーザタイプの推定には，新規ユーザの反応データとして，ユーザタイプの抽出に用いたデータから，タイプ毎に10個ずつ無作為抽出したデータを用いて推定した．一例として，図7,8,9にGUIがボタン数4，サイズ5[cm]×5[cm]の場合の推定結果を示す．実験の結果，GUIがボタン数8，サイズ3.5[cm]×3.5[cm]における障害者のタイプを除き，全てのGUIにおいて，各タイプと推定された混合比率が最大となったタイプが一致し，正しくユーザタイプを推定できた．

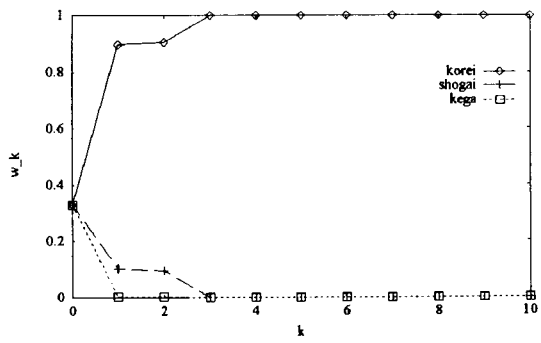


図7　高齢者のタイプ推定結果

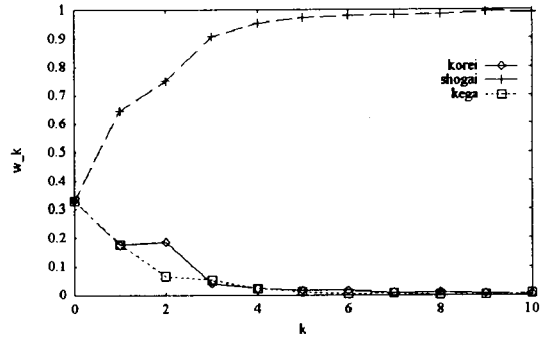


図8　障害者のタイプ推定結果

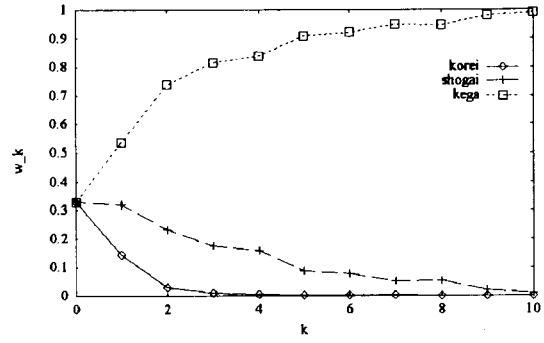


図9　怪我人のタイプ推定結果

3.2.3　ユーザ適応実験

ユーザ適応を実現するためには，各ユーザタイプ毎の好みの GUI が必要となる．これを得るために，ユーザタイプ抽出実験の直後に，全ての GUI の中から最も使いやすいと感じた GUI を 1 つ選択してもらう調査を行った．調査した 6 種類の GUI の仕様と，調査結果から得られたユーザタイプ毎の各 GUI の好みの比率とを，表 1 に示す．表 1 を見ると，高齢者は GUI 番号 3 と 5，障害者は 5，怪我人は 5 と 6 を好む傾向があることが分かる．

表1　6種類の GUI の仕様とその評価

番号	数 [個]	サイズ [cm]×[cm]	高齢者	障害者	怪我人
1	4	3.5×3.5	0.00	0.00	0.00
2	4	5.0×5.0	0.16	0.04	0.16
3	4	6.5×6.5	0.40	0.16	0.00
4	6	3.5×3.5	0.00	0.00	0.00
5	6	5.0×5.0	0.36	0.72	0.56
6	8	3.5×3.5	0.08	0.08	0.28

表 1 から，各ユーザタイプの評価関数 $I_j(\mathbf{x})$ を構築した．ユーザタイプを抽出する際に使用した，好む GUI が既知のユーザの反応データを新規ユーザの反応データとして，ユーザタイプを推定した．その推定結果の最終時刻での混合比率と，この評価関数とを用いて，新規ユーザの評価関数値を求めた結果，GUI 番号 5 が最大となった．このときの新規ユーザの最も好む GUI 番号は 5 であった．このことから，ユーザ適応された GUI と新規ユーザの最も好む GUI とが，一致することが確認できた．

4　おわりに

本研究では，[5]で提案されたユーザ適応の方法を厳密に定式化した．ここでは，まずユーザ適応の方法として，混合分布モデルでユーザ全体の反応特性を表し，そのコンポーネント分布をユーザタイプと見なす．次に状態空間モデルにより新規ユーザのタイプを推定し，推定されたタイプに応じてユーザ適応するアプローチをとった．

検証実験として，キータイピング操作とインテリジェント車椅子のタッチパネル操作において，ユーザタイプの推定を行った．キータイピング操作実験では，タイプが利き手を除き，各タイプと推定された混合比率が最大となったタイプが一致し，利き手以外は正しく推定できた．タッチパネル操作実験では，GUI がボタン数 8，サイズ 3.5[cm]×3.5[cm]における障害者のタイプを除き，全ての GUI において，各タイプと推定された混合比率が最大となったタイプが一致し，ユーザタイプを正しく推定できた．

タッチパネル操作実験では，表示されるボタンの数と大きさが変化するユーザ適応インタフェースについて，ユーザ適応の検証実験を行った．実験の結果，ユーザ適応された GUI と，ユーザの最も好む GUI とが一致することが確認できた．

本論文のモデルでは，反応データがあるコンポーネント分布から生起する確率を推定し，それを対応するコンポーネント分布の混合比率としている．しかし，ユーザ適応は推定された混合比率の線形和により実行されるので，混合比率そのものを推定する方法を検討する[7][8].

謝辞　本研究は，統計数理研究所共同利用研究 14-共研-1005 による．

参考文献

[1] A.Dempster, N.Laird, and D. Rubin: Maximum likelihood estimation from incomplete data via EM Algorithm, Journal of Royal Society, Ser.B, Vol.39, pp.1-38 (1977)

[2] Geoffrey McLachlan, David Peel: Finite Mixture Models, (2000) Wiley Series in Probability And Statistics

[3] 森田潤，生駒哲一，前田博，「インテリジェント車椅子におけるユーザ適応型インタフェース」，第 1 回日本ファジィ学会九州支部学術講演会論文集，pp.77-80 (1999)

[4] 森田潤，馬場恵子，生駒哲一，前田博；「インテリジェント車椅子におけるユーザ適応型インタフェースの開発」，第 17 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.253-256 (2001)

[5] 馬場恵子，百留貴弘，松本洋介，生駒哲一，前田博；「ユーザ適応インタフェースのための状態空間モデルによるユーザタイプの推定」，第 18 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.271-272 (2002)

[6] F. Patern and C. Mancini; Effective levels of adaptation to different types of users in interactive museum systems, Journal of the American Society for Information Science, 51(1), pp.5-13 (2000)

[7] G. Kitagawa; Monte Carlo filter and smoother for non-Gaussian nonlinear state space models, Journal of Computational and Graphical Statistics 5, No.1, 1-25 (1996)

[8] A.F.M Smith and U.E. Makov; Quasi-Bayes Sequential Procedure for Mixtures, Journal of Royal Statistical Society, Ser.B, Vol.40, No.1, pp.106-112 (1978)

連絡先
〒804-8550　北九州市戸畑区仙水町 1 番 1 号
九州工業大学　工学部　生駒　哲一
E-mail: ikoma@comp.kyutech.ac.jp

ヒューマンビークルにおけるアイコンタクトコミュニケーション

Eye Contact Communication in Human Vehicle

山口　亨**　　大橋　邦博*
Toru Yamaguchi　　Kunihiro Ohashi

*東京都立科学技術大学 大学院工学研究科　システム基礎工学専攻
Systems Engineering Science, Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan Institute of Technology
**科学技術振興事業団さきがけ研究21
PRESTO, Japan Science and Technology Corporation (JST)

Abstract— In our country, advance of aging is remarkable and IT gap is progressing. A user's situation is judged based on the information from two or more information terminals (camera, GPS, etc.), and the intellectual wall type human-being center IT system which returns the information which man needs is built

1. はじめに

現在、わが国では平均寿命の伸長と少子化の進行により急速度で高齢化社会がやってきつつある。特に高齢者の中には情報機器を有効活用できてない情報弱者と呼ばれる方が多く存在し、IT格差が進んでいるのが現状である。

本研究では、従来の「人間がシステムに働きかけて作用するシステム」ではなく、「システムが人間を見て状況を判断し作用する人間中心型のネットワークシステム」が必要であると考えた。

特にマルチプラットホームな表示とヒューマンビークルに注目し、人間中心型システムの構築を行い、その有効性を検証する。[1]

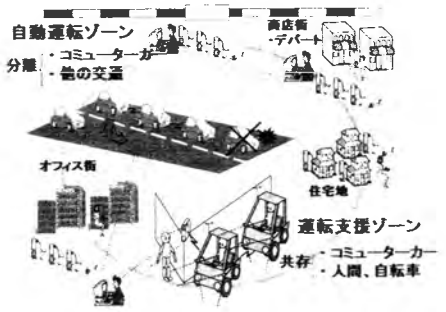


図 1. 人間中心型ネットワークシステム全体図

2. マルチプラットホームな表示と実験システム

マルチプラットホームな表示とは、PDA のような小さい画面とプラズマディスプレイのような大きい画面では表示能力が異なるため、そのプラットホームに最適な表示を行う表示方式である。

今回は携帯情報端末(ノート PC)を用いて、カメラ等のセンサー情報から人間の状況を判断し、携帯情報端末に人間が必要としている情報をプラットホームに最適な形で表示する人間中心型システムを構築する。

システムを構築するにあたり生活空間を室内、室外、車内の 3 シチュエーションに分けた。
室内:Web を閲覧するための人間中心型システム。
室外:GPS により位置情報を補完し手招きにより電気自動車を呼び寄せる人間中心型システム。
車内：危険表示をする人間中心型システム。

以上の 3 シチュエーションにおいて人間の状況に応じて機能の切り替わる人間中心型のネットワークシステムを構築し評価した。

これらのシステムは特別なソフトウェアを必要としない。人間の状況によってサーバーでリアルタイムに HTML を構成しているので、HTML ファイルを読み込む環境さえあれば利用する事が出来る。利用者にはホームページを見る感覚で情報提示が行われる。

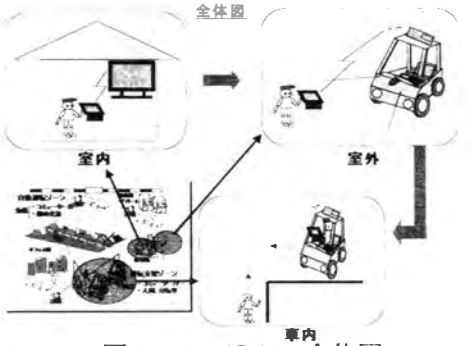


図 2. システムの全体図

3. 室内システム

Web の閲覧を想定した人間中心型システムである。人間の頭上カメラとプラズマディスプレイ上のカメラで人間の顔の方向情報を得る。これによって人間がプラズマディスプレイのどの部分に注目しているかが分かる。人間の持っている情報端末にはその人が注目している項目に関する詳しい情報を提示が提示される。[2][3]

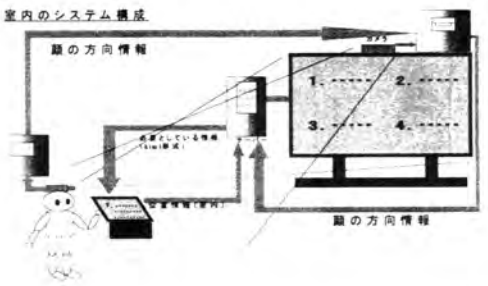


図 3. 室内システム

4. 室外システム

情報端末を外に持ち出し電気自動車に乗るまでをサポートする人間中心型システムである。

室内システムではカメラで人間の情報を得ていたが、屋外ではカメラの視野に入らない人間の位置情報が得られない。カメラの視野外では GPS によって人間の位置情報を得る、そして電気自動車上のカメラの視野に入ってからは電気

自動車上のカメラから人間の位置情報得る。
今回は人間がカメラの視野内に入ると、手招きをして電気自動車を呼び寄せる実験を行った。

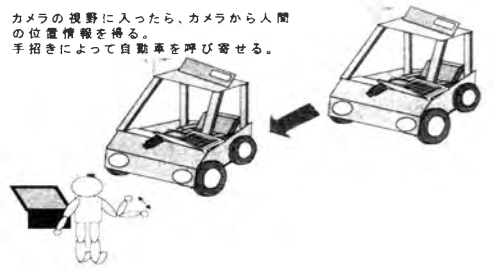


図 4. 室外システム

5. 車内システム

電気自動車に乗り込んでから情報端末は危険表示によって運転者を支援する人間中心型システムに切り替わる。危険表示を行う為には周囲の環境情報を見極める事が必要である。

路上に設置したカメラシステムによるステレオ視や各種センサーから周囲の情報を取得し、本当に危険な時に最適な警告を出す実験を行う。（宇都宮大学　阿山研究室との共同実験）

今回は見通しの悪い L 字路のシチュエーションで実験を行った。まず歩行者と電気自動車は交差点に向かって直進する。歩行者の位置情報と電気自動車の位置情報は交差点に設置されているステレオ視システムから得られる。さらに、運転者の頭上カメラと車内カメラから運転者の顔の方向情報、電気自動車からスピード、ハンドル角の情報が得られる。

これらの環境情報をリアルタイムに処理する事で状況を判断し運転者への危険表示を行う。[4]

6. 危険表示

シミュレーションと実験により提示するタイミングを検証した。提示内容は図 6 に示すように、大きい画面には周辺の全体図を小さい画面には交差点付近の詳しい情報を提示する。

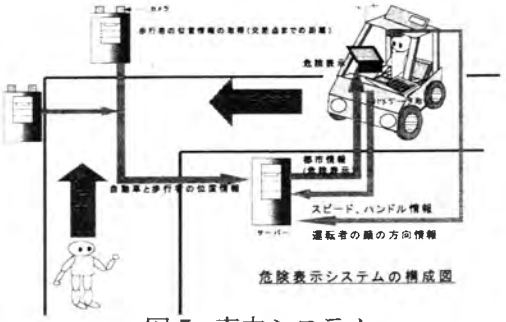


図 5. 車内システム

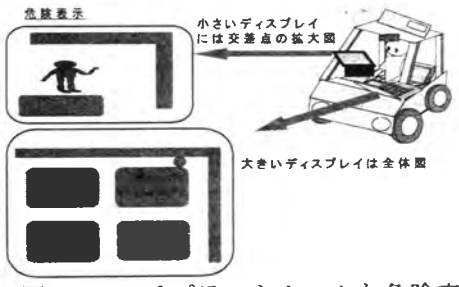


図 6. マルチプラットホームな危険表示

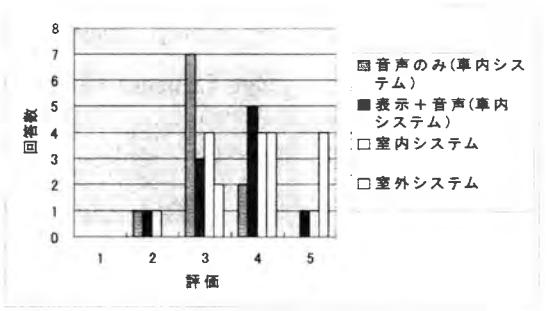


図 7. 実験結果

7. 人間中心型システムの評価

被験者 10 名に対して、室内、室外、車内システムを 5 段階で(5:有効,4:やや有効,3:普通,2:やや有効でない,1:有効でない)評価した。結果(図 7 に示す)は以下のようになった。

・室内システム 1:0 名,2:1 名,3:4,名 4:4 名,5:1 名
　室内システムの平均:3.5
・室外システム 1:0 名,2:0 名,3:2 名,4:4 名,5:4 名
　室外システムの平均:4.2
・車内システム
　音声のみ 1:0 名,2:1 名,3:7 名,4:2 名,5:0 名
　表示と音声 1:0 名,2:1 名,3:3 名,4:5 名,5:1 名
　音声のみの平均:3.1
　表示と音声の平均 3.6

結果より、システムの有効性を示す事ができた。

8. おわりに

携帯情報端末を用いた人間中心型のネットワークシステムを構築し、有効性を示す事が出来た。

今実験では被験者が 20 代工学部の学生であった、高齢者の方を被験者とし評価するとさらに高い評価が得られると思われる。

今後は対応するシチュエーションを増やし、様々な状況に対応できるシステムにしていく必要がある。

参考文献

[1]高羽禎雄、津川定之、藤井治樹、桑原雅夫:21 世紀の自動車交通システム 情報化・知能化・自律化へ，工業調査会，1998
[2]山口亨、谷萩隆嗣、萩原将文共著：ニューラルネットワークとファジィ信号処理，コロナ社，1998
[3]T.Yoshifuji : Human centered interface at cyber-agent system, ARTIFICIAL LIFE AND ROBOTICS, 7th, pp320~323, 2002
[4]T.Yoshifuji : Development of ITS simulator and Human vehicle,17th Fuzzy System Symposium,pp235~238,2001

連絡先

〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6
東京都立科学技術大学大学院
システム基礎工学専攻 山口研究室
大橋　邦博
電話：042-585-8641
FAX：042-585-8641
Email：k_ohashi@fml.ec.tmit.ac.jp

リアルマルチ情報のサポートによるヒューマンビークルシステム
The Human Vehicle System Get Support from Real-time

山口　亨**
Toru Yamaguchi

景　建平*
Jianping Jing

*東京都立科学技術大学 大学院工学研究科　システム基礎工学専攻
Systems Engineering Science, Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan Institute of Technology
**科学技術振興事業団さきがけ研究21
PRESTO, Japan Science and Technology Corporation (JST)

Abstract-In a progressively aging society, the number of elderly drivers is increasing quickly. There are 3 millions handicapped persons in Japan alone and around fifty percent peoples of them are physically handicapped. These people are limited in movement. For the purposed of building up a true MOMARAZASHON to support their social life, we believe the human vehicle system will play a very important role. In this paper, we proposed a safe human cooperation mobility system in collaboration with a cyber-city. And modeling a car warehousing support system of the human vehicle as an example. We are also included an experiment system at this presentation with video record.

１．はじめに

現在、わが国では、平均寿命の伸長と少子化の進行により急速度で高齢化社会が進展している。また、伸び率からいうと高齢ドライバの増加は更に大きく、技術的・社会的な両面での適切な対応がとられないと自動車交通、更には生活基盤がおかしくなってしまう事すら予想される。一方、わが国の障害者の数は 300 万人、そのうちの約半数が肢体不自由者で、移動に制約を持っている。彼らの社会生活を支え、真のモーマライゼーションをめざすという意味においても、自動車は重要な役割を果たすと考えられる。

２．福祉・防災サイバー都市としての自動車

前述のような社会的な情勢のなかで、自動車は高齢者、障害者の足として重要な存在である。また、日常的な自動車利用の大半は短距離で少人数の移動がほとんどである。この大きな割合を占める短距離移動用として必要十分な性能の車を用いれば、環境負荷を現在より低減させる事になり、駐車スペースを効率的に使う事が可能となる。また、災害時においても自動車が非難経路の妨げとなる可能性が減ると考えられる。こうした背景の中、日常生活から災害時の緊急支援までを視野に入れた、災害に強く、真の安心感を得る福祉・防災サイバー都市構築の実現が求められ、サイバー都市との連携による安全なヒューマン連携型モビリティシステムの構築が求められる。

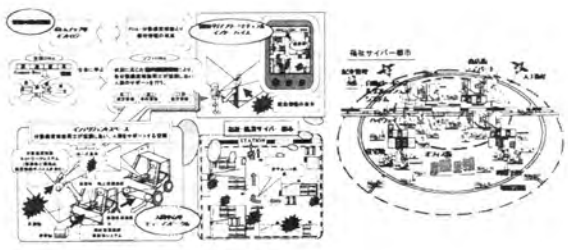


図１　福祉・防災サイバー都市

３．自動車庫入れ支援システム

３．１　システム構成

本研究では、ヒューマン連携型モビリティシステムの一例として、ヒューマンビークルの車庫入れという状況を想定し、運転者の車庫入れのサポートを行う。ヒューマンビークルエージェントはラスムッセンの階層知識構造をしており、大脳的なマクロ知識、小脳的なミクロ知識を持ち、ヒューマンビークルの制御機構のボトムアップ、トップダウン的処理が可能な機構を持つ。また、ヒューマンビークルの位置情報を外部から捉えるためのインテリジェントスペースを複数使用し、状況の変化に伴い、ソフト DNA（Soft computing oriented Date driven fuNctional scheduling Architecture）によりインテエリジェントスペースの役割を動的に機能発現する事で仕事を分担・協調し、集められた情報を再構成し、ヒューマンビークルの自動車庫入れを実現するとともに、人間に与える情報を状況に応じて変換し提供を行い、運転者の車庫入れをサポートする。[1][2][4]

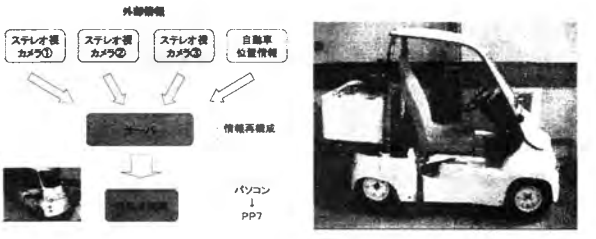


図２　システム構成

３．１機能発現機構とソフト DNA

ソフト DNA は、細胞が体のどの部分を形成するかという生体 DNA を模したアーキテクチャである。生体は主に４つのホメオボックスから発現するが、ソフト DNA は役割に応じた機能の知識を持っている。そして、その知識を格納したボックスを持ち、役割の種類分のボックスを一つにまとめたものがソフトＤＮＡである。各エージェントは共通のソフトＤＮＡを持ち、環境情報に

より発現し、群の中の自分の役割を担う。ソフトＤＮＡは一度発現して自分の役割が決まっても、さらに発現して他の役割を担うことが出来る柔軟性を持つ。[3]

３．２ヒューマンビークルのシステム構成

ヒューマンビークルはソフトDNAを組入れた、図３に示す構成により制御される。インテリジェントスペースを備えた複数のカメラより得られた外部情報及び、ヒューマンビークルからの制御情報より情報再構成を行い、ヒューマンビークルの位置情報を取得する。その位置情報より、車庫入れのための走行経路を生成し、ヒューマンビークルへ制御指令を送り、ヒューマンビークルの自動車庫入れを行う。

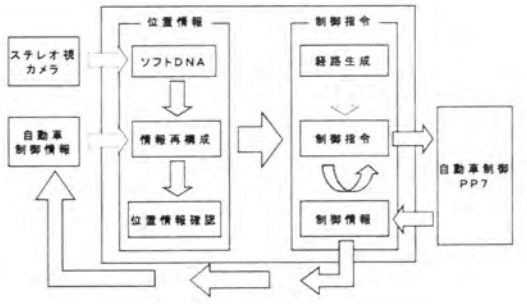


図３　ヒューマンビークル車庫入れ支援システム構成

４．実機実験

図４．１のような経路で自動車庫入れ走行を実施した。ヒューマンビークルの役割は自動車庫入れのために必要となる「経路１」、「経路２」、「経路３」の３種類となる。図４．２のようにインテリジェントスペースを備えたカメラを３箇所に設置する。このカメラからの外部環境情報、ヒューマンビークルからの制御情報をそれぞれ取得する。この時、その獲得出来た限られた情報をもとに、情報再構成をし状況に応じたヒューマンビークルの制御を行い、車庫入れを行う。

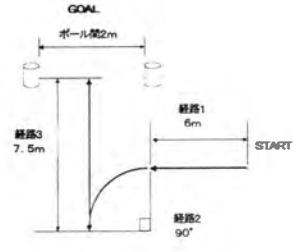


図４．１　経路図

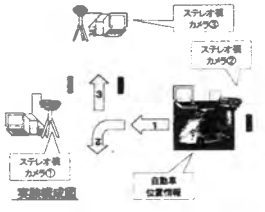


図４．２　実験構成図

車庫入れを行っている際、運転者には情報再構成された車庫入れ状況の表示を随時行う。運転者は表示画面よりヒューマンビークルの車庫入れの状況を常に把握する事が出来、人間などの障害物が現れたなどの要因により危険表示がされた時には、運転者がヒューマンビークルを緊急停止させる。

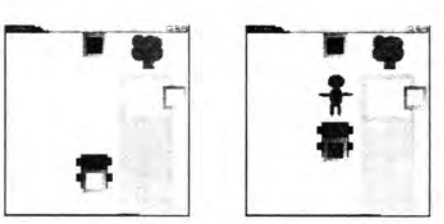


図５　表示画面（左：平常表示、右：危険表示）

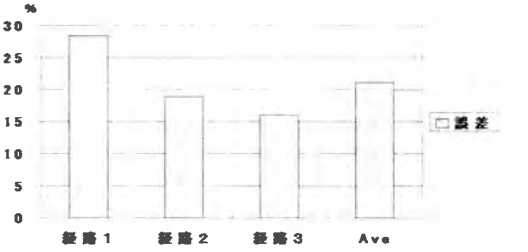


図６　経路誤差

図６にヒューマンビークルの車庫入れ時の各経路においての理想経路との経路誤差を示す。

５．おわりに

本研究では、取得した複数の外部情報を再構成することにより、ヒューマンビークルの自動車庫入れ支援システムを実現し、サイバー都市におけるのヒューマン連携型モビリティシステムの可能性を示した。

参考文献

[1] J.Rasmussen : Skills,Rules,and Knowledges; Signals,Signs,and Symbols,and Other Distinctions in Human Performance Models,IEEE Trans. on SMC, vol.13, 257-266 (1983)

[2] 山口亨　荻原将文　共著：ニューラルネットワークとファジィ信号処理　（コロナ社）(1998)

[3] 山口　亨：Cooperative Works for Welfare Support Agents using Soft DNA (FUZZ-IEEE'99) (1999)

[4] 渡邉　聖, 山口　亨：機能発現機構による人間支援システム (17 th Fuzzy System Symposium,pp261～264,2001)

連絡先

〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6
東京都立科学技術大学大学院
システム基礎工学専攻 山口研究室
景　建平
電話：042-585-8641
FAX：042-585-8641
Email：k.kei@iinuma-gauge.co.jp

対話型看護師勤務表作成支援システムのインタラクティブ性に関する一考察

A Study on Interactivity of Nurse Scheduling Support System

上野 尚樹　　古橋 武
Naoki Ueno　　Takeshi Furuhashi

三重大学
Mie University

Abstract The authors have developed an interactive scheduling support system using Interactive Evolutionary Algorithm (IEA). In the process of field testing, it has been found that the nurses-in-chief update the scheduling rules at every trial. The scheduling support system will be made interactive if it is designed to accept new rules in the search process, and to generate new schedules preserving the past modifications of parts of schedules done by the users. This paper proposes a method for remedying the sequences of shifts that violates the new rules inputted by the nurse-in-chief during the EA search. This paper also introduces a method to evaluate similarity between the newly generated schedules and the parent schedule that the nurse-in-chief has selected and modified. Experiments are done to evaluate the interactivity of the proposed system.

1　はじめに

本研究では、ナーススケジューリング問題(Nurse Scheduling Problem: NSP)に対話型進化的計算(Interactive Evolutional Algorithm: IEA)を適用し、解探索の過程に師長が関与しながら、師長とシステムが協調して勤務表作成を行う対話型看護師勤務表作成支援システムの開発を行っている[1]。現在、筆者らは実際にある病院の看護師長にモニターをお願いしてフィールドテストを進めている。その過程で明らかになってきたことは、勤務表作成の規則は実に煩雑であり、師長が事前にこれらの規則を全て把握することは困難なことである。本システムによる勤務表作成を3ヶ月間にわたり毎月1回試験的に行った過程で、師長は毎回新しい勤務表作成規則に気づきそれらを追加した。師長は具体的な勤務表案を見るまでは作成規則に気づかないことが多かった。勤務表作成支援システムに求められる機能で最も重要なものは、勤務表作成を進める過程で、作成規則の逐次更新を許容できる機能である。すなわち、看護師勤務表作成支援システムのインタラクティブ性は、規則の追加という環境変化に耐え、しかも、それまでの解探索結果を活かすことができる機能により高められる。

本論文では、勤務規則の変更に伴い発生する違反規則を速やかに改善するために、違反規則周辺を改善する手法、および、規則変更後もそれ以前の解探索結果を活かすために、勤務表の類似度に基づいた評価関数の切り替え法を提案する。評価規則の逐次追加の模擬実験を行い、勤務表候補数と解探索性能の関係について調べる。

2　ナーススケジューリング問題

看護師勤勤務表作成問題(NSP)は勤務制約，看護の質，各看護師からの要求等の制約の下で，「日勤」(AM 8:00～PM4:00)，「準夜勤」(PM4:00～AM0:00)，「深夜勤」(AM0:00～AM8:00)の3つの勤務形態を各看護師に割り付ける組合せ最適化問題である．勤務表の例を 図1に示す．この勤務表には，10 人(Staff A～J)の 14 日分の勤務日程が表されている．表中の記号 D は「日勤」，N は「準夜勤」，そして M は「深夜勤」を表している．勤務表中の空欄は休みを表している．一番左の列は各看護師の熟練の度合いを表し，熟練度の高い A から経験の浅い C にランク付けされている．下段の3つの行は各日の各勤務形態を割付けられた看護師数を表す．右側の4つの列は各看護師への各勤務の割付け日数を表す．

勤務表の制約には，勤務系列，各曜日の割付け勤務，必要人数，および割付け日数に関するものがある．勤務系列は一人の看護師に注目したときに、「日勤」→「深夜勤」や「日勤」→「休み」→「準夜勤」のように複数日にわたる勤務形態の系列のことであり，看護師の健康面で無理のない勤務形態の系列とする必要がある．各曜日の割付け勤務に関する制約は，例えば，「看護師 A は土曜日に準夜勤を割付けない」等，看護師の特殊性を反映した制約である．必要人数は，例えば深夜勤2人の内の1人は必ず熟練の看護師を割付ける等，看護の質を維持するための制約である．割付け日数は，看護師間で均等に割付けることが基本であるが，各看護師の事情や先月分の割付け日数も考慮し，広い視点で公平感を与える割付けを行う必要がある．さらに，現場では，看護師間の相性，アクシデントによる急な日程変更に対しても柔軟な対応が要求される．

		日付																		
熟練度	名前	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	日	準	深	休
A	Staff A	準	準		準	準	深	準		日	日	深	準		日	3	5	3	2
A	Staff B		日	日	深	日	日	深	準	深			日	深	準	3	5	3	4
A	Staff C		日	日	深		準		日	日	深		準	日	日	4	6	2	2
B	Staff D	日	深		日	深	準	日		準	準	日	深		日	3	5	3	3
B	Staff E	日	日	深		準	日	日	深		日	日		準	準	3	6	3	2
B	Staff F	日	日	深	準	準		日	日	深		準	日	日	深	2	6	3	3
B	Staff G	準		日	日	深		準	日	日	深	準	日	日	深	2	6	3	3
C	Staff H	日	深	日	準		日	日	深		準	日	日	深	準	2	6	3	3
C	Staff I	深		準	日	日	深		準	日	日	深		日		4	5	2	3
C	Staff J	深	準	日		日	日	深		準	日	日	深	準	日	2	5	4	3
	日	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4				
	準	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2				
	深	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2				

図1: 看護師勤務表の例

3 対話型看護婦勤務表作成支援システム

NSP は複雑な組合せ最適化問題であり、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)を用いた勤務表作成システムなど全自動型のスケジューリングシステムの開発が行われてきたが、現在まで普及には至っていない。この原因の一つとして、各病院における勤務表作成規則は煩雑であり、様々な配慮の下になされなければならないのに対して、従来システムは規則変更に柔軟性を欠いていたことが挙げられる[3]。実際、評価規則の設定漏れはよく見られる。勤務表が完成した後で今まで設定していなかった禁止パターンが初めて現れるケースは少なくない。勤務表を作成しながら規則の追加を許容する本システムが有効と期待される。

本研究では、対話型進化的計算(IEA)[2]に注目した。ただし、IEA は評価を行うユーザに負担を強いるため、ユーザとシステムが円滑に作業を行うための工夫が必要である。

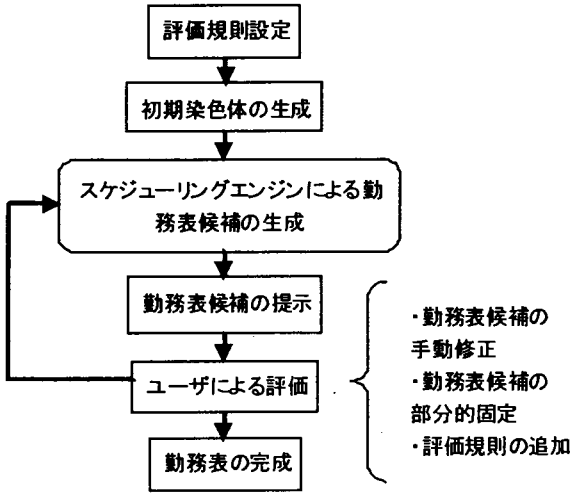


図2: 提案システムのフロー

4 本システム

4.1 本システムの概要

本システムは IEA を用い解探索の過程に師長が関与しながら、師長とシステムが協調して勤務表の作成を行う対話型看護師勤務表作成支援システムである。本システムのフローを図2に示す。

本システムは、図2の「スケジューリングエンジンによる勤務表候補の生成」において進化的計算により暫定解を計算する。ここで得られた暫定解に対し師長が「候補の選択」、「解候補の修正」および「評価規則の追加」を行い、解探索を繰り返す。

4.2 評価規則の追加後処理

勤務表を作成する際に評価規則の設定漏れは少なくない。勤務表作成の途中で評価規則の追加を行った場合、従来の対話型システムにおいては、その追加された評価規則を満たすような全探索がなされていたため、多くの計算時間を要し、さらに、それまでに探索してきた勤務表とは全く違ったものとなってしまうことが多く、せっかくのそれまでの探索結果が活かされないことが、問題であった。

本論文では、評価規則の追加後に新たに勤務違反になった箇所の近辺を修復する方法を提案する。この方法により、もう一度初めからスケジューリングをやり直さなくても、評価規則が追加された時点の勤務表をある程度残したまま解の探索を続行できる。この評価規則の追加後のアルゴリズムを以下に示す。

[アルゴリズム]

(I) 評価規則の追加により、勤務違反になった箇所を探す。
(II) 勤務違反が存在する最も早い日付を選択する。
(III) その日の周辺を未割付けで初期化する。
(IV) 未割付けのスタッフに対し、勤務系列違反、必要人員違反および、残りの必要人員数から、各シフトに対する割付け優先順位を計算する。
(V) IV で求めた優先順位が高いスタッフ数が最も少ないシフトを選択する。
(VI) V で選択したシフトを最も優先度の高いスタッフの中からランダムに選択したスタッフに割付ける。
(VII) 未割付けが存在しなくなるまで、IV～VI を繰り返す。
(VIII) 勤務系列違反が存在しなくなるまで、II～VII を繰り返す。このとき、勤務の平等性に関しては考慮していない。勤務系列の違反が存在しなくなれば、評価規則を満たしながら、勤務の平等性を満たすように調節する。

4.3 2軸パレート評価

本研究で2軸パレート評価を用いる理由は、師長に呈示する勤務表候補に多様性を持たせるため、そして、染色体群に多様性を持たせることで、交叉の際に似通った個体同士が組になることを抑えるためである。本手法では、トレードオフの関係にある割付け日数とそれ以外の評価項目の2つの評価軸を用いた。ただし、評価

規則の中には必ず満たさなければならない「絶対制約」と、勤務日数との兼ね合いで譲歩することのある「妥協制約」が存在する。そこで、絶対制約は双方の軸に加えることとし、評価関数を(1)～(6)式のように定義した。

$$H_1 = A + B \quad (1)$$
$$H_2 = A + C \quad (2)$$
$$H = A + B + C \quad (3)$$
$$A = 1 - 1 / (1 + a) \quad (4)$$
$$B = 1 - 1 / (1 + b) \quad (5)$$
$$C = 1 - 1 / (1 + c) \quad (6)$$

ここで、a は絶対制約違反数、b は妥協制約違反数、c は平均勤務日数からの差である。制約違反数とは、勤務表内の割付けに何らかの評価規則違反がある場合に1ずつ加算される。H_1、H_2 共にその個体より優れた個体が存在しない場合にその個体をパレート最適個体とする。染色体群がパレート最適個体で占められた場合、淘汰は(3)式の H の評価関数に従って行うこととした。

4.4 評価関数の切り替え

インタラクティブに解探索を進めるには、解探索の初期の段階では、師長の様々なニーズに合せるために、呈示する勤務表候補はできるだけ相互に類似度が低く多様性をもたせたものであるほうがよい。また、師長が呈示された勤務表に対して修正、固定、評価規則の追加を行うことで、解探索が進んだ段階では、それまでの操作を反映した勤務表候補を呈示できることが望ましい。師長が解探索に関与した後の探索では新しい勤務表候補はそれまでのものと類似度の高いものである方がよい。本稿では、類似度を表す評価関数 R を2軸パレート評価に付加する。ここで、(10)式の r は評価規則追加前の勤務表と評価規則追加後の処理を行った勤務表とを比較して、それぞれ勤務形態が一致していない箇所を足した合計の数である。この類似度を付加した評価関数を以下に示す。

$$H_1 = A + B + R \quad (7)$$
$$H_2 = A + C + R \quad (8)$$
$$H = A + B + C + R \quad (9)$$
$$R = 1 - 1 / (1 + r) \quad (10)$$

5 実験

本節では、提案手法である評価規則追加後の処理の有効性を検証するため実験を行った。

5.1 問題設定

実験には看護師数28人の病院の例を用い、1ヶ月間(31日)の勤務表を作成する実験を行った。実験に用いた評価規則の例を以下に示す。

禁止勤務系列
「準夜勤」→「深夜勤」（絶対制約）
「準夜勤」→「日勤」→「深夜勤」（妥協制約）
6日以上の連続勤務は禁止 （絶対制約）

各曜日の割付け規則
Staff A は日勤以外割り付けない。（妥協制約）
Staff A は土日休み。（妥協制約）

必要人員(全て絶対制約)
「準夜勤」にランクC同士の看護師を割り付けない。
「深夜勤」にランクC同士の看護師を割り付けない。
「準夜勤」に1人以上ランクAの看護師を割り付ける。
「深夜勤」に1人以上ランクAの看護師を割り付ける。

割付け日数
Staff A 以外は出来るだけ公平に割り付ける。

今回の実験においては、評価規則の追加後の処理の有効性を示すため、以下の評価規則を逐次追加する。
1回目：深夜勤、深夜勤を絶対禁止とする。
2回目：遅出、深夜勤を絶対禁止とする。
3回目：日勤、深夜勤、日勤、深夜勤のパターンを絶対禁止とする。
4回目：日勤、深夜勤、日勤、日勤、深夜勤のパターンを絶対禁止とする。

染色体群内の個体数 N = 1、4、8 について、上記の実験を繰り返した。

5.2 評価規則追加後の処理の効果

評価規則追加後の処理の効果について実験を行った。上記の毎回の評価規則追加後には4.2節の処理を1回、つまり勤務系列違反が無くなるまで4.2節の処理を施した。

染色体群の個体数を 1、4、8 と変えて、ランダムシードを変えてそれぞれ50回試行し、そのときの禁止勤務系列違反数、必要人員不足数、平均勤務日数からの差の合計を違反数とし、初期個体からの違反数の推移を調べた。図 3 は違反数の50回の試行の平均値の推移を示す。ここで、染色体群の個体数が複数の場合は、最良個体の値について示す。図4は 4.2節の処理を施した場合と施さなかった場合とを比較した違反数の50回の試行の平均値の推移を示す。ここで、染色体群の個数は4 とし、最良個体の値について示す。

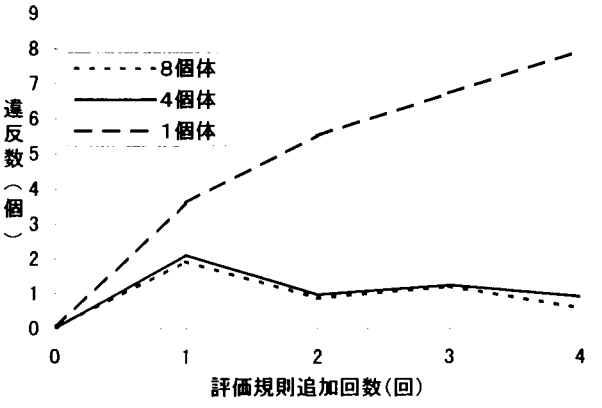


図 3：評価規則追加後処理後の違反数

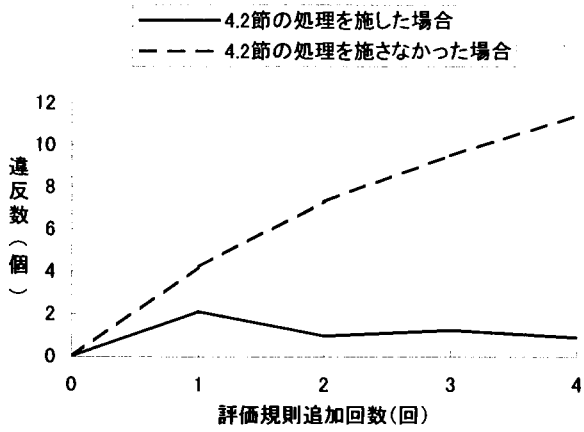


図4：染色体群4個体の場合における評価規則追加後処理を施した場合と施さなかった場合の違反数

実験結果は、染色体群の個体数が多いほど、評価規則を追加しても違反数は増えないという予想通りの結果を得た。一方、個体数が1の場合、評価規則を追加するたびに違反数は増えてしまい、減らすことはできないケースが多く見られた。また、4.2節の処理を施さなかった場合には評価規則を追加するにつれて違反数が増加し続けてしまうが、4.2節の処理を施すことで違反数の増加を防ぐことができた。

5.3 評価関数切り替えの効果

評価関数を切り替えた場合と切り替えない場合の勤務表を比較した結果を表1に示す。表1は評価規則を追加する前の勤務表と、4つの評価規則の追加を行い評価規則追加後の処理を行った結果得られた勤務表とを比較し、それぞれの勤務形態が一致していない数を示す。染色体群の個体数を1、4、8と変えて、ランダムシードを変えてそれぞれ50回試行し、その平均値を示す。

表1：評価関数の切り替えを行う場合と行わない場合の勤務形態の一致していない数

	評価関数切り替えあり	評価関数切り替えなし
個体数1	401.5	682.5
個体数4	318.5	696.4
個体数8	216.4	676.3

以上の結果より、評価関数を切り替えることにより、呈示された勤務表とできるだけ類似した勤務表を得ることができた。評価関数を切り替えない場合は、2軸パレート評価に基づいて解探索がなされるので勤務表の多様性はあるが、規則追加前の勤務表との類似性はほとんど見られなかった。

6 まとめ

看護師勤務表作成支援システムのインタラクティブ性は、規則の追加という環境変化に耐え、しかも、それまでの解探索結果を活かすことができる機能により高められる。

本論文では、勤務規則の変更に伴い発生する違反規則を速やかに改善するために、違反規則周辺を改善する手法、および、規則変更後もそれ以前の解探索結果を活かすために、勤務表の類似度に基づいた評価関数の切り替え法を提案した。今回の実験結果は、評価規則追加後の処理において、個体数が多ければ違反数の数が平均して1、2個程度に抑えられるというものであった。しかし、特定の規則追加の限定された実験であり、適切な個体数の決定には、フィールドテストの結果を待たなければならない。

更に、評価関数の切り替えにより、勤務表作成規則の更新後には、更新前の勤務表におけるそれまでの看護師の修正を反映した勤務表を作成できる可能性を示すことができた。この効果も、フィールドテストを通して検証していきたい。

参考文献

[1] 井上，古橋，前田，高羽「バクテリア進化アルゴリズムを用いた対話型看護婦勤務表作成支援システムに関する一考察」電気学会論文誌C，Vol.112-C, No.10, pp.1803-1811, 2002

[2] ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」，1996

[3] 川中、山本、吉川、篠木、鶴岡「遺伝的アルゴリズムを用いた看護婦勤務表の自動生成～制約条件を取り入れたコーディング法と遺伝的演算～」電気学会論文誌C、平成14年6月号

[問い合わせ先]

〒 514-8507
三重県津市上浜町 1515
三重大学大学院 工学研究科
情報工学専攻 パターン情報処理研究室
上野 尚樹
Tel: 059-231-9746, Fax: 059-231-9746
E-mail: ueno@pa.info.mie-u.ac.jp

議会情報公開のためのストリーミングコンテンツ作成支援システム

A Support System of Streaming Media Content Building for Free Access Policy to Council Information

渡邊　俊彦[+]　○南　智之[+]　藤岡　亮介
Toshihiko Watanabe　Tomoyuki Minami　Ryosuke Fujioka
[+]大阪電気通信大学大学院　神戸綜合速記株式会社
[+]Graduate School, Osaka Electro-Communication University　Kobe Sogo Sokki Co. Ltd.

Abstract: Recently it is reasonable to stream video contents according to the broadband popularization. In administrative organizations the importance of free access policy to council information, such as a broadcast of convention, enrich their WEB pages, etc., has been widely recognized. This paper describes a support system of streaming media content building for free access policy to council information. The content includes video contents of a convention and superimposed dialogue of speech text. Through numerical experiments the system is found to be effective for the work of media contents building.

1．はじめに

近年 ADSL 等によるラスト1マイルの高速化、大容量ハードディスク、高速な CPU といったハードウェアの低価格化、ソフトウェアの高性能化によって、これまで困難であったマルチメディアコンテンツのストリーミング配受信が個人でも比較的容易に行えるようになってきた。しかし、良質のマルチメディアコンテンツの作成には多大な労力を要するという問題がある。

一方、自治体においては、近年ますます情報公開が求められ、WEB ページの充実などの取り組みが継続的になされているが、より積極的に議会情報などを県民・市民に公開することが積年の課題となっている。

本研究では、自治体の議会の模様をオンデマンド型のコンテンツとして公開するための方法とそのコンテンツの自動作成技術の開発を目的とする。具体的には自治体の議会の模様をオンデマンド型シンクロナイズド・マルチメディアのストリーミング・コンテンツとして自動生成するシステムを設計開発し、コンテンツの作成負荷の軽減と、より質の良いストリーミング・コンテンツの作成を支援することを目的とする。

2．システム構成

議会映像を公開するシステムを開発するにあたって、我々は速記士によって作成されている会議録を同時に表示することを考えた。地方自治体で作成されている会議録は、ほぼ忠実に発言内容に沿って作成されており、その検索システム[1]の公開も進められている。映像と音声だけの情報を配信するよりも、実際の発言内容が文字情報で与えられた方が、一般のユーザーにとっても理解しやすく、かつハンディキャップのある人にとっては不可欠な情報である。また、文字情報をビデオと同期させて字幕方式で表示させることにより、更に理解しやすいものとなる。

テレビのニュース音声などの極めて条件の良い場合に音声認識技術による同時字幕表示が試みられているが[2]、本研究で対象としたのは、一般の議会の音声であり、国会中継などでもわかるように、同時発言やノイズなど音声処理が非常に困難な対象であるため、音声認識技術の開発は次の段階の開発課題とした。

議会の各発言者の発言開始時刻が記録されている場合は、その情報を用いて文章の文字数によって按分し、各発言文の発言時刻を決定する。実際のデータで確認した所、ほとんど違和感のない同期が実現できることが確認できている。発言時刻の記録がない場合には、音声信号処理とケプストラムによる話者識別を行って各発言者の発言時刻を決定する。

システム構成を図1に示す。ビデオ映像をエン

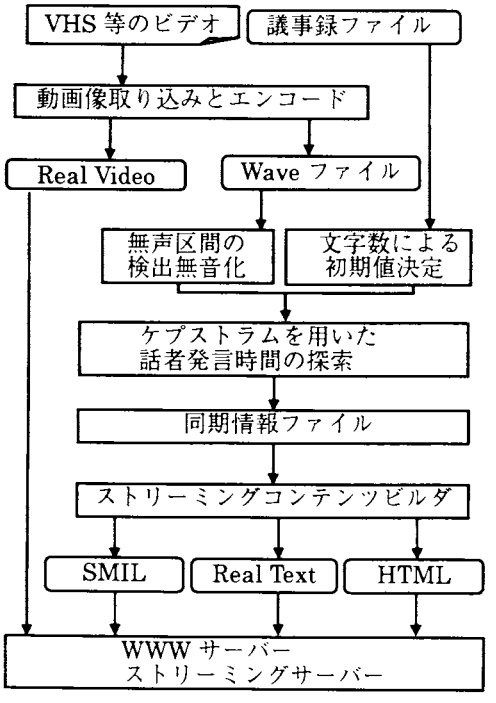


図1　コンテンツ作成支援システム構成

コードし、会議録テキストファイルを元に同期情報を作成していく。図中ストリーミングコンテンツビルダは開発したモジュールで、同期情報を基にして、SMIL ファイル、Real Text ファイル、HTML ファイルを自動的に生成する。

3．音声信号処理による無声区間の抽出

議会音声ファイルには、無声区間やノイズなどが含まれている。また、無声区間と発言者の「間」は区別する必要がある。

そこで、信号パワーの絶対値が音声信号全体の標準偏差の 2 倍以内で 0.7 秒以上継続する箇所を無声区間候補として検出する。検出された候補が 0.5 秒以内に隣接する場合は 1 つの無声区間として結合する。結合した結果が 3 秒以上続く場合を無声区間として検出する。

この無声区間の抽出処理を実際の議会データに適用したところ、正しく検出できていることを確認した。これにより、後述の話者識別の精度が向上し、また、字幕コンテンツ表示の同期の精度が向上する。

4．ケプストラムを用いた話者発言位置の特定

話者発言時刻の初期値は音声ファイルの全体の時間を発言文字バイト数で内分して求める。ケプストラムは前後 5 秒間の 11 秒間の長時間スペクトルを逆フーリエ変換して算出し、20 次までのデータを特徴量ベクトルとした。

話者識別の評価関数を、各話者の特徴量ベクトル(ケプストラム)の集合のその重心からの距離の自乗和の総和とする。この評価はクラスタリングで用いられる群内変動の評価と同じである。すなわち、特徴量ベクトルが各話者毎に適切に分類されていれば評価値が小さくなる。

各話者の発言開始時刻を決定変数として、識別評価関数を最適化する探索を行う。探索は、20 秒程度から 10 秒～1 秒と段階的に探索の幅を狭めながら行う。

まず、1 分程度の音声データで 2 人の発言者に対してテストし、正しく識別できることを確認した。次に大規模な実際の議会データ(約 5 時間、発言者数 24 名)に対して本技術を適用した。

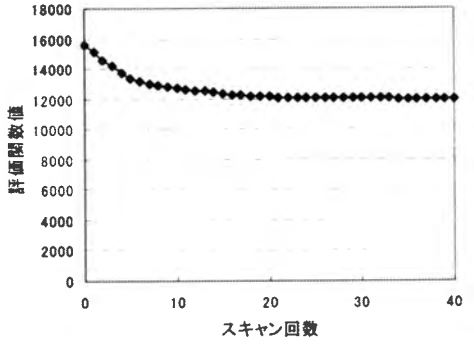


図 2　探索時の評価関数値の推移

評価関数の減少の様子を図 2 に示す。また、時刻の推定精度は 30%改善できた。しかし、長時間のデータであることから中間の発言時刻での誤差が残る傾向にあった。これは中間での主要な発言時刻の一部を指定しておくなどの方法で十分対処できる。

5．コンテンツ画面の例

本システムで作成されたストリーミングコンテンツ画面の構成例を図 3 に示す。

会議録の字幕表示をはじめとして、発言者のプロフィールの同期表示や別の発言へのリンクやシークなどの機能を実現している。

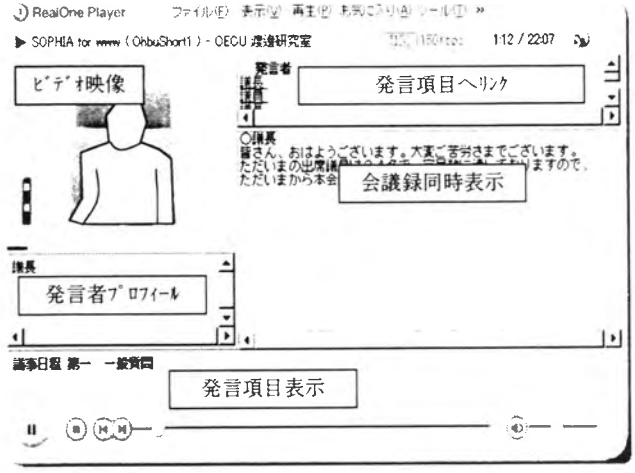


図 3　コンテンツ画面の構成例

6．おわりに

本報告では、自治体の議会の模様をオンデマンド型のコンテンツとして公開するための方法とそのコンテンツの作成支援技術の開発を行った。支援システムを開発し、議会データに適用した結果、その有効性が確認できた。今後は、実際の運用を考慮したシステムのブラッシュアップに取り組む予定である。

参考文献

[1] 検索システム「SOPHIA」(神戸綜合速記株式会社ホームページ)：http://www.sogosokki.co.jp

[2] A.Ando, et al. : “Simultaneous Subtitling System for Broadcast News Programs with a Speech Recognizer”, *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, Vol.E86-D, No.1, pp.15-25, 2003.

連絡先：

〒572-8530
大阪府寝屋川市初町 18-8
大阪電気通信大学 工学部第一部電子工学科
渡邊俊彦
電話: 072-824-1131(代表)
FAX: 072-824-0014(代表)
Email: t-wata@isc.osakac.ac.jp

Granular推論とズーム・イン・ズーム・アウト演算

Granular Reasoning and Opetarions of Zooming In and Out

村井 哲也　ジェルマーノ・レスコーニ
Tetsuya MURAI　Germano RESCONI
北海道大学　カトリック大学
Hokkaido Univ.　Catholic Univ., Brescia

Abstract: The concept of granular computing is applied to propositional reasoning. Such kind of reasoning is called granular reasoning in this paper. For the purpose, two operations called zooming in and out is introduced to reconstruct granules of possible worlds.

1 はじめに

近年のラフ集合 [5] と granular 計算 [2, 7] の発展を背景に，筆者らは様相論理のろ過法 [1] による granular 推論の一方法を文献 [3] で検討し，仮言三段論法を定式化した．本論文では次のステップとして，ズーム・イン・アウトと呼ぶ二つの演算を導入して，命題論理の推論を定式化する．これらの演算は筆者らが提案した様相論理に基づく意味的場の理論 [6] における局所的および大域的可能世界を扱う方法を演算化したものである．

2 Granular化された可能世界

高々可算無限の原子文の集合$\mathfrak{P}$に対して，**命題信念様相論理の言語**$\mathfrak{L}_{\mathrm{BL}}(\mathfrak{P})$ を$\mathfrak{P}$から論理演算子T(恒真定数), $\bot$(恒偽定数), $\neg$(否定), $\wedge$(連言), $\vee$(選言), $\rightarrow$(実質含意), $\leftrightarrow$(実質同値), B(信念様相) を使って文の集合として通常通り生成する．様相演算子 B を含まない文を**非様相文**とよぶ．**Kripke モデル** $\mathfrak{M}$ とは組 $\langle U, R, V\rangle$ であり，W は可能世界の非空集合，R は W 上の二項関係，V は原子文の各世界での真偽を与える付値関数である．V から関係 $\models$ を通常通り拡張する．文 p のモデル $\mathfrak{M}$ における**真理集合**は $\|p\|^{\mathfrak{M}} = \{x \in U \mid \mathfrak{M}, x \models p\}$ である．

次に，命題論理の推論を表現する具体的な Kripke モデルを定義する．高々可算無限の原子文の集合 $\mathfrak{P}$ に対して，可能世界の集合 $U_{\mathfrak{P}}$ を $\mathfrak{P}$ のべき集合とし，その元を**基本世界**と呼ぶ: $U_{\mathfrak{P}}=2^{\mathfrak{P}}$. 各原子文 $\mathsf{p}\in\mathfrak{P}$ と基本世界 $x\in U_{\mathfrak{P}}$ に対して，付値関数 $V_{\mathfrak{P}}$ は自然に定義できる: $V_{\mathfrak{P}}(\mathsf{p}, x)=1$ iff $\mathsf{p}\in x$. $U_{\mathfrak{P}}$ 上の二項関係 R を任意に与えれば，一つの Kripke モデルを得る: $\mathfrak{M}_{\mathfrak{P}}=\langle U_{\mathfrak{P}}, R, V_{\mathfrak{P}}\rangle$.

推論過程の各ステップでは通常，有限個の文にのみ関心があるので，一般に集合 $U_{\mathfrak{P}}$ は推論を進めるに際して巨大過ぎる．よって，$U_{\mathfrak{P}}$ を granular 化する何らかの方法が必要である．我々の以前の論文 [3] における方法は**商集合**の適用であり，様相論理の決定問題を解く基本的方法である**ろ過法**を参考にしたものである．

Γ を推論に関係する非様相文の集合とすると，推論に必要な原子文の集合が $\mathfrak{P}_\Gamma=\mathfrak{P}\cap\mathrm{sub}(\Gamma)$ で定義できる．ここで，$\mathrm{sub}(\Gamma)$ は Γ の元の部分文の集合たちの結びである．$\mathfrak{P}_\Gamma$ に基づいて可能世界間の一致関係 $\sim_\Gamma$ を $x\sim_\Gamma y$ iff $\forall \mathsf{p}\in\mathfrak{P}_\Gamma[V(\mathsf{p},x)=V(\mathsf{p},y)]$ で定義できる．一致関係は明らかに同値関係なので，商集合 $U_\Gamma=U_{\mathfrak{P}}/\sim_\Gamma$ を生成する．この商集合の元を Γ **の下で granular 化された世界**と呼ぶ．$\mathfrak{P}_\Gamma$ の原子文 p と graniular 化された世界 $X\in U_\Gamma$ に対して，新たな付値関数が $V_\Gamma(\mathsf{p}, X)=1$ iff $\mathsf{p}\in\cap X$ で定義できる．なお，全単射 $\psi: U_\Gamma\rightarrow 2^{\mathfrak{P}_\Gamma}$ が $\psi(X)=\cap X$ で定義できることを注意する．

3 ズーム・イン・アウト演算

我々が推論を進める時，あるステップで対象となる非様相文の集合を Γ とする時，Γ をそのステップでの**焦点**，その要素を**焦点要素**と呼ぶ．焦点の変化に伴って可能世界の集合も再構成する必要が生じる．Γ を現ステップでの焦点，Δ を次のステップでの焦点とする．

まず，単純な入れ子の場合を考えよう:

(a) $\mathfrak{P}_\Gamma\supseteq\mathfrak{P}_\Delta$ の場合は，granular 化が必要である．これは写像 $\mathfrak{I}^\Gamma_\Delta : U_\Gamma \rightarrow U_\Delta$ で表現し，各 $X \in U_\Gamma$ に対して，$\mathfrak{I}^\Gamma_\Delta(X)\stackrel{\mathrm{df}}{=}\{x \in U \mid x \cap \mathfrak{P}_\Delta = (\cap X) \cap \mathfrak{P}_\Delta\}$ と定義する．これを Γ **から** Δ **へのズーム・イン**と呼ぶ．

(b) 逆に，$\mathfrak{P}_\Gamma \subseteq \mathfrak{P}_\Delta$ である時，granular 化の逆演算が必要である．それは写像 $\mathfrak{O}^\Gamma_\Delta : U_\Gamma \rightarrow 2^{U_\Delta}$ で表現し，$\mathfrak{O}^\Gamma_\Delta(X)=\{Y \in U_\Delta \mid (\cap Y) \cap \mathfrak{P}_\Gamma = \cap X\}$ と定義する．これを Γ **から** Δ **へのズーム・アウト**と呼ぶ．

二焦点 Γ と Δ が入れ子でない場合，Γ から Δ へ焦点が移ることに付随する世界集合の再構成はズーム・イン・アウトの組み合わせで表現する: $\mathfrak{I}^{\Gamma\cup\Delta}_\Delta \circ \mathfrak{O}^\Gamma_{\Gamma\cup\Delta} : U_\Gamma \rightarrow 2^{U_\Delta}$.

今述べたズーム・イン・アウトの演算は世界集合から世界集合へ定義したが，これをモデル間の演算に拡張する．Kripke モデル $\mathfrak{M}_\Gamma=\langle U_\Gamma, R_\Gamma, V_\Gamma\rangle$ が与えられた時，$B_{\mathfrak{M}_\Gamma}(X)\stackrel{\mathrm{df}}{=}\{X' \in U_\Gamma \mid X R_\Gamma X'\}$, for X in U_Γ を定義す

る. 各世界で同じ集合の時, 単に $B_{\mathfrak{M}_\Gamma}$ と書く.

(a) $\Gamma \supseteq \Delta$ の時, Γ から Δ へのズーム・インを次のように拡張する : $\mathfrak{I}^\Gamma_\Delta(\mathfrak{M}_\Gamma) \stackrel{\text{df}}{=} \langle U_\Delta, R_\Delta, V_\Delta \rangle$. ここで, $Y_i R_\Delta Y_j$ iff $Y_j \in \mathfrak{I}^\Gamma_\Delta(\cup\{B_{\mathfrak{M}_\Gamma}(X) \mid X \in U_\Gamma \text{ and } \mathfrak{I}^\Gamma_\Delta(X) = Y_i\})$ である.

(b) $\Gamma \subseteq \Delta$ の時, Γ から Δ へのズーム・アウトを次のように拡張する : $\mathfrak{O}^\Gamma_\Delta(\mathfrak{M}_\Gamma) \stackrel{\text{df}}{=} \langle U_\Delta, R_\Delta, V_\Delta \rangle$. ここで, $Y_i R_\Delta Y_j$ iff $Y_j \in \mathfrak{O}^\Gamma_\Delta(B_{\mathfrak{M}_\Gamma}((\mathfrak{O}^\Gamma_\Delta)^{-1}(Y_i)))$ である.

(c) 入れ子でない場合は二つのモデル $\mathfrak{M}_\Gamma, \mathfrak{M}_\Delta$ の**マージ**という概念が必要である. まず, $\mathfrak{P}_\Gamma = \mathfrak{P}_\Delta$ である時は, それらのマージ $\mathfrak{M}_\Gamma \circ \mathfrak{M}_\Delta$ は組 $\langle U_\Gamma, R, V_\Gamma \rangle$ であり, ここで, $X_i R X_j$ iff $X_j \in B_{\mathfrak{M}_\Gamma}(X_i) \cap B_{\mathfrak{M}_\Delta}(X_i)$ である. 次に, $\mathfrak{P}_\Gamma \neq \mathfrak{P}_\Delta$ の場合のマージに拡張する. もし, $\mathfrak{P}_\Gamma \supset \mathfrak{P}_\Delta$ ならば, $\mathfrak{M}_\Gamma \circ \mathfrak{M}_\Delta \stackrel{\text{df}}{=} \mathfrak{M}_\Gamma \circ \mathfrak{O}^\Gamma_\Delta(\mathfrak{M}_\Delta)$ とし, もし $\mathfrak{P}_\Gamma \subset \mathfrak{P}_\Delta$ ならば, $\mathfrak{M}_\Gamma \circ \mathfrak{M}_\Delta \stackrel{\text{df}}{=} \mathfrak{O}^\Gamma_\Delta(\mathfrak{M}_\Gamma) \circ \mathfrak{M}_\Delta$ とする. 以上以外の場合は $\mathfrak{M}_\Gamma \circ \mathfrak{M}_\Delta \stackrel{\text{df}}{=} \mathfrak{O}^\Gamma_{\Gamma\cup\Delta}(\mathfrak{M}_\Gamma) \circ \mathfrak{O}^\Delta_{\Gamma\cup\Delta}(\mathfrak{M}_\Delta)$ と定義する.

4 ズーム・イン・アウト演算と granular 推論

Chellas[1] によると, 命題論理の推論の一般形は

$$\textbf{RPL. } p_1, \cdots, p_n / p,$$

で与えられる. ただし, p は $p_1, \cdots, p_n$ の論理的帰結である. さて, $\Gamma = \{p_1, \cdots, p_n\}$ とおく. モデル $\mathfrak{M}^\Gamma_\mathfrak{P}$ を組 $\langle U_\mathfrak{P}, B_{\mathfrak{M}^\Gamma_\mathfrak{P}}, V_\mathfrak{P} \rangle$ として定義する. ここで, $B_{\mathfrak{M}^\Gamma_\mathfrak{P}} \stackrel{\text{df}}{=} \bigcap_{i=1}^n \|p_i\|^{\mathfrak{M}^\Gamma_\mathfrak{P}}$ であり, これから二項関係を xRx' iff $x' \in B_{\mathfrak{M}^\Gamma_\mathfrak{P}}$ で定義できる. 文 p が **RPL** の結論であるための必要十分条件は $((p_1 \wedge \cdots \wedge p_n) \rightarrow p)$ がトートロジーであることである. これは $B_{\mathfrak{M}^\Gamma_\mathfrak{P}} = \bigcap_{i=1}^n \|p_i\|^{\mathfrak{M}^\Gamma_\mathfrak{P}} \subseteq \|p\|^{\mathfrak{M}^\Gamma_\mathfrak{P}}$ が成り立つことを意味する. よって, p が **RPL** の結論であるためには $\mathfrak{M}^\Gamma_\mathfrak{P} \models \mathsf{B}p$ であること, すなわち, p がそのモデルで信じられていることが必要十分である. 一般には, p の真理集合が無限なら, p が信じられているかどうかは有限的に判断できない.

次に, $\mathfrak{M}_\Gamma \stackrel{\text{df}}{=} \mathfrak{I}^\mathfrak{P}_\Gamma(\mathfrak{M}^\Gamma_\mathfrak{P}) = \langle U_\Gamma, R_\Gamma, V_\Gamma \rangle$ のズーム・インを構成する. 文 p に対して, p が **RPL** の結論であるかないかを知ることは, $\|p\|^{\mathfrak{M}_\Gamma}$ が $B_{\mathfrak{M}_\Gamma}$ を含むかどうかを確認することに帰着する. ズーム・インされたモデルでは, どんな真理集合も有限だから, 原理的に確認できる.

最後に, 命題論理の推論をズーム・イン・アウトの組み合わせによる動的な過程として記述する. 文 p が $p_1, \cdots, p_n$ の結論となるかどうかを例に取ろう :

Step 1 $\mathfrak{M}^{\{p_1\}}_\mathfrak{P}$ から $\mathfrak{M}_{\{p_1\}} = \mathfrak{I}^\mathfrak{P}_{\{p_1\}}(\mathfrak{M}^{\{p_1\}}_\mathfrak{P})$ にズーム・インして, $\mathfrak{M} \leftarrow \mathfrak{M}_{\{p_1\}}$ とおく.

Step 2 $\mathfrak{M}^{\{p_2\}}_\mathfrak{P}$ から $\mathfrak{M}_{\{p_2\}} = \mathfrak{I}^\mathfrak{P}_{\{p_2\}}(\mathfrak{M}^{\{p_2\}}_\mathfrak{P})$ にズーム・インして, $\mathfrak{M} \leftarrow \mathfrak{M} \circ \mathfrak{M}_{p_2}$ とおく.

$(\mathfrak{M} = \mathfrak{O}^{\{p_1\}}_{\{p_1,p_2\}}(\mathfrak{I}^\mathfrak{P}_{\{p_1\}}(\mathfrak{M}^{\{p_1\}}_\mathfrak{P})) \circ \mathfrak{O}^{\{p_2\}}_{\{p_1,p_2\}}(\mathfrak{I}^\mathfrak{P}_{\{p_2\}}(\mathfrak{M}^{\{p_2\}}_\mathfrak{P}))$.)

.....

Step n $\mathfrak{M}^{\{p_n\}}_\mathfrak{P}$ から $\mathfrak{M}_{\{p_n\}} = \mathfrak{I}^\mathfrak{P}_{\{p_n\}}(\mathfrak{M}^{\{p_n\}}_\mathfrak{P})$ へズーム・インして, $\mathfrak{M} \leftarrow \mathfrak{M} \circ \mathfrak{M}_{\Gamma\setminus\{p_n\}}$ とおく.

$(\mathfrak{M} = \mathfrak{O}^{\Gamma\setminus\{p_n\}}_\Gamma(\mathfrak{M}_{\Gamma\setminus\{p_n\}}) \circ \mathfrak{O}^{\{p_n\}}_\Gamma(\mathfrak{M}_{\{p_n\}})$.)

Step $n+1$ もし $\mathfrak{P}_p \not\subseteq \mathfrak{P}_\Gamma$ ならば, $\mathfrak{M}_{\Gamma\cup\{p\}}$ にズーム・アウトして, $\mathfrak{M} \leftarrow \mathfrak{M}_{\Gamma\cup\{p\}}$ とおく.

Step $n+2$ $\mathfrak{M}$ から $\mathfrak{M}_{\{p\}} = \mathfrak{I}^\Gamma_{\{p\}}(\mathfrak{M})$ にズーム・インする.

Step $n+3$ p が $\mathfrak{M}_{\{p\}}$ で信じられているかどうか, すなわち, $\|p\|^{\mathfrak{M}_{\{p\}}}$ が $B_{\mathfrak{M}_{\{p\}}}$ を含むかどうか確認する.

以上から, 次を得る :

$\mathfrak{M}_{\{p\}} = \mathfrak{I}^\Gamma_{\{p\}}(\mathfrak{O}^{\Gamma\setminus\{p_n\}}_\Gamma(\mathfrak{M}_{\Gamma\setminus\{p_n\}}) \circ \mathfrak{O}^{\{p_n\}}_\Gamma(\mathfrak{M}_{\{p_n\}}))$, または
$= \mathfrak{I}^{\Gamma\cup\{p\}}_{\{p\}}(\mathfrak{O}^\Gamma_{\Gamma\cup\{p\}}(\mathfrak{O}^{\Gamma\setminus\{p_n\}}_\Gamma(\mathfrak{M}_{\Gamma\setminus\{p_n\}}) \circ \mathfrak{O}^{\{p_n\}}_\Gamma(\mathfrak{M}_{\{p_n\}})))$.

5 おわりに

本論文では, 命題論理の推論をズーム・イン・アウトの演算で動的に定式化した. 各推論の各ステップでは, その場面に必要最小限な数にパックされた可能世界の granule たちのみを利用することを示した. 別の論文 [4] では, より一般に, アリストテレスの三段論法 (定言三段論法) を扱っている. 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費基盤研究 (B) No.14380171 の援助を得た.

文 献

[1] Chellas,B.F. (1980): *Modal Logic: An Introduction.* Cambridge University Press.

[2] Lin,T.Y. (1998): Granular Computing on Binary Relation, I & II. *L.Polkowski et al.(eds.), Rough Sets in Knowledge Discovery 1: Methodology and Applications*, Physica-Verlag, 107-121, 122-140.

[3] Murai,T., M.Nakata, Y.Sato (2001): A Note on Filtration and Granular Reasoning, T.Terano et al.(eds.), New Frontiers in Artificial Intelligence, LNAI 2253, Springer, 385-389.

[4] Murai,T., G.Resconi, M.Nakata, Y.Sato (2003): Granular Reasoning Using Zooming In & Out: Part 2. Aristotle's Categorical Syllogism. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Vol.82, Issue.4.

[5] Pawlak,Z. (1991): *Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data.* Kluwer.

[6] Resconi,G., T.Murai, M.Shimbo (2000): Field Theory and Modal Logic by Semantic Fields to Make Uncertainty Emerge from Information. Int. J. of General Systems, 29(5), 737-782.

[7] Skowron,A.(2001): Toward Intelligent Systems: Calculi of Information Granules. Terano et al.(eds.), New Frontiers in Artificial Intelligence, LNAI 2253, Springer, 251-260, 2001.

連絡先:
村井 哲也
〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目
北海道大学 大学院工学研究科
システム情報工学専攻 数理情報工学講座
Phone & Fax: 011-706-6757
E-mail: murahiko@main.eng.hokudai.ac.jp

Granular 推論とファジィ推論

Granular and Fuzzy Reasoning

村井 哲也 Tetsuya MURAI 北海道大学 Hokkaido Univ.
ヒュン・ヤン・ナム Van Nam HUYNH 北陸先端科学技術大学院大学 JAIST
工藤 康生 Yasuo KUDO 室蘭工業大学 Muroran Inst. of Tech.

Abstract: This paper aims to discuss how reasoning processes are represented in terms of granularization of possible worlds. Firstly, processes of classical inference are formulated from a point of view of reconstructing Kripke-style models. The essential point of the reconstruction is that some possible worlds are amalgamated to generate granules of worlds and vice versa. Next, the idea is applied for fuzzy reasoning processes by considering fuzzy sets as fuzzily granularized possible worlds. One of advantages in the approach is that linguistic truth values with linguistic hedges are naturally introduced.

1 はじめに

人間の情報処理能力には目的や対象に応じて，適切なgranulariry(cf.Zadeh[12]) のレヴェルを設定して，処理に関わる無駄を軽減する働きが観察される．実際，granularity は種々の分野で陽に，また，そう呼ばれなくとも，陰に考察されている (cf.Lin[4])．その granularity を情報システムの重要な要素として正面切って研究対象とするのが granular 計算 [4, 7] の分野であり，Pawlak のラフ集合 [6] の理論に基づいて体系化される場合が多い．筆者らは前論文で [5]，古典的推論に granularity を導入する一方法を提案した．本論文では同様の考え方を Zadeh のファジィ推論 [11] に適用する．その結果，言語ヘッジ [9, 3, 2] を伴う言語的真理値 [10] による推論過程を自然に記述できることが分かる．

2 情報システムから Kripke 式モデルへ

Pawlak[6] は**情報システム**を組 $S = \langle U, A\rangle$ として定義した．U は非空有限集合，A は属性の非空有限集合で，各属性 $\mathsf{p} \in A$ は U からその属性に固有の領域 D_{p} への関数である．情報システムはしばしば表で表現される：

	doctor	vegetarian	age
Audrey	yes	yes	20
John	yes	no	40
Tom	no	yes	30
Mary	no	no	25

ここで，$U = \{\mathsf{Audrey}, \mathsf{John}, \mathsf{Tom}, \mathsf{Mary}\}$, $A = \{\mathsf{doctor}, \mathsf{vegetarian}, \mathsf{age}\}$ であり，属性の固有領域は $D_{\mathsf{doctor}} = D_{\mathsf{vegetarian}} = \{\mathrm{yes}, \mathrm{no}\}$, $D_{\mathsf{age}} = \{0, 1, 2, \ldots, 200\}$ である．

情報システム S に対して，対応する **Kripke 式モデル** $\mathcal{M}_S = \langle U, \cdots, v\rangle$ を構成できる．ここで，U は可能世界の非空集合，v は原子文の集合 $\mathcal{P}$ から $\{0, 1\}$ への関数で，情報システムの属性から定義する．「$\cdots$」は通常の Kripke モデルなら U 上の二項関数で，Scott-Motague モデルなら U 上の拡張された近傍系で置き換える．例えば，原子文の集合を $\mathcal{P} = \{\mathsf{doctor}, \mathsf{vegetarian}, \mathsf{age} = 0, \cdots, \mathsf{age} = 200\}$ とする時，$U = \{\mathsf{Audrey}, \mathsf{John}, \mathsf{Tom}, \mathsf{Mary}\}$，$v$ を次表のように属性に基づいて決めれば，Kripke 式モデルが得られる：

v	doctor	vegetarian
Audrey	1	1
John	1	0
Tom	0	1
Mary	0	0

v	(age = 0)	·	(age = 20)	·	(age = 25)
Audrey	0		1		0
John	0		0		0
Tom	0		0		1
Mary	0		0		0

·	(age = 30)	·	(age = 40)	·	(age = 200)
	0		0		0
	1		0		0
	0		0		0
	0		1		0

3 Granular 化された Kripke 式モデル

Kripke 式モデル $\mathcal{M} = \langle U, \ldots, v\rangle$ に対して，その **granular 化された Kripke 式モデル** $\hat{\mathcal{M}}$ とは組 $\langle \hat{U}, \ldots, \hat{v}\rangle$ であり，$\hat{W}$ は $\{||p||^{\mathcal{M}} \mid p \in \mathcal{L}_{\mathrm{CL}}(\mathcal{P})\}$ の任意の非空部分集合，付値 $\hat{v}$ は次で定義する：

$$1 \in \hat{v}(\mathsf{p}, \hat{w}) \overset{\mathrm{df}}{\Longleftrightarrow} ||\mathsf{p}||^{\mathcal{M}} \cap \hat{w} \neq \emptyset,$$
$$0 \in \hat{v}(\mathsf{p}, \hat{w}) \overset{\mathrm{df}}{\Longleftrightarrow} (||\mathsf{p}||^{\mathcal{M}})^{\mathrm{C}} \cap \hat{w} \neq \emptyset.$$

例えば，原子文の集合を $\mathcal{P}$ = {doctor, vegetarian} とし，次の Kripke 式モデル $\mathcal{M}$=$\langle U, \cdots, v\rangle$ を考える：U = {Audrey, John, Tom, Mary} で，v は次で定義する：

v	doctor	vegetarian
Audrey	1	1
John	1	0
Tom	0	1
Mary	0	0

これを granular 化した Kripke 式モデル $\hat{\mathcal{M}}$ = $\langle \hat{U}, \cdots, \hat{v}\rangle$ の世界集合と付値 $\hat{v}$ は次表のように与えることができる：

$\hat{v}$	doctor	vegetarian
$\|\|\text{doctor}\|\|^{\mathcal{M}}$	1	{0,1}
$(\|\|\text{doctor}\|\|^{\mathcal{M}})^{\mathrm{C}}$	0	{0,1}
$\|\|\text{vegetarian}\|\|^{\mathcal{M}}$	{0,1}	1
$(\|\|\text{vegetarian}\|\|^{\mathcal{M}})^{\mathrm{C}}$	{0,1}	0

ここで，{0,1} は未知 (unknown) を表す．

4 古典推論の granular 表現

典型的な古典推論として次の仮言三段論法を考えよう：

$$\frac{\begin{array}{l}\text{Socrates is human.}\\ \text{human is mortal.}\end{array}}{\text{Socrates is mortal.}}$$

この推論のクラス論理の観点から見た本質的ポイントは

$$\frac{\begin{array}{l}\text{Socrates} \in [\text{human}]\\ [\text{human}] \subseteq [\text{mortal}]\end{array}}{\text{Socrates} \in [\text{mortal}]}$$

である．原子文の集合を $\mathcal{P}$={human, mortal} とし，この推論が成り立つ Kripke 式モデルを U = {Socrates, Plato, Tweety, Zeus}，付値 v は次表で構成する：

v	human	mortal
Socrates	1	1
Plato	1	1
Tweety	0	1
Zeus	0	0

このモデルを granular 化したモデル $\hat{\mathcal{M}}$ を $\hat{U}$ = $\{\|\|\text{human}\|\|^{\mathcal{M}}, (\|\|\text{human}\|\|^{\mathcal{M}})^{\mathrm{C}}\}$, $\hat{v}$ は次表

$\hat{v}$	human	mortal
Socrates $\in \|\|\text{human}\|\|^{\mathcal{M}}$	1	1
$(\|\|\text{human}\|\|^{\mathcal{M}})^{\mathrm{C}}$	0	{0,1}

で構成すると，古典推論の過程は次の右列のようにモデルとその granular 化を使って構成できる：

Socrates $\in \|\|\text{human}\|\|^{\mathcal{M}}$	$\mathcal{M}$, Socrates $\models$ human
$\|\|\text{human}\|\|^{\mathcal{M}} \subseteq \|\|\text{mortal}\|\|^{\mathcal{M}}$	$\hat{\mathcal{M}}$, $\|\|\text{human}\|\|^{\mathcal{M}} \models$ mortal
Socrates $\in \|\|\text{mortal}\|\|^{\mathcal{M}}$	$\mathcal{M}$, Socrates $\models$ mortal

今述べた granular 推論の過程を詳述しよう．

Step 1. 第一の前提 'Socrates is human' から次を得る：

v	human	mortal
Socrates	1	(a)

空白 (a) に推論によって得られる真理値が埋まる．

Step 2. Granular 化された世界として $\|\|\text{human}\|\|^{\mathcal{M}}$ を考え，granular 化されたモデルに移る：

$\hat{v}$	human	mortal
$\|\|\text{human}\|\|^{\mathcal{M}}$	1	(b)

Step 3. 第二の前提 'human is mortal' から Step 2 の表の空白 (b) を次のように埋める：

$\hat{v}$	human	mortal
$\|\|\text{human}\|\|^{\mathcal{M}}$	1	$\boxed{1}$

Step 4. よって，granular 化する前のモデルに戻ると，Step 1 の表の空白 (a) を次のように埋まる：

v	human	mortal
Socrates	1	$\boxed{1}$

これは結論 'Socrates is mortal' を意味する．

5 情報システムとファジィ文

情報システムにおけるファジィ文を考えよう．例えば，

U	age
Aristotle	17
Plato	50
Socrates	60
Pythagoras	75

で与える情報システム S に対応する Kripke 式モデル $\mathcal{M}_S$ を構成する際，通常の (age=0),... ,(age=200) のような (クリスプ) 文に加えて，次のファジィ文

$$(\text{age} = \text{old}),\ (\text{age} = \text{very old}),\ (\text{age} = \text{rather old}), \cdots$$

を考えることができる．以下，ファジィ文'(age=old)' は'old' と略記する．old のメンバシップ関数を

$$\mu_{\text{old}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } 0 \le x < 50, \\ \dfrac{x-50}{20}, & \text{if } 50 \le x < 70, \\ 1, & \text{if } 70 \le x \le 200, \end{cases}$$

で与えると，付値は

v	rather old	old	very old
Aristotle	0.0	0.0	0.0
Plato	0.0	0.0	0.0
Socrates	0.71	0.5	0.25
Pythagoras	1.0	1.0	1.0

と計算できる．例えば，

$$\begin{aligned} v(\mathsf{old}, \mathsf{Socrates}) &= \mu_{\mathsf{old}}(\mathsf{age}(\mathsf{Socrates})) \\ &= \mu_{\mathsf{old}}(60) \\ &= 0.5 \end{aligned}$$

である．

次に，情報システム自体がファジィなデータ，すなわち，ファジィ集合 (可能性分布) を含む場合を考えよう．例えば，次表

U	age
Aristotle	17
Plato	60
Socrates	old
Pythagoras	very old

で与えられる情報システム S に対応する Kripke 式モデル $\mathcal{M}_S$ の付値は

v	rather old	old	very old
Aristotle	0.0	0.0	0.0
Plato	0.71	0.5	0.25
Socrates	v-True	u-True	r-True
Pythagoras	u-True	r-True	r^2-True

のように Zadeh の拡張原理 [10] を使って，言語ヘッジを伴う言語的真理値 [11] が自然に導入される．例えば，ファジィ・データを含む場合と含まない場合を次の表で比較できる：

ファジィ・データ	クリスプ・データ
$v(\mathsf{old}, \mathsf{Socrates})$	$v(\mathsf{old}, \mathsf{Socrates})$
$= \mu_{\mathsf{old}}(\mathsf{age}(\mathsf{Socrates}))$	$= \mu_{\mathsf{old}}(\mathsf{age}(\mathsf{Socrates}))$
$= \mu_{\mathsf{old}}(\mu_{\mathsf{old}})$	$= \mu_{\mathsf{old}}(60)$
$=$ u-True	$= 0.5$

左列は Zadeh の拡張原理 [10] から，任意の $t \in [0,1]$ に対して，$v(\mathsf{old}, \mathsf{Socrates})(t) = \sup_{x \in W}\{\mu_{\mathsf{old}}(x) \mid \mu_{\mathsf{old}}(x) = t\} = t$ と計算した．

6 ファジィ推論のファジィgranular表現

ここでは，ファジィ推論のファジィgranular 表現を検討する．まず，注意すべき点は，Goguen[1] が注意したように，(例えば，ファジィ集合'Tall' を考える時)

> 'possibly imaginary men so that there shall be sufficiently many men of intermediate stature' ([1], p.328)

を仮定する必要がある．これを本稿の文脈で定式化すると，同値関係 R_{age} を $x R_{\mathsf{age}}\, y \Leftrightarrow \mathsf{age}(x) = \mathsf{age}(y)$ で，写像 $\iota : U/R_{\mathsf{age}} \to D_{\mathsf{age}}$ を $\iota([x]_{R_{\mathsf{age}}}) \stackrel{\mathrm{df}}{=} \mathsf{age}(x)$ で定義する時，ι は全単射でなければならない，すなわち，$\iota(U/R_{\mathsf{age}}) = D_{\mathsf{age}}$ であることが要求される．そうすれば，ファジィ文 'old' に対するファジィ真理集合

$$\|\mathsf{old}\|^{\mathcal{M}} = \int_{x \in U} \mu_{\mathsf{old}}(\mathsf{age}(x))/x,$$

は領域のすべての可能な値に対応する可能世界 (個体) を含むことができる．

次の典型的なファジィ推論を考察しよう：

Pythagoras is very old.
old is wise.

Pythagoras is very wise.

まず，第一の前提は情報システム

U	age
Pythagoras	very old

を与えた事に他ならないから，対応する Kripke 式モデル $\mathcal{M}$ は

$$\begin{aligned} v(\mathsf{very\ old}, \mathsf{Pythagoras}) &= \mu_{\mathsf{very\ old}}(\mathsf{age}(\mathsf{Pythagoras})) \\ &= \mu_{\mathsf{very\ old}}(\mu_{\mathsf{very\ old}}) \\ &= \text{u-True}. \end{aligned}$$

という計算から

v	very old
Pythagoras	u-True

となる．この付値はよく知られた真理値限定 [11] を使って，他の情報を一切利用しないで，次のように (必要なだけ) 拡張できる：

v	$\cdots$	very old	old	rather old	$\cdots$
Pythagoras	$\cdots$	u-True	v-True	v^2-True	$\cdots$

他の情報を利用しないで付値を拡張できることはファジィ推論の柔軟性を示す大きな特徴といえる．

次に，第二の前提を導入するために，ファジィに granular 化された Kripke 式モデル $\tilde{\mathcal{M}}$ をまず，ファジィに granular 化された可能世界 $\|\mathsf{old}\|^{\mathcal{M}}$ から構成する：

$\tilde{v}$	old	wise
$\|\mathsf{old}\|^{\mathcal{M}}$	u-True	(b)

第二の前提を考慮しなければ，

$$\begin{aligned} &\tilde{v}(\mathsf{wise}, \|\mathsf{old}\|^{\mathcal{M}})(t) \\ &= \sup_{x \in W}\{\mu_{\mathsf{old}}(\mathsf{age}(x)) \mid \mu_{\mathsf{wise}}(\mathsf{I.Q.}(x)) = t\} \\ &= \textstyle\int_{t \in [0,1]} 1/t \quad \text{(unknown)} \end{aligned}$$

であるから，空白 (b) は全く無制限，無情報である未知 (unknown) である．よって，第二の前提こそが空白 (b)

に制約を与え，何らかの真理値を導くのであり，その方法が種々のファジィ推論の核心であると考えられる．

本論文は種々のファジィ推論法を比較したり，新しいファジィ推論法を提案するのが目的ではなく，ファジィ推論を表現する新しい枠組を示すのが目的であるから，(b) を埋める方法として，単純に，第二の前提は「もし old が可能世界 $\|\mathsf{old}\|^{\mathcal{M}}$ で u-True なら，wise も可能世界 $\|\mathsf{old}\|^{\mathcal{M}}$ で u-True である」を意味すると仮定する．その結果，

$\tilde{v}$	old	wise
$\|\mathsf{old}\|^{\mathcal{M}}$	u-True	u-True

が得られる．なお，この仮定が成り立つための必要十分条件は (簡単のため，'wise' の度合いが I.Q. で計れると仮定して)

$$\sup_{x\in W}\{\mu_{\mathsf{old}}(\mathsf{age}(x)) \mid \mu_{\mathsf{wise}}(\mathsf{I.Q.}(x)) = t\} = t$$

であり，これは次式を含意する：

$$\mu_{\mathsf{old}}(\mathsf{age}(x)) \leq \mu_{\mathsf{wise}}(\mathsf{I.Q.}(x)).$$

以上二つの前提から結論を導くために，二つの類似する (ファジィに granular 化された) 世界 $\|\mathsf{very\ old}\|^{\mathcal{M}}$ と $\|\mathsf{old}\|^{\mathcal{M}}$ を考慮する必要がある：

$\tilde{v}$	very old	old	wise
$\|\mathsf{very\ old}\|^{\mathcal{M}}$	u-True		(b′)
$\|\mathsf{old}\|^{\mathcal{M}}$		u-True	u-True

空白 (b′) は真理値限定で埋めることができる：

$\tilde{v}$	very old	old	wise
$\|\mathsf{very\ old}\|^{\mathcal{M}}$	u-True		v-True
$\|\mathsf{old}\|^{\mathcal{M}}$		u-True	u-True

'wise' に関して，granular 化する前のモデル $\mathcal{M}$ に戻ると

v	wise
Pythagoras	v-True

を得る．ここで，ファジィ推論では言語的真理値が u-True であるファジィ文を結論とするのが通常であるので，埋めるべきは次の空白 (a) である：

v	(a)	wise
Pythagoras	u-True	v-True

よって，真理値限定の逆から

v	very wise	wise
Pythagoras	u-True	v-True

となり，結論 'Pythagoras is very wise' (is u-True) を得る．

7 おわりに

本論文はファジィ推論とファジィに granular 化された可能世界との関係を記述するほんの一ステップにすぎないが，古典推論とともにファジィ推論も可能世界の granular 化を通して理解できることは示せたと結論する．本研究の一部は日本学術振興会科学研究費基盤研究 (B) No.14380171 の援助を得た．

文 献

[1] Goguen, J.A. (1969): The Logic of Inexact Concepts. Synthese **19**, pp.325-373.

[2] Huynh,V.N., Ho,T.B., and Nakamori,Y. (2002): A Parametric Representation of Linguistic Hedges in Zadeh's Fuzzy Logic. Int. J. of Approximate Reasoning, **30**, pp.203-223.

[3] Lakoff, G. (1973), Hedges: a Study in Meaning Criteria and the Logic of Fuzzy Concepts. Journal of Philosophical Logic, **2**, pp.458-508.

[4] Lin, T.Y. (1998): Granular Computing on Binary Relation, I Data Mining and Neighborhood Systems, II Rough Set Representations and Belief Functions. *L. Polkowski and A. Skowron (eds.), Rough Sets in Knowledge Discovery 1: Methodology and Applications*, Physica-Verlag, Heidelberg, 107-121, 122-140.

[5] Murai,T., Nakata.M., Sato,Y. (2001): A Note on Filtration and Granular Reasoning. *T.Terano et al.(eds.), New Frontiers in Artificial Intelligence, LNAI 2253*, Springer, 385-389.

[6] Pawlak, Z. (1991): *Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data.* Kluwer, Dordrecht.

[7] Skowron,A. (2001): Toward Intelligent Systems: Calculi of Information Granules. *T.Terano et al.(eds.), New Frontiers in Artificial Intelligence, LNAI 2253*, Springer, 251-260, 2001.

[8] Zadeh, L.A. (1965): Fuzzy Sets. Information and Control, 8(1965), pp.338-353.

[9] Zadeh, L.A. (1972): A Fuzzy-Set-Theoretic Interpretation of Linguistic Hedges. J. of Cybernetics **2** (2), pp. 4-34.

[10] Zadeh, L.A. (1973): Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Analysis. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, **3**(1), 28-44.

[11] Zadeh, L.A. (1975): The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning Parts 1, 2, and 3. Information Sciences, **8**, pp.199-249, **8**, pp.301-357, 9, pp.43-80.

[12] Zadeh, L.A. (1979): Fuzzy Sets and Information Granularity. In *M.M.Gupta, R.K.Ragade, and R.R.Yager (eds.), Advances in Fuzzy Set Theory and Applications*, North-Holland, 1979, pp.3–18.

連絡先:
村井 哲也
〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目
北海道大学 大学院工学研究科
システム情報工学専攻 数理情報工学講座
Phone & Fax: 011-706-6757
E-mail: murahiko@main.eng.hokudai.ac.jp

可能性分布を用いたファジィ関係データモデルの一般化
Generalizing Possibility-Based-Fuzzy-Relational-Models

中田　典規　Michinori NAKATA
城西国際大学経営情報学部　Josai International University

A generalized possibility-based-fuzzy-relational-model is proposed under considering semantic ambiguity and indistinguishability for values of membership attribute. In order to eliminate the semantic ambiguity, a membership attribute is attached to every attribute. This clarifies where each value of membership attributes comes from. What the values of membership attributes mean depends on the property of those attributes. In order to eliminate the indistinguishability for values of membership attribute, these values are expressed by possibility distributions on the interval [0,1]. This clarifies what effects an imprecise data value allowed for an attribute has on its value of membership attribute. Therefore, there is no semantic ambiguity and no indistinguishability for the values of membership attributes in the generalized possibility-based-fuzzy-relational-model.

Keywords: 意味的な曖昧さ，区別不可能性，メンバシップ属性，可能性分布，ファジィ関係データモデル

1　序論

不完全情報を扱ういくつかのファジィ関係データモデルが提案されている [1, 2, 6, 7, 9, 11]. しかし，これらのファジィ関係データモデルは新たな不完全さを伴っている．不完全情報を扱うために提案されたデータモデルは新たな不完全さを生み出すべきではない．本稿では二つの新たに生み出された不完全さを取り扱う．

先ず，田中等によって指摘された意味的な曖昧さである [8]. 以下のタプル t が関係 $SUPPLIES$ ($SUPPLIER$, $STATUS$, $CITY$, μ) に存在したとする．ここで，主キーは $SUPPLIER$，μ はメンバシップ属性である．

$$t = (F\text{社}, 20, \text{東京}, 0.8)$$

このタプルは以下の解釈のいずれかである．

- 度合い 0.8 で，supplier は F 社;
- 度合い 0.8 で，F 社 の status は 20;
- 度合い 0.8 で，F 社 が位置している city は 東京;
- 度合い 0.8 で，supplier が F 社 で F 社 の status が 20;
- 度合い 0.8 で，supplier が F 社 で F 社 が位置している city は 東京;
- 度合い 0.8 で，F 社 の status は 20 で F 社 が位置している city は 東京;
- 度合い 0.8 で，supplier が F 社 で F 社 の status が 20 で F 社 が位置している city は 東京.

この意味的な曖昧さは，メンバシップ属性がどの属性と関連しているのかを明確にしていないことから生み出される．

次に，メンバシップ属性値の区別不可能性を取り上げる．従来のファジィ関係データモデルでは，メンバシップ属性値が [0,1] に含まれる一つの数値か一組の数値であらわされている．これらの数値は可能性測度か必然性測度で計算される．このことは，本来区別できなければならない異なった可能性分布で表された不正確なデータに対して同じ数値を生み出す．例えば，関係 $SUPPLIES$ に以下の二つのタプルが存在したとしよう．

$$t_1 = (A\text{社}, 20, 1/\text{東京} + 0.8/\text{札幌} + 1/\text{仙台}, 1).$$
$$t_2 = (F\text{社}, 30, 1/\text{東京} + 0.2/\text{札幌} + 1/\text{福岡}, 1).$$

問い合わせ "*select suppliers where CITY = 1/*東京 *+ 0.9/*札幌" が関係 $SUPPLIES$ になされた時，上記の二つのタプルに対して可能性測度では同じ数値 1，必然性測度でも同じ数値 0 が得られる．これら二つの測度は属性値の可能性分布と問い合わせの条件を表すメンバシップ関数のメンバシップ値を混ぜて一つの値を導いている．このことが得られた数値の区別不可能性を生み出している．

本稿ではこれら二つの不完全さを解消するために，一般化されたファジィ関係データモデルを提案する．

2　一般化されたファジィ関係データモデル

2.1　枠組み

意味的な曖昧さを解消するために，個々の属性に付いたメンバシップ属性を導入する [4].

定義 2.1.1
ファジィ関係スキーム R は，従来の属性 A_i とそのメンバシップ属性 μ_{A_i} の組から成る．

$$R(A_1, \mu_{A_1}, A_2, \mu_{A_2}, \ldots, A_n, \mu_{A_n}).$$

定義 2.1.2
タプル t の属性 A_i の値 $t[A_i]$ は，正規な可能性分布 $\pi_{t[A_i]}$ で表される．

$$t[A_i] = \sum_{u \in D_i} \pi_{t[A_i]}(u)/u, \quad \sup_{u \in D_i} \pi_{t[A_i]}(u) = 1,$$

ここで，D_i は属性 A_i の定義域である．

不正確なデータを選択的に利用するために，不正確なデータの詳細やそのデータに課せられた制約の詳細がどのように整合性の度合いに影響するのかを考慮しなければならない．そこで，馬野と深海よってなされたように，メンバシップ属性の値を区間 [0,1] 上の正規な可能性分布で表す．

定義 2.1.3
属性 A_i に付けられたメンバシップ属性 μ_{A_i} の値 $t[\mu_{A_i}]$ は，区間 [0,1] 上の正規な可能性分布で表される．

$$t[\mu_{A_i}] = \sum_{u\in[0,1]} \pi_{\mu_{A_i}}(u)/(u),\ \sup_u \pi_{\mu_{A_i}}(u) = 1.$$

以上により，全ての属性値は正規な可能性分布で表される．

2.2 メンバシップ属性値

タプルに付いたメンバシップ属性を伴うファジィ関係データモデルでは，メンバシップ属性値がタプル値と課せられた制約との整合性の度合いである [3]．本稿で提案するデータモデルでは以下の通りである．

定義 2.2.1
関係に存在するタプルのある属性に付いたメンバシップ属性の値は，その関係に課せられた制約のその属性に関係する部分とその属性値との整合性の度合いである．

関係 r に課せられた制約が制約 $\{c_1,\ldots,c_n\}$ の集まりである時，$C = \wedge_p c_p$ との整合性の度合いを計算する．各制約 c_p は制約要素の連言標準形 $c_p = \wedge_{p_j} c_{p_j}$ で表すことができる．ここで，各要素 c_{p_j} は論理演算子 $\vee(or)$ と $\sim(not)$ を含むことができる．さて，C_{A_i} を制約要素の中で A_i が現れるものから構成される C の部分であるとしよう．属性 A_i に付いたメンバシップ属性の値は，

$$t[\mu_{A_i}] = Com(C_{A_i} \mid t[\mathcal{A}]).$$

各要素 c_{i_j} が重なる部分がなければ，

$$Com(C_{A_i} \mid t[\mathcal{A}]) = \wedge_{i_j} Com(c_{i_j} \mid t[\mathcal{A}]),$$

ここで，$C_{A_i} = \wedge_{i_j} c_{i_j}$ で，$Com(c_{i_j} \mid t[\mathcal{A}])$ は A_i が現れる制約要素 c_{i_j} とタプル値 $t[\mathcal{A}]$ との整合性の度合いである．

次に，ある制約要素 c に関する $Com(c|t[\mathcal{A}])$ を計算する方法を示す．制約要素 c が唯一の属性 A_i を含んでいるとし，例えば，"c is $A_i = a$ "としよう．c と属性値 $t[A_i]$ との整合性の度合いは，

$$Com(c|t[\mathcal{A}]) = Com(A_i = a|t[A_i]) = \sum_u \pi_{t[A_i]}(u)/\mu_a(u).$$

ここで，μ_a は a を表すメンバシップ関数である．この式は，属性値 $t[A_i]$ の可能値 u が a を満足する度合い $\mu_a(u)$ と属性値 $t[A_i]$ が u である可能性の度合い $\pi_{t[A_i]}(u)$ から整合性の度合いが導かれ，二種類の異なる度合いが分離していることを示している．つまり，整合性の度合いに対する不正確なデータ値と制約の詳細な影響を別々に知ることができる．従って，両者を混ぜることで生じる整合性の度合いに関する区別不可能性は現れない．

制約要素 c が否定を示す論理演算子 $\sim$ を含む，例えば $\sim(A_i = a)$ の場合，

$$Com(\sim(A_i = a)|t[\mathcal{A}]) = \sum_u \pi_{t[A_i]}(u)/\mu_{\bar{a}}(u),$$

ここで，$\mu_{\bar{a}}(u) = 1 - \mu_a(u)$.

制約要素 c が選言を示す論理演算子 $\vee$ を含む，例えば c が $A_i = a \vee A_j = b$ で $i \neq j$ の場合，

$$\begin{aligned} Com(c|t[\mathcal{A}]) &= Com(A_i = a \vee A_j = b|t[\mathcal{A}]) \\ &= Com(A_i = a|t[\mathcal{A}]) \vee Com(A_j = b|t[\mathcal{A}]) \\ &= \sum_{u,v} \min(\pi_{t[A_i]}(u), \pi_{t[A_j]}(v))/\max(\mu_a(u), \mu_b(v)). \end{aligned}$$

もし $i = j$ ならば，

$$\begin{aligned} Com(c|t[\mathcal{A}]) &= Com(A_i = a \vee b|t[\mathcal{A}]) \\ &= \sum_u \pi_{t[A_i]}(u)/\max(\mu_a(u), \mu_b(u)). \end{aligned}$$

二つの制約要素 c_i と c_j の連言 $\wedge$，例えば c_i が $A_i = a$ で c_j が $A_j = b$ で $i \neq j$ の場合，

$$\begin{aligned} Com(c_i \wedge c_j|t[\mathcal{A}]) &= Com(c_i|[A_i]) \wedge Com(c_j|t[A_j]) \\ &= \sum_{u,v} \min(\pi_{t[A_i]}(u), \pi_{t[A_j]}(v))/\min(\mu_a(u), \mu_b(v)). \end{aligned}$$

もし $i = j$ ならば，

$$\begin{aligned} Com(c_i \wedge c_j|t[\mathcal{A}]) &= Com(c_i|[A_i]) \wedge Com(c_j|t[A_j]) \\ &= \sum_u \pi_{t[A_i]}(u)/\min(\mu_a(u), \mu_b(u)). \end{aligned}$$

例 2.2.2
関係 $scs1$ に課せられた唯一の制約が "$If\ SUPPLIER\ is\ 1/a + 1/b,\ then\ STATUS\ is\ about\ 20\ and\ CITY\ is\ 1/x + 1/y$" であるとする．この制約の連言標準形は以下の通りである．

$$\begin{aligned} C &= \sim(S\# = 1/a + 1/b) \vee \\ &\quad ((ST = about\ 20) \wedge (CT = 1/x + 1/y)), \\ &= (\sim(S\# = 1/a + 1/b) \vee (ST = about\ 20)) \wedge \\ &\quad (\sim(S\# = 1/a + 1/b) \vee (CT = 1/x + 1/y)). \end{aligned}$$

ここで，$S\#, CT, ST$ はそれぞれ $SUPPLIER, CITY, STATUS$ の省略形である．
故に，各属性と関連する部分は以下のようになる．

$$\begin{aligned} C_{S\#} &= C, \\ C_{CT} &= \sim(S\# = 1/a + 1/b) \vee (CT = 1/x + 1/y), \\ C_{ST} &= \sim(S\# = 1/a + 1/b) \vee (ST = about\ 20). \end{aligned}$$

about x が $0.3/(x-3)+0.8/(x-2)+1/(x-1)+1/x+1/(x+1)+0.8/(x+2)+0.3/(x+3)$ である時，メンバシップ属性の各値は以下のようになる．

*scs*1

$S\#$	$\mu_{S\#}$	CT	μ_{CT}	ST	μ_{ST}
1/a	1/0+1/.3	1/x	1/1	1/16+1/17	1/0+1/.3
1/b	1/.8+1/1	1/y	1/1	1/21+1/22	1/.8+1/1
1/c	1/1	1/x	1/1	1/23	1/1

関係はタプルを一意に識別する主キーに対応する属性集合 X を持っている．Y が X に含まれない属性集合である時，関数従属性 $X \rightarrow Y$ が成り立つ．この状況で，X に含まれる属性に付いたメンバシップ属性の値の解釈が Y に含まれる属性に付いたメンバシップ属性の解釈と異なるのが自然である．タプル t において属性 A_i の値が v であるとする．この属性が主キー X に含まれていれば，メンバシップ属性値 $t[\mu_{A_i}]$ は属性 A_i の値が v である度合いであり，そうでなければ，主キーの値 $t[X]$ が A_i の値が v である性質を持っている度合いである．

例 2.2.3
関係 *scs*1 において主キーが $SUPPLIER$ であるとする．例 2.2.2 の 2 番目のタプルのメンバシップ属性の各値は以下のように解釈される．

supplier が b である度合いが $1/0.8+1/1$;
supplier b が位置する city が b である度合いが $1/1$;
supplier b の status が $1/21+1/22$ である度合いが $1/0.8+1/1$;

タプルをメンバシップ属性値の昇順あるいは降順に整列することが必要である場合にしばしば直面する．以下のような場合に，メンバシップ属性値を整列することができる．

メンバシップ属性値の整列
二つのメンバシップ属性値 $t_1[\mu_{A_i}]$ と $t_2[\mu_{A_i}]$ が得られているとする．区間 [0. 1] 上の正規な可能性分布で 1/1 に等しくなく，$t_1[\mu_{A_i}] \vee G = t_2[\mu_{A_i}]$ あるいは $t_1[\mu_{A_i}] = t_2[\mu_{A_i}] \wedge G$ である G が存在すれば，その時 $t_1[\mu_{A_i}] < t_2[\mu_{A_i}]$.

この方法でメンバシップ属性値を常に整列できるわけではない．なぜならば，二つのメンバシップ属性値を結びつける上記のような正規な可能性分布 G が常に存在するとは限らないからである．従って，上記の方法で整列できない場合，以下の方法を使う．

全てのメンバシップ属性値は計算された値で，属性値と制約との整合性の度合いである．この計算値から必然性と可能性の整合性の度合い，すなわち必然性と可能性のメンバシップ属性値を得ることができる．タプル t において属性 A_i に付いたメンバシップ属性 μ_{A_i} の値 $t[\mu_{A_i}]$ が $\sum_{u\in[0,1]} \pi_{\mu_{A_i}}(u)/u$ であるとする．必然性と可能性のメンバシップ属性値 $t_N[\mu_{A_i}]$ と $t_\Pi[\mu_{A_i}]$ は以下のように求められる．

$$t_N[\mu_{A_i}] = \min_u \max(1-\pi_{\mu_{A_i}}(u), u),$$
$$t_\Pi[\mu_{A_i}] = \max_u \min(\pi_{\mu_{A_i}}(u), u).$$

これらの値を用いて，メンバシップ属性値が以下のように整列される．

定義 2.2.4
$t_1[\mu_{A_i}]$ と $t_2[\mu_{A_i}]$ から $(t_{N,1}[\mu_{A_i}],\ t_{\Pi,1}[\mu_{A_i}])$ と $(t_{N,2}[\mu_{A_i}], t_{\Pi,2}[\mu_{A_i}])$ が得られたとする．

$t_{N,1}[\mu_{A_i}] < t_{N,2}[\mu_{A_i}]$ ならば, $t_1[\mu_{A_i}] \prec t_2[\mu_{A_i}]$;
$t_{N,1}[\mu_{A_i}] = t_{N,2}[\mu_{A_i}]$ かつ $t_{\Pi,1}[\mu_{A_i}] < t_{\Pi,2}[\mu_{A_i}]$ ならば,
$t_1[\mu_{A_i}] \prec t_2[\mu_{A_i}]$;
$t_{N,1}[\mu_{A_i}] = t_{N,2}[\mu_{A_i}]$ かつ $t_{\Pi,1}[\mu_{A_i}] = t_{\Pi,2}[\mu_{A_i}]$ ならば,
$t_1[\mu_{A_i}] \approx t_2[\mu_{A_i}]$;
それ以外の場合 $t_1[\mu_{A_i}] \succ t_2[\mu_{A_i}]$.

ここで，$\prec, \succ, \approx$ は必然性測度と可能性測度による順序であることを示す．

定理 2.2.5
$t_1[\mu_{A_i}] \leq t_2[\mu_{A_i}]$ ならば, $t_1[\mu_{A_i}] \preceq t_2[\mu_{A_i}]$. ここで，$\preceq$ は $\prec$ あるいは $\approx$ である．

関係データモデルでは関係に課せられた制約と両立するタプルのみがその関係に受け入れられる．われわれのデータモデルでは，不正確な値が任意の属性値に許される．その場合，属性値は可能な属性値を持っている．ある可能な属性値について，課された制約と整合する度合いが整合しない度合いに等しいか大きいが，別の可能な属性値についてはそうでないことがありうる．前者の可能な属性値は”受け入れられる”と言われ，一方，後者は”受け入れられない”と言われる．属性値について，以下に示す 3 つの場合がある．

1. 全ての可能な属性値が受け入れられる値である．
2. ある可能な属性値は受け入れられる値であるが，別の可能な属性値は受け入れられない値である．
3. 全ての可能な属性値が受け入れられない値である．

この状況下で，受け入れられるタプルの基準は以下の通りである．

受け入れられるタプルの基準
タプルの全ての属性について課せられた制約と整合する度合いがが整合しない度合いに等しいか大きい可能な属性値が少なくとも一つ存在する．

この基準は上記の 1 と 2 の場合に相当する．

受け入れられないタプルの基準
タプルの少なくとも一つの属性において全ての可能な属性値ついて課せられた制約と整合する度合いが整合しない度合いより小さい．

この基準は上記の3の場合に相当し，以下のように定式化される．

$$\exists A_i \ u < 0.5 \ for \ all \ u \ with \ \mu_{t[A_i]}(u) > 0.$$

この基準を満たすタプルは"受け入れられないタプル"と呼ばれる．タプルが受け入れられないタプルであるとしても関係に留まる．これは，正しい結果が質問処理で得られることを保障するためである[5]．しかしながら，受け入れられないタプルを受け入れられるタプルから区別するべきである．なぜならば，利用者は受け入れられないタプルには関心がないからである．導出表では利用者に受け入れられるタプルのみを表示すべきで，受け入れられないタプルは引き続く演算で正しい結果を得るために保持しておく．

例 2.2.6
受け入れられないタプルの基準に従うと，関係 $scs1$ における1番目のタプルは受け入れられないタプルである．

3 結語

メンバシップ属性値に関する意味的な曖昧さと区別不可能性を解消するために一般化された可能性分布に基ずくファジィ関係データモデルを提案した．

意味的な曖昧さは各属性にメンバシップ属性が伴うことで解消される．この拡張は各メンバシップ属性値がどこからきているのかを明らかにする．属性についたメンバシップ属性の値は関係に課せられた制約の中でその属性に関連した部分と属性値との整合性の度合いである．メンバシップ属性値の解釈が明確になり，主キーに属する属性とそうでない属性とは解釈が異なる．

区別不可能性は区間 [0, 1] 上の可能性分布でメンバシップ属性値を表現することで解消される．この拡張は，不正確なデータ値がメンバシップ属性値にどのような効果を及ぼしているかを詳細に明らかにする．従って，従来のファジィ関係データモデルよりも不正確な値を選択的に利用できる．

このモデルにおいて，各関係は受け入れられるタプルと受け入れられないタプルから構成される．受け入れられるタプルのみが利用者に提示されるべきである．受け入れられないタプルは引き続く演算で正しい結果を得るために保持されなければならない．

Acknowledgment

本研究は部分的に科学研究費 (B)No.14380171 と科学研究費 (C)No.13680475 の下に行われた．

参考文献

[1] Baldwin, J. F. [1983] A Fuzzy Relational Inference Language for Expert Systems, in Proceedings of the 13th IEEE Inter. Symp. on Multiple-Valued Logic (Kyoto, Japan), pp. 416-421.

[2] Li, D. and Liu, D. [1990] A Fuzzy Prolog Database System, Research Studies Press, 1990.

[3] Nakata, M. [1993] Integrity Constraints in Fuzzy Databases, in Proceedings of the first Asian Fuzzy System Symposium, (Singapore, November 23-26, 1993).

[4] Nakata, M. [1999] A Semantic-Ambiguity-Free Relational Model for Handling Imperfect Information, Journal of Advanced Computational Intelligence, **3**, 3-12.

[5] Nakata, M. [2003] Generalizing Possibility - Distribution - Fuzzy - Relational - Models, Proceedings of International Symposium on Computational Intelligence and Intelligent Informatics 2003 (ISCIII2003), May 19-23, 2003, Nabeul, Tunisia.

[6] Prade, H. [1984] Lipski's Approach to Incomplete Information Data Bases Restated and Generalized in the Setting of Zadeh's Possibility Theory, Information Systems 9:1, 27-42.

[7] Prade, H. and Testemale, C. [1984] Generalizing Database Relational Algebra for the Treatment of Incomplete or Uncertain Information and Vague Queries, Information Science, **34**, 115-143.

[8] Tanaka, K., Kobayashi, S., and Sakanoue, T. [1991] Uncertainty Management in Object-Oriented Database Systems, Proceedings of Database and Expert Systems Applications, DEXA '91, D. Karagiannis, Ed., Springer-Verlag, pp. 251-256.

[9] Umano, M. [1982] FREEDOM-O: A Fuzzy Database System, Fuzzy Information and Decision Processes, M. M. Gupta and E. Sanchez, eds., North-Holland, Amsterdam, pp. 339-347.

[10] Umano, M. and Fukami, S. [1994] Fuzzy Relational Algebra for Possibility-Distribution-Fuzzy-Relational Model of Fuzzy Data, Journal of Intelligent Information Systems, **3**, 7-27.

[11] Zemankova, M. and Kandel, A. [1984] Fuzzy Relational Databases - Key to Expert Systems, Verlag TÜV Rheinland, Cologne, 1984.

問い合わせ先：
283-8555 千葉県東金市求名1番地
城西国際大学　経営情報学部
中田　典規
TEL 0475-55-8863/FAX 0475-55-8811
E-mail: nakatam@ieee.org

ファジィマルチ集合とカーネル関数を利用したクラスタリング

Fuzzy Multiset and Clustering Using a Kernel Function

水谷 清隆
Kiyotaka Mizutani
筑波大学 システム情報工学研究科
University of Tsukuba

宮本 定明
Sadaaki Miyamoto
筑波大学 機能工学系
University of Tsukuba

Abstract: Multiset and application to the inquiry of databases are studied by many researchers. Fuzzy multiset was proposed by Yager, however there is still very few research concerning its application. In this paper, a fuzzy clustering algorithm using collection of information based on fuzzy multiset is considered. Furthermore, clustering employing a kernel function used in support vector machines based on cosine correlation is considered. An example of the clustering is shown and effect of a kernel function is discussed.

Keywords: Fuzzy multiset, Information retrieval, Fuzzy clustering, Kernel function

1 はじめに

Web 上の情報検索システムでは，ある問い合わせに対応する情報項目が，異なる度合をもって複数回出現するという状況が観察される．このような状況を適切にモデル化するには，要素の重複と帰属度を同時に表現する構造を持つ，ファジィマルチ集合を適用することが可能である．

また，多くの情報要素を自動分類することは，情報を管理する上で重要な課題であるため，情報検索におけるクラスタリング技法 [3] についてよく検討されている．さまざまなクラスタリング技法の中でも，ファジィクラスタリングは最も研究が盛んな手法である．

本稿では，ファジィマルチ集合モデルに基づく情報要素のクラスタリングを行うために，ファジィマルチ集合間の類似度としてコサイン相関 [3] を適用し，クラスターサイズ調整機能を持つエントロピー正則化法 [6] を用いたファジィc-平均法によるクラスタリングアルゴリズムについて考察する．また，非線形なデータの分類に適しているとして注目されているサポートベクトルマシン (Support Vector Machine - SVM) [5] に用いられるカーネル関数のクラスタリングへの応用についても考察する．

数値例として，学会誌や論文データベースからの文献データに対してファジィマルチ集合のモデルを適用し，提案したアルゴリズムを用いてクラスタリングを行うとともに，カーネル関数を利用した場合とそうでない場合とのクラスタリング結果についての比較検討を行う．

2 マルチ集合のファジィ化

簡単のため，有限集合 $X = \{x_1, \ldots, x_n\}$ 上にファジィマルチ集合が定義されるものと仮定する．クリスプなマルチ集合 M は，$M = \{x_i, \ldots, x_i, x_j, \ldots, x_j\}$ のように要素の重複を許す集合であり，$Count$ 関数 ($Count_M : X \to \{0, 1, 2, \ldots\}$) で特徴付けられる．この関数は要素の重複度を表し，$Count_M(x_1) = 5$ ならば，M には x_1 が 5 個存在することを意味している．また，$Count_M(a) = 2$, $Count_M(b) = 3$, $Count_M(c) = 1$ のときマルチ集合 M は，$M = \{2/a, 3/b, 1/c\}$，もしくは $M = \{a, a, b, b, b, c\}$ と表される．クリスプマルチ集合の詳細について，ここでは省略する [1]．

Yager [4] の定義によれば，X のファジィマルチ集合 A は，単位区間 $I = [0, 1]$ のマルチ集合に値をとる $Count$ 関数で特徴付けられている．すなわち，

$$Count_A(x) = \{\nu, \nu', \ldots, \nu''\}, \quad \nu, \nu', \ldots, \nu'' \in I.$$

このように定義された X 上のファジィマルチ集合の全体を $\mathcal{FM}(X)$ と書くことにする．

ファジィマルチ集合の基本演算の定義にはメンバーシップ列，すなわち $Count_A(x)$ を降順にソートした列を用いる必要がある．そこで，上記の数列を降順にソートすることができると仮定する．

このようにして定義されたメンバーシップ列を

$$Count_A(x) = (\mu_A^1(x), \mu_A^2(x), \ldots)$$

と表す．$\mu_A^1(x) \geq \mu_A^2(x) \geq \ldots$ であることに注意する．

ファジィマルチ集合の基本演算 [2] のいくつかを以下に記しておく．

1. **inclusion:**

$$A \subseteq B \Leftrightarrow \mu_A^j(x) \leq \mu_B^j(x), \ j = 1, \ldots, \ \forall x \in X.$$

2. **equality:**

$$A = B \Leftrightarrow \mu_A^j(x) = \mu_B^j(x), \ j = 1, \ldots, \ \forall x \in X.$$

3. **sum:**

$$Count_A(x) = \{\nu_1, \nu_2, \ldots\},$$
$$Count_B(x) = \{\nu_1', \nu_2', \ldots\}$$

のとき，

$$Count_{A \oplus B}(x) = \{\nu_1, \nu_1', \nu_2, \nu_2', \ldots\}.$$

4. **union and intersection:**

$$\mu_{A \cup B}^j(x) = \mu_A^j(x) \vee \mu_B^j(x), \ j = 1, \ldots, \ \forall x \in X.$$
$$\mu_{A \cap B}^j(x) = \mu_A^j(x) \wedge \mu_B^j(x), \ j = 1, \ldots, \ \forall x \in X.$$

2.1 ファジィマルチ集合のノルム

ファジィマルチ集合 A の長さを

$$L(x;A) = \max\{\, j \;:\; \mu_A^j(x) > 0 \,\}$$

と定義する．これを用いて，ファジィマルチ集合 A のノルムを次式で定義する．

$$\|A\|_2 = \sqrt{\sum_{x\in X}\sum_{j=1}^{L(x;A)} \{\mu_A^j(x)\}^2} \tag{1}$$

2.2 ファジィマルチ集合の類似度

ファジィマルチ集合 A, B に対して

$$s(A,B) = \frac{\displaystyle\sum_{x\in X}\sum_{j=1}^{L(x;A)\wedge L(x;B)} \mu_A^j(x)\mu_B^j(x)}{\|A\|_2\|B\|_2} \tag{2}$$

と定義する．この類似度はコサイン相関に基づくものであり，コサイン相関は文献の類似検索やクラスタリングにおいてよく利用されている [3]．

3 ファジィc-平均法

ファジィマルチ集合 $A_1, \ldots, A_n$ が与えられたとする．上記の類似度を用いてファジィc-平均法によるクラスタリングを行うため，次のような目的関数を考察する．

$$J_e(U,V,\alpha) = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c}\Big\{u_{ik}s(A_k,v_i) - \lambda^{-1}u_{ik}\log\frac{u_{ik}}{\alpha_i}\Big\} \tag{3}$$

ここで，$\lambda > 0$ である．$U = (u_{ik})$ はメンバーシップ行列であり，$M = \{(u_{ik}) : \sum_i u_{ik} = 1, \forall k\}$ はファジィ分割を表す．また，$V = (v_1, \ldots, v_c)$ はクラスター中心としてのファジィマルチ集合 $v_i \in \mathcal{FM}(X)$ を並べたものである．$\alpha = (\alpha_1, \cdots, \alpha_c)$ はクラスターサイズ調整変数であり，制約条件を $\mathcal{A} = \{\alpha : \sum_i \alpha_i = 1; \alpha_i \geq 0, i = 1, \cdots, c\}$ とする．

次のファジィc-平均クラスタリングの交互最適化アルゴリズムにより目的関数の最適解を求める [6]．ただし，$\bar{V}$，$\bar{\alpha}$ の初期値を適当に与える．

アルゴリズム **FCA**.

FCA1. $\max_{U\in M} J_e(U,\bar{V},\bar{\alpha})$ を解き，最適解を新たな $\bar{U}$ とする．

FCA2. $\max_{V} J_e(\bar{U},V,\bar{\alpha})$ を解き，最適解を新たな $\bar{V}$ とする．

FCA3. $\max_{\alpha\in\mathcal{A}} J_e(\bar{U},\bar{V},\alpha)$ を解き，最適解を新たな $\bar{\alpha}$ とする．

FCA4. 解 $(\bar{U},\bar{V},\bar{\alpha})$ が収束しているならば終了．そうでなければ **FCA1** にもどる．

このとき，最適解は次のように計算される．

$$u_{ik} = \frac{\alpha_i \exp(\lambda s(A_k,v_i))}{\displaystyle\sum_{j=1}^{c}\alpha_j\exp(\lambda s(A_k,v_j))}, \tag{4}$$

$$v_i = \frac{\displaystyle\sum_{k=1}^{n} u_{ik}A_k}{\displaystyle\|\sum_{k=1}^{n} u_{ik}A_k\|}, \tag{5}$$

$$\alpha_i = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} u_{ik}. \tag{6}$$

なお，これらの最適解についてはラグランジュ乗数法を用いて解くことができる．

4 高次元空間への写像

SVM [5] では一般に，無限次元空間を含む高次元特徴空間を利用する．この高次元特徴空間を H とし，もとの空間 $\boldsymbol{R}^p$ をデータ空間と呼ぶ．H は Hilbert 空間であり，内積を $\langle\cdot,\cdot\rangle$ とする．

SVM では，写像 $\Phi\colon \boldsymbol{R}^p \to H$ を利用し，データ x を特徴空間に移して $\Phi(x)$ を考察する．この際，$\Phi(x)$ を明示的に利用するのではなく，内積 $\langle\Phi(x),\Phi(y)\rangle$ を表すカーネル関数だけを用いて解を表現することができる．つまり，写像 Φ の具体的な形が分からなくても，カーネル関数を使うことで解を求めることが可能となったのである．

カーネル関数としては

$$K(x,y) = \exp(-cnst\|x-y\|^2)$$
$$K(x,y) = (1+\langle x,y\rangle)^d$$

のような，ガウス型カーネル関数，多項式型カーネル関数などがある．

4.1 カーネル関数の利用

ファジィマルチ集合 $A_1, \ldots, A_n$ が与えられたとする．ファジィc-平均クラスタリングのために，高次元特徴空間における類似度を

$$s_H(\Phi(A_k), w_i) = \frac{\langle\Phi(A_k), w_i\rangle}{\|\Phi(A_k)\|_H\|w_i\|_H} \tag{7}$$

とし，次のような目的関数を考察する．

$$J_e(U,W,\alpha) = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c}\Big\{u_{ik}s_H(\Phi(A_k),w_i) - \lambda^{-1}u_{ik}\log\frac{u_{ik}}{\alpha_i}\Big\} \tag{8}$$

ここで，$\Phi(A_k)$ は，ファジィマルチ集合 $A_k (k = 1, \ldots, n)$ を高次元特徴空間に写像したものであり，$W = (w_1, \ldots, w_c)$ は高次元特徴空間におけるクラスター中心を並べたものである．

アルゴリズム **FCA** における V を W に置き換えて適用すれば，**FCA1** の最適解は

$$u_{ik} = \frac{\alpha_i \exp(\lambda s_H(\Phi(A_k), w_i))}{\sum_{j=1}^{c} \alpha_j \exp(\lambda s_H(\Phi(A_k), w_j))} \tag{9}$$

となる．

一方，**FCA2** における最適解はラグランジュ乗数法を用いて解くことができ，

$$w_i = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{\sqrt{\sum_{\ell=1}^{n}\sum_{h=1}^{n} \frac{\langle \Phi(A_\ell), \Phi(A_h)\rangle}{\|\Phi(A_\ell)\|_H \|\Phi(A_h)\|_H}}} \frac{u_{ik}\Phi(A_k)}{\|\Phi(A_k)\|_H} \tag{10}$$

$(i = 1, \ldots, c)$ となる．しかし，$\Phi(A_k)$ の値が不明であるので，これを直接解くことができない．そこで，次の変形を行う．

まず，(10) を類似度の式 (7) に代入し，カーネル関数 $K(x, y) = \langle \Phi(x), \Phi(y)\rangle$ について

$$K_{\ell h} = \langle \Phi(A_\ell), \Phi(A_h)\rangle$$

とする．$K_{\ell h}$ は明示的に用いられるので，これにより

$$\begin{aligned} s_H(\Phi(A_k), w_i) &= \frac{\langle \Phi(A_k), w_i\rangle}{\|\Phi(A_k)\|_H \|w_i\|_H} \\ &= \sum_{g=1}^{n} \frac{u_{ig} K_{gk}}{\sqrt{\sum_{\ell=1}^{n}\sum_{h=1}^{n} u_{i\ell} u_{ih} K_{\ell h}}} \end{aligned} \tag{11}$$

となる．この式 (11) を用いて **FCA1** の解を式 (9) で計算する．

なお，カーネル関数 $K_{\ell h}$ についてはガウス型カーネル関数を用いており，

$$K_{\ell h} = \exp(-cnst \sum_{x \in X} \sum_{j=1}^{L(x;A_\ell) \vee L(x;A_h)} |\ \mu^j_{A_\ell}(x) - \mu^j_{A_h}(x)\ |^2)$$

と計算される．

ここで，カーネル関数を利用したファジィ c-平均クラスタリングのアルゴリズムを次のように提案する．ただし，類似度 s_H とクラスターサイズ調整変数 α_i の初期値を適当に与える．

アルゴリズム **K-FCA**.

K-FCA1. 式 (9) により，$U = (u_{ik})$ を最適解とする．

K-FCA2. 式 (11) により s_H を更新する．

K-FCA3. 式 (6) により α_i を更新する．

K-FCA4. 解 $U = (u_{ik})$ が収束しているならば終了．
そうでなければ **K-FCA1** にもどる．

アルゴリズム **K-FCA** では w_i を明示的に用いるのではなく，(9)，(11)，(6) を繰り返す交互最適化により最適解を求めている．従って，**K-FCA4** における解の収束性は U のみによって判断される．

ファジィ c-平均法によるクラスタリングでは，クラスター中心の位置が問題になることがあるが，高次元特徴空間への写像を利用した場合，w_i は特徴空間における点であり，Φ^{-1} を計算しないので，クラスター中心を直接用いずにクラスタリングを行うことができる．

5 用語－文献行列

情報検索では，用語の関連性解析や用語あるいは文献クラスタリングのため，用語-文献行列 (term-document matrix) [3] が用いられる．これは次のように表される．用語の集合を $T = \{t_1, \ldots, t_p\}$ とし，文献の集合を $D = \{d_1, \ldots, d_q\}$ とする．用語-文献行列 $F = (f_{ij})$ は，$p \times q$ 行列で，用語 t_i が文献 d_j に f_{ij} 回出現することを表す．

いま，用語 t_i が文献 d_j にグレードをもって複数回現れるとし，そのグレードが $\nu_1, \ldots, \nu_s$ であるとする．このとき，整数 f_{ij} の代わりにマルチ集合

$$f_{ij} = \{\nu_1, \ldots, \nu_s\}$$

を用いる．

クラスタリングに関していえば，用語のクラスタリングと文献のクラスタリングのいずれもが可能である．文献をクラスタリングする場合，d_k に対応するファジィマルチ集合を A_k とし，$X = T$ と置くと，

$$Count_{A_j}(t_i) = f_{ij} = \{\nu_1, \ldots, \nu_s\}$$

であることに注意すれば，上記のモデルを利用することができる．

6 数値例

ここでは，22 件の文献に対してファジィマルチ集合のモデルを適用し，文献に関するファジィクラスタリングを行う．今回選択した文献，用語，帰属度の設定ルールについては以下の通りである．

1. 文献：クラスタリングをテーマとする文献とクラスタリングには関連しないアルゴリズムをテーマとする文献の 2 種類を選択．
2. 用語：
   t_1：クラスタリング
   t_2：ファジィ
   t_3：アルゴリズム
3. 用語帰属度を決めるルール
   (a) 用語が文献のタイトルにあれば，帰属度 1.0 とし，なければ帰属度 0 とする．
   (b) 用語が文献のセクションのタイトルにあれば，帰属度 0.5 とし，なければ帰属度 0 とする．
   (c) 用語が文献のアブストラクトにあれば，帰属度 0.2 とし，なければ帰属度 0 とする．

6.1 分類結果

図 1 はファジィ c-平均法による分類結果であり，図 2 はカーネル関数を利用したファジィ c-平均法による分類結果である．図の横軸はファジィマルチ集合のノルム，縦軸は文献がクラスタリングをテーマとする文献のクラスに属する帰属度を示している．

帰属度の高さ 0.5 のラインを基準に，ラインの上はクラスタリングをテーマとする文献のクラスで，ラインの下はクラスタリングとは関連しないアルゴリズムをテーマとする文献のクラスである．

分類に用いた文献数は 22 件であり，このうち，クラスタリングをテーマとする文献は図中の '□' で表示し、

その他のアルゴリズムをテーマとする文献は図中の'+'で表示している．

カーネル関数を利用しないファジィc-平均法による分類結果 (図 1) では，クラスタリングをテーマとする文献2件，その他のアルゴリズムをテーマとする文献1件が誤分類されていることが分かる．これは，ファジィマルチ集合を構成する際の帰属度の設定において，文献のタイトルにその用語が含まれれば高い帰属度を与えるというルールによるものであると考えられる．

カーネル関数を利用したファジィc-平均法による分類結果 (図 2) では，クラスタリングをテーマとする文献は全て正しく分類され，その他のアルゴリズムをテーマとする文献1件のみが誤分類となる結果になった．

分類結果を全面的に考察すると，ファジィマルチ集合のモデルを用いたクラスタリングにより，文献を有効に分類できることが分かった．また，カーネル関数を利用することで文献の誤分類を減らすことができる，ということが確認できた．

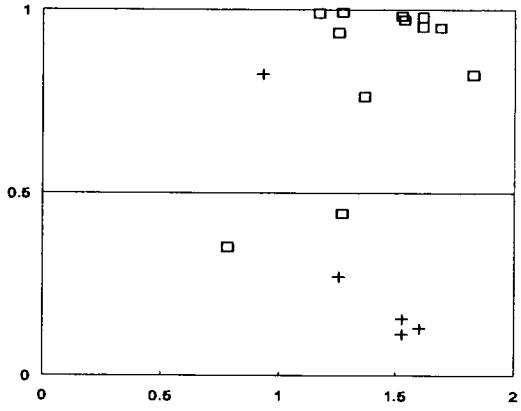


図 1: ファジィc-平均法による分類 (λ=10)

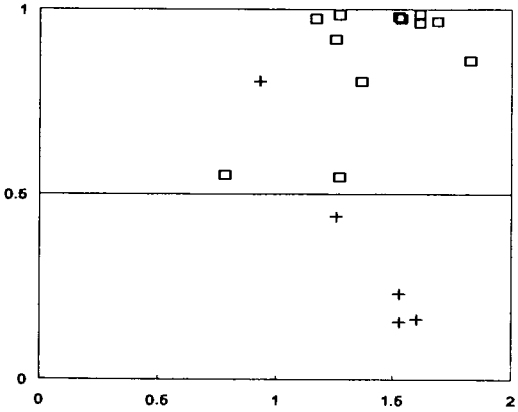


図 2: カーネル関数を利用したファジィc-平均法による分類 (λ=10 $cnst$=0.8)

7 おわりに

本稿では，ファジィマルチ集合の情報検索モデルへの応用として，ファジィマルチ集合間にコサイン相関を用いた類似度を適用し，文献データから得られるファジィマルチ集合を分類するために，ファジィc-平均法によるクラスタリングアルゴリズムについて考察した．

また，ファジィc-平均法の拡張として，SVM の手法に用いられるカーネル関数を利用したファジィc-平均クラスタリングにおいて，カーネル関数を用いることの効果について考察した．

これにより，用語と文献の関連性から得られたファジィマルチ集合を，上記のクラスタリングアルゴリズムにより有効に分類することができた．また，カーネル関数を利用することで分類性能を向上させることができた．しかしながら，**K-FCA** は **FCA** に比べて計算量が非常に多くかかるという問題点がある．

今後の課題としては，今回のように文献に関するクラスタリングを行う際に，用語と文献の関連性から得られるファジィマルチ集合をどのように作成していくか，すなわち，選択する用語数を増やしたり，適切な帰属度の付与の仕方について検討していく必要があると考えている．また，カーネル関数を利用する際には，アルゴリズムの実行時間の短縮，最適なパラメータ値の設定方法，他のカーネル関数の利用などについて検討していきたい．

さらに，ファジィマルチ集合については，ラフ集合との関連が注目されており，ラフ集合とファジィマルチ集合，クラスタリングをあわせ用いた情報検索モデルを構築する試みについても検討していきたい．

なお，この研究には平成14年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C)(2)) 13680475 の補助を受けた．

参考文献

[1] W.Blizard, Real-valued multisets and fuzzy sets, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 33, pp. 77–97, 1989.

[2] 宮本定明, ファジィマルチ集合の基本演算について. 日本ファジィ学会誌, Vol.8, No.4, pp. 639–645, 1996.

[3] G.Salton, M.J.McGill, *Introduction to Modern Information Retrieval*, McGraw-Hill, 1983.

[4] R.R.Yager, On the theory of bags, *Int. J. General Systems*, Vol. 13, pp. 23–37, 1986.

[5] V.Vapnik, *Statistical Learning Theory*, Wiley, New York, 1998.

[6] 宮本定明, 馬屋原一孝, クラスターサイズの調整機能をもつファジィc-平均法, 第16回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 537–538, 2000

連絡先
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学 機能工学系 宮本研究室
水谷 清隆
Tel: 029-853-6553
Fax: 029-853-5207
E-mail: kiyotaka@odin.esys.tsukuba.ac.jp

決定グラフを応用した決定表の階層化について

Hierarchy of Decision Tables by Applying Decision Diagrams

高木 昇　　中島 恭一

Noboru Takagi　Kyoichi Nakashima

富山県立大学工学部電子情報工学科

Dept. of Elec. & Informatics, Toyama Prefectural University

Abstract: One of the main aims of the rough sets theory is to extract decision rules from decision tables. Generally, the size of a decision table increases in exponentially with the number of attributes existing in that decision table. It makes us difficult to complete the task of extracting decision rules. The functional decomposition is one of the attractive ways for reducing the size of decision tables. This paper focuses a method for decomposing a decision table in hierarchically. This method is done by applying binary decision diagrams, which are well known data representations for binary logic functions. Finally, the paper shows experimental results, which indicate that the proposed method is able to reduce the size of decision tables dramatically.

1　はじめに

ラフ集合では, 与えられた決定表から如何に決定ルールを導出するかが一つの課題である [1]. 決定表に存在する属性数に対して, 一般に決定表のサイズは指数関数的に増加し, 従って決定ルールの導出も困難となる. 決定表は, 論理関数の立場から眺めれば, 不完全記述関数の真理値表と同一である. そこで, 本文では, 論理関数の関数分解を応用して決定表の分解を提案する. 決定表を階層的に分解することにより, 階層化された各部分決定表のサイズの和は元の決定表と比較して縮小されることが期待される. 本文では, 論理関数の一つの表現方法である, 二分決定グラフを応用した論理関数の関数分解に着目し, 決定表の階層的分解について述べる. なお, 本文では, 決定表の特殊な場合である 2 値論理関数を対象にして議論を進める. 2 値論理関数の議論はそのまま決定表の議論へと拡張することは容易である. また, 本文で述べる二分決定グラフによる決定表階層化の有効性を示すために, 論理設計で一般に用いられる MCNC ベンチマーク関数を用いて, 真理値表 (即ち, 決定表) がどの程度元の真理値表と比較して縮小されたかを, 計算機実験により示す.

2　関数分解

n 変数 2 値論理関数 f の入力パターン数は 2^n である. 入力パターン数 2^n は f の真理値表の大きさを表現しているので, 以下これを真理値表面積と呼ぶ. 今, n 入力 1 出力の 2 値論理関数 f(図 1.1 参照) が図 1.2 のように二つの部分関数 h と g で実現できるとする. h の入力変数を n_1, 出力数を 1 とすれば, g の入力数は n_2+1(但し, $n=n_1+n_2$) となる. このとき, h の真理値表面積は 2^{n_1}, g のそれは 2^{n_2+1} となる. n が大きいときには, $2^n \gg 2^{n_1}+2^{n_2+1}$ が成立する. 従って, f を直接取り扱うよりは, f を h と g に分解して別々に取り扱う方が極めて容易である. このように関数をいくつかに分解して別々に取り扱う方法を関数分解という.

分解された真理値表の出力のパターン数を列複雑度

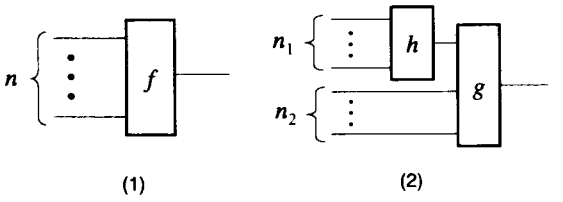


図 1: 関数分解

と呼び, μ で表す. 列複雑度が求まれば部分関数 h の出力線数が求まる [2]. 分解した論理関数の評価は, 真理値表面積で行う. 真理値表面積は, (出力線数) × (入力パターン数) で求める. 完全定義な n 入力 m 出力 2 値論理関数の真理値表面積は, $m \times 2^n$ で与えられる. 不完全記述関数の場合には, 入力パターンのいくつかが Don't Care となるので, 入力パターンの総数は 2^n より少なくなる. 従って, 関数分解が実行された際, いくつかの部分関数に Don't Care が生じれば, 真理値表面積が小さくなる.

本文では, 関数分解の評価をする際, 真理値表面積を用いる.

3　二分決定グラフを応用した関数分解

二分決定グラフ (Binary Decision Diagram: BDD) は論理関数をグラフ的に表現した非巡回有向グラフのことである [3]. 例えば, $f=x_1 \vee x_2\bar{x}_3$ において, $x_1=1$ とおくと $f=1$ となる. $x_1=0$ の場合には $x_2=0$ とすると, $f=0$ となる. また, $x_1=0$ かつ $x_2=1$ の場合には, $x_3=1$ の時 $f=0$, $x_3=0$ の時 $f=1$ となる. 図 2 は, この手続きを決定グラフとして表現したものである. 図 2 において, 終端節点は論理関数値に対応し, 終端節点以外の非終端節点は, 展開すべき変数に対応している. このような決定グラフを BDD と呼ぶ.

BDD では様々な性質が示されいる. 特に, 展開する変数順序を固定し, 冗長な節点の削除と同型な部分グラフの共有を可能な限り実行した BDD を既約順序付 BDD と呼び, 論理関数 f に対して一意的に定まること

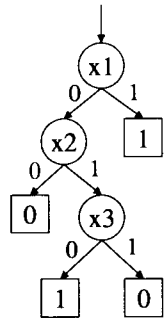


図 2: $f = x_1 \vee x_2\bar{x}_3$ の BDD

が証明されている [3]. 更に, 関数分解と BDD の間には, 次の定理が証明されている [2].

定理 1 変数集合 X の分割を (X_1, X_2) とする. n 変数関数 $f(X)$ の BDD が図 3 に示すように, 上ブロックが変数集合 X_1 で展開され, 下ブロックが変数集合 X_2 で展開されていたとする. 図 3 の BDD に対して, 二つのブロックの境界で接続している下ブロックの節点の数を k とする (図 3 の例では $k = 3$). また, f の分解 $f = g(h(X_1), X_2)$ に対する列複雑度を μ とする. このとき, $k = \mu$ である.

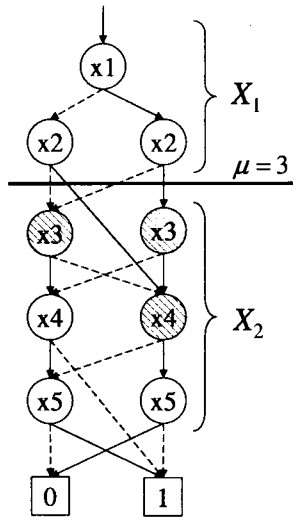


図 3: BDD による関数分解

4 計算機実験

BDD では, 隣接する変数を交換した変数順序に対応する BDD の再構成は容易である [4]. 従って, 変数交換を繰り返し適用することにより, 並列的な関数分解法を試みる. また, 並列的関数分解を論理設計で用いられるベンチマーク関数に対して適用することにより, その有効性を計算機実験による示す. 本文では, 16 変数以上の MCNC ベンチマーク関数 14 種類において, 変数順序を 1000 回並び変えて BDD による関数分解を行った. 表 1 は計算機実験によって得られたデータである. 関数分解後の真理値表面積については, どの関数においても関数分解によって効果的に縮小されている.

表 1: 実験結果

関数名	入力数	出力数	分解前	分解後
b9	41	21	4.62×10^{13}	5.06×10^{7}
c8	28	18	4.83×10^{9}	677512
cc	21	20	4.19×10^{7}	21144
cht	47	36	5.07×10^{15}	6.71×10^{8}
cm163a	16	5	327680	1400
cmb	16	4	262144	1932
cordic	23	2	1.68×10^{7}	7548
count	35	16	5.80×10^{11}	5.30×10^{6}
example2	85	66	2.55×10^{27}	8.44×10^{14}
i5	133	66	7.19×10^{41}	1.42×10^{22}
lal	26	19	1.28×10^{9}	143022
pm1	16	13	851968	2640
sct	19	15	7.86×10^{6}	9732
x4	94	71	1.41×10^{30}	1.58×10^{16}

5 まとめ

本文では, 2 値論理関数を例にして, 決定表の階層化について議論した. 二分決定グラフに基づく決定表の階層化は, 本計算機実験によれば, どれもその真理値表面積が, 約 90%程度縮小されている. この結果は, 大規模な決定表を取り扱う際, 決定表の階層化が極めて有効に働くことを示している.

参考文献

[1] Z. Pawlak: *Rough Sets - Theoretical Aspects of Reasoning about Data*, Kluwer Academic Publishers (1991)

[2] T. Sasao: "FPGA Design by Generalized Functional Decomposition," *Logic Synthesis and Optimization*, Kluwer Academic Publishers, pp. 233-258 (1993)

[3] R. E. Bryant: "Graph-based Algorithm for Boolean Function Manipulation," *IEEE Trans. Comput.*, Vol. C-35, No. 8, pp. 677-691 (1986)

[4] M. Fujita, Y. Matsunaga and T. Kakuda: "On Variable Ordering of Binary Decision Diagrams for The Application of Multi-level Synthesis," *Proceedings of the European Conference on Design Automation*, pp. 50-54 (1991)

連絡先:
〒 939-0398
富山県射水郡小杉町黒河 5180
富山県立大学工学部電子情報工学科
髙木　昇
Tel: (0766)56-7500 内線 461
Fax: (0766)56-8022
E-mail: takagi@pu-toyama.ac.jp

非単調な決定属性をもつ情報表へのラフ集合アプローチ

A Rough Set Approach to Information Tables with Nonmonotonic Decision Attributes

乾口 雅弘
Masahiro INUIGUCHI
大阪大学大学院基礎工学研究科
Graduate School of Engineering Science
Osaka University

米田 壮志
Takeshi YONEDA
大阪大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering
Osaka University

谷野 哲三
Tetsuzo TANINO
大阪大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering
Osaka University

Abstract: Rough set approaches have been developed and extended to treat dominance relations on attribute values. However, the monotonicity between conditional attributes and a decision attribute is implicitly assumed. Therefore non-monotonic preference information tables cannot be analyzed by the previous rough set approaches. In this paper, we propose a new rough set approach to analyze non-monotonic preference information tables. We show that all decision rules with minimal conditions can be extracted by extending the conventional decision matrix.

1. はじめに

決定に最小限必要な属性や極小な決定ルールを決定表から抽出する方法として，ラフ集合に基づく方法がある．通常のラフ集合 [1] では名義的な属性を仮定しているため，序数属性を含む決定表の場合には，直観に矛盾した結果が得られることがある [2]．Greco ら [2] は，支配関係の下でのラフ集合を定義し，序数属性を含む決定表の解析に有効であることを示している．しかし，Greco らの方法では，条件属性と決定属性間の単調性を仮定しているため，ほどよい値が好ましい条件属性はうまく取り扱えない．現実には，健康診断における血圧や料理における調味料の量など，ほどよい値が好ましい場合もある．本研究では，ほどよい値が好ましい条件属性をもつ決定表のラフ集合による解析手法を考察する．ここで扱う決定表は，各対象の好ましさを示すもので，選好情報表とも呼べる．この目的に応じてラフ集合を一般化し，選好情報表から極小な条件をもつ決定ルールを抽出する方法を議論する．

2. 選好情報表

選好情報表 S は $S = \langle U, C \cup \{d\}, V, f \rangle$ の 4 項組で表される．$U = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$ は対象の集合であり，C は条件属性の集合，d は好ましさを示す決定属性である．V は属性 a の定義域である V_a により，$V = \bigcup_{a \in C \cup \{d\}} V_a$ と表される．$f : U \times C \cup \{d\} \to 2^V$ は情報関数であり，対象 x と属性 a に対して属性値 $f(x,a) \in V_a$ を返す．各属性 $a \in C \cup \{d\}$ に対して属性値間の大小などを示す全順序関係 S_a が与えられていると仮定する．表 1 に選好情報表の例を示す．この表では，$C = \{\text{Manure}, \text{Water}\}$ であり，$d = \text{Evaluation}$ である．

3. ラフ集合の一般化

通常のラフ集合は，同値関係の下で定義されてきた．このことより，同値関係を任意の 2 項関係に一般化することにより，より一般的なラフ集合が定義できる．一方，同値関係が与えられていることと，対象の分割が与えられていることは等価であるので，分割を集合族に一般化することによるラフ集合の一般化も考えられる．これらの一般化は異なり，工学応用上，解析目的に応じたラフ集合の定義が肝要となる．

表 1: 選好情報表の例

Objects	M:Manure	W:Water	Evaluation
x_1	Large	Very Large	Good
x_2	Very Large	Medium	Good
x_3	Large	Large	Good
x_4	Medium	Medium	Good
x_5	Very Large	Very Large	Bad
x_6	Small	Large	Bad
x_7	Medium	Small	Bad
x_7	Large	Small	Bad

本研究では，目標クラス (対象の集合)X に対して，

$$\begin{aligned}&\text{if } f(x,a_1) \in [l_{a_1}, r_{a_1}] \text{ and } \ldots \\ &\qquad \text{and } f(x,a_p) \in [l_{a_p}, r_{a_p}] \text{ then } x \in X \end{aligned} \quad (1)$$

という形式の決定ルールを抽出したいので，ラフ集合を集合族 $\mathcal{F} = \{F_1, F_2, \ldots, F_q\}$ に基づいて定義する．すなわち，下近似，上近似は次式で定められる．

$$\mathcal{F}_*(X) = \bigcup \{F_i \mid F_i \subseteq X, i = 1,2,\ldots,q\} \quad (2)$$

$$\mathcal{F}^*(X) = U - \bigcup \{F_i \mid F_i \subseteq U - X, i = 1,2,\ldots,q\} \quad (3)$$

X のラフ集合は対 $(\mathcal{F}_*(X), \mathcal{F}^*(X))$ として定義される．

4. 集合族と目標クラス

式 (2)，(3) によるラフ集合を定義するには，集合族 $\mathcal{F}$ を定義する必要がある．本研究では，式 (1) の決定

ルールに応じて，$A \subseteq C$ に対して次のように定義する．

$$\mathcal{F}_A = \{\langle x_i, x_j\rangle_A \mid i,j = 1,2,\ldots,n\} \quad (4)$$

$$\langle x_i, x_j\rangle_A = \{x_h \in U \mid \max(f(x_i,a)f(x_j,a))S_a f(x_h,a) \text{ and } f(x_h,a)S_a \min(f(x_i,a)f(x_j,a)),\ \forall a \in A\} \quad (5)$$

一方，決定属性 d にも全順序関係 S_d が存在することから，$w \in V_d$ に対して，目標クラス X として，次の上側累積集合 $Cl_w^{\geq}$ と下側累積集合 $Cl_w^{\leq}$ を用いる．

$$Cl_w^{\geq} = \{x \in U \mid f(x,d)S_d w\} \quad (6)$$

$$Cl_w^{\leq} = \{x \in U \mid wS_d f(x,d)\} \quad (7)$$

5. 決定ルールの抽出

極小の条件部をもつ式 (1) のすべての決定ルールを抽出するため，従来のラフ集合に基づくルール抽出に用いられてきた決定行列 [3] を修正する．従来のラフ集合では，下近似に帰属する対象ごとに決定ルールが求められたが，本研究の場合は，ルールの条件部が集合となっているため，これに対応する集合 $\langle x_i, x_j\rangle_A$ に対して決定ルールが求められる．このことに注意すると，$Cl_w^{\geq}$ に対する決定行列 $M(Cl_w^{\geq})$ の第 (i,j,k) 成分は次式で定められる．

$$M_{ijk}(Cl_w^{\geq}) = \begin{cases} \{(q,i,j) \mid x_k \notin \langle x_i, x_j\rangle_{\{q\}},\ q \in C\}; \\ \qquad \langle x_i, x_j\rangle \subseteq Cl_w^{\geq},\ x_k \notin Cl_w^{\geq} \text{のとき} \quad (8) \\ \Lambda;\ \text{その他} \end{cases}$$

次に，$M_{ijk}(Cl_w^{\geq})$ の各要素 (q,i,j) を命題 $x \in \langle x_i, x_j\rangle_{\{q\}}$ とみなし，決定関数を

$$B(Cl_w^{\geq}) = \bigvee_{i,j:\langle x_i,x_j\rangle \subseteq Cl_w^{\geq}} \bigwedge_{k:x_k \notin Cl_w^{\geq}} \bigvee M_{ijk}(Cl_w^{\geq}) \quad (9)$$

と定める．ただし，Λ に対しては恒真命題を対応させる．決定関数 $B(Cl_w^{\geq})$ を主加法形に変形すると，論理和で結合される各論理積項が決定クラス $Cl_w^{\geq}$ に対応する極小な条件をもつ決定ルールの条件部になる．ここで，式 (5) の定義より，命題 $x \in \langle x_i, x_j\rangle_{\{q\}}$ は $f(x,q) \in [\min(f(x_i,q), f(x_j,q)), \max(f(x_i,q), f(x_j,q))]$ と書け，上の計算で得られる条件部は，式 (1) の条件部の形式になることに注意しよう．

6. 数値例

表 1 の選好情報表を提案手法により，$w = \text{good}$ として $Cl_w^{\geq}$ に関する決定行列を求めると表 2 のようになる．表 2 では，決定行列の各成分の要素内の i,j 部分を省略するとともに，Λ となる成分は除いている．これに基づき，極小な条件部をもつ決定ルールを抽出すると，次の三つの決定ルールが得られる．

if Water is Medium then Eval is Good

表 2: 決定行列

	x_5	x_6	x_7	x_8
$\langle x_1, x_1\rangle$	M	M,W	M,W	W
$\langle x_1, x_3\rangle$	M	M	M,W	W
$\langle x_1, x_4\rangle$	M	M,W	W	W
$\langle x_2, x_2\rangle$	W	M,W	M,W	M,W
$\langle x_2, x_3\rangle$	W	M	M,W	W
$\langle x_2, x_4\rangle$	W	M, W	W	W
$\langle x_3, x_3\rangle$	M,W	M	M,W	W
$\langle x_3, x_4\rangle$	M,W	M	W	W
$\langle x_4, x_4\rangle$	M,W	M,W	W	W

if Manure is Medium to Large and Water is Medium to Very Large then Eval is Good

if Manure is Large to Very Large and Water is Medium to Large then Eval is Good

各ルールを支持する対象は，(x_1,x_3), (x_2,x_4), (x_1,x_3,x_4), (x_2,x_3) である．条件属性と決定属性間の単調性を仮定した Greco ら [2] の方法では，$Cl_w^{\geq}$ に関する決定ルールは得られない．さらに，条件属性，決定属性とも名義的と仮定した通常のラフ集合 [1] による解析では，

if Manure is Large and Water is Very Large then Eval is Good

if Water is Medium then Eval is Good

if Manure is Large and Water is Large then Eval is Good

が得られる．各ルールを支持する対象は，x_1, (x_2,x_4), x_3 である．提案手法により支持する対象の多い決定ルールが得られることがわかる．

参考文献

[1] Z. Pawlak: *Rough Sets.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1991).

[2] S. Greco, B. Matarazzo, R. Słowiński: New developments in the rough set approach to multi-attribute decision analysis, *Bulletin of International Rough Set Society*, **2**, 2/3, 57-87 (1998).

[3] N. Shan, W. Ziarko : Data-based acquisition and incremental modification of classification rules, *Computational Intelligence*, **11**, 357-370 (1995).

［連絡先］ 〒560-8531 豊中市待兼山町 1-3
大阪大学大学院基礎工学研究科
システム創成専攻社会システム数理領域
乾 口 雅 弘
Tel/Fax 06-6850-6350
E-mail: inuiguti@sys.es.osaka-u.ac.jp

集団意思決定問題へのラフ集合の応用

Rough Sets Application to Group Decision Making Problems

杉原 一臣　石井博昭　田中英夫
Kazutomi SUGIHARA　Hiroaki ISHII　Hideo TANAKA
福井工業大学経営工学科　大阪大学大学院情報科学研究科　広島国際大学人間環境学部
Fukui University of Techinology　Osaka University　Hiroshima International University

Abstract Rough sets theory proposed by Z.Pawlak is approximation concepts for the data analysis. In rough sets, by approximating ambiguous information with the given data, a certain interpretation is given to them. The given interpretations are replaces with IF-Then rules. In the conventional studies, the ambiguous information is derived from only one source of information. However, there are some cases of plural sources of knowledge in the actual problems. In this paper, a group decision making problem is considered as an example of multiple sources. The rough sets technique is proposed to integrate their judgments and obtain more believable IF-Then rules by approximating them with the existence data.

1 はじめに

ラフ集合はZ.Pawlak[1]によって提案されたデータ分析のための近似概念である．ラフ集合では，提示されたあいまいな情報を既存のデータにより近似し，それらを関連付けることによって，その情報に何らかの解釈が与えられる．従来のラフ集合では，提示される情報の出所が1つである場合が多い．しかし現実の問題では，その情報源が必ずしも1つであるとは限らない．例えば，専門家の判断が1人では信頼性に欠けるとき，複数の専門家に判断を仰ぐ場合ような場合も考えられる．そこで本論文では，集団意思決定問題を取り上げ，複数の意思決定者（情報源）が存在する場合のラフ集合によるデータ分析手法を提案する．

2 集団意思決定問題

ラフ集合では情報システムは$S=(U,C\cup\{d\},V,f)$で表現される．ただし，Uは対象の有限集合であり，Cは条件属性集合，$\{d\}$は決定を表す．また，fは$\forall q\in C\cup\{d\}$に関して$f:X\times C\cup\{d\}\to V$となる関数であり，$V_q$は属性$q$の属性値集合を表す．$f(x,q)$は対象$x(\in U)$の属性$q$に関する属性値を示している．従来のラフ集合では，1つの対象xに対して，必ず1つの決定$d(x)$が与えられているという仮定がある．しかし，意思決定者が必ずしも1人でない場合がある．そこで，複数の決定者が評価を与える場合を想定し，1つの対象xに対し複数の決定が与えられている場合のデータ分析を考える．

対象xに対して意思決定者$i(i=1,\cdots,n)$が下した決定を$d_i(x)$と表す．また，意思決定者の重要度(発言力)を$w_i(\geq 0),\sum_i w_i=1$とする．ここで，決定$d(x)$の集合は幾つかのクラスに分類されているものと仮定する．すなわち，R個のクラスに分類したときのr番目のクラスを$Cl_r(r=1,2,\cdots,R)$と表わし，以下の性質を満たしているとする．

$$\exists\, r,\forall x\in U,\ d(x)\in Cl_r,$$
$$\forall\, s,t(s\neq t)\ \ Cl_s\cap Cl_t=\phi,$$

このとき，xに与えられた全ての決定について，全意思決定者の総重要度Wを求める．すなわち，xの決定$d(x)$がCl_tである場合の総重要度$W(Cl_t^x)$は，

$$W(Cl_t^x)=\sum_i w_i\delta(d_i(x),Cl_t) \tag{1}$$

となる．ただし，

$$\delta\left(d_i(x),Cl_t\right)=\begin{cases}1, & d_i(x)=Cl_t\\ 0, & d_i(x)\neq Cl_t\end{cases} \tag{2}$$

となる．この値を$d(x)$がCl_tである支持率とみなす．この支持率を用いて，次のような集団の意思決定を定義する．

$$d^{\epsilon}(x)=\bigcup_{\{Cl_t\in U|W(Cl_t^x)\geq\epsilon\}} Cl_t \tag{3}$$

ここでϵは，集団の意思決定として採択されるために最低限必要な支持率を表す．もし$\epsilon=1$であれば，集団の決定として全会一致が必要であることを表している．また$\epsilon=0$であれば，全員の評価を列挙している状態を表す．この集団決定に基づき，新たな情報システム$S'=\{U,C\cup\{d^{\epsilon}\},V,f\}$が形成される．

任意の部分集合$P\subseteq Q$上の不識別関係をR_P，対象xに対する同値クラスをR_Pと表し，以下のように定義する．

$$R_P=\{(x,y)\in U^2|f(x,q)=f(y,q),\ \forall\, q\in P\} \tag{4}$$
$$R_P(x)=\{x\in U^2|f(x,q)=f(y,q),\forall\, q\in P\} \tag{5}$$

表-1：医療データベースの例

Patient (x)	Headach (H)	Muscle Pain (M)	Temperature (T)	$d_1(x)$ 0.5	$d_2(x)$ 0.3	$d_3(x)$ 0.2	$d^{0.3}(x)$	$d^{0.5}(x)$	$d^{0.8}(x)$
1	No	Yes	High	Yes	No	Yes	Yes,No	Yes	—
2	Yes	No	High	Yes	No	No	Yes,No	Yes,No	—
3	Yes	Yes	Very High	Yes	No	Yes	Yes,No	Yes	—
4	No	Yes	Normal	No	No	No	No	No	No
5	Yes	No	High	No	No	Yes	No	No	No
6	No	Yes	Very High	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes

ここで，クラスの部分集合 $Cl_t^\epsilon (\subseteq Cl_1 \cup \cdots \cup Cl_R)$ を考えると，不識別関係によるクラス Cl_t の下近似集合 $\overline{P}(Cl_t^\epsilon)$ と上近似集合 $\overline{P}(Cl_t^\epsilon)$ を次のように定義する．

$$\underline{P}(Cl_t^\epsilon) = \{x \in U | d^\epsilon(y) = Cl_t,\ \forall\, y \in R_P(x)\} \quad (6)$$

$$\overline{P}(Cl_t^\epsilon) = \{x \in U | d^\epsilon(y) \cap Cl_t \neq \phi,\ \forall\, y \in R_P(x)\} \quad (7)$$

下近似集合と上近似集合の定義から，以下のような Cl_t^ϵ の包含関係が成り立つ．

$$\underline{P}(Cl_t^\epsilon) \subseteq Cl_t^\epsilon(x) \subseteq \overline{P}(Cl_t^\epsilon) \quad (8)$$

また，$\overline{Cl_t^\epsilon} = (Cl_1 \cup \cdots \cup Cl_R)/Cl_t$ となるクラス $\overline{Cl_t^\epsilon}$ を定義する．この Cl_t^ϵ の下近似集合 $\underline{P}(\overline{Cl_t^\epsilon})$ と上近似集合 $\overline{P}(\overline{Cl_t^\epsilon})$ は次のような相補関係を持つ．

$$\underline{P}(\overline{Cl_t^\epsilon}) = U - \overline{P}(Cl_t^\epsilon) \quad (9)$$

$$\overline{P}(\overline{Cl_t^\epsilon}) = U - \underline{P}(Cl_t^\epsilon) \quad (10)$$

3 数値例

表-1のような医療データベースの例を考える．6人の患者について，頭痛 (Headache)・筋肉痛 (Muscle Pain)・体温 (Temperature) の3つの症状を見て，3名の医師がそれぞれ下した判断が $d_1(x), d_2(x), d_3(x)$ であり，その重要度はそれぞれ 0.5, 0.3, 0.2 となっている．また，集団決定の最低基準 ϵ を 0.3, 0.5, 0.8 としたときの集団の決定を表-1 に表す．ϵ の値が小さい場合，集団の意思決定は多様になり，相反する評価が共に採用される．また ϵ の値が大きいと，各専門家の評価を集団の決定として集約できないため，いくつかの対象に集団の決定が与えられないという状況が起こっている．

3属性 $P = \{Headache, Muscle, Temperature\}$ での同値クラスは

$$R_P(1) = \{1\} \quad R_P(2) = \{2,5\}$$
$$R_P(3) = \{3\} \quad R_P(4) = \{4\}$$
$$R_P(5) = \{2,5\} \quad R_P(6) = \{6\}$$

となった．次に集団決定の最低基準 ϵ を 0.5 とすると，各クラスの下近似・上近似集合は $\underline{P}(Cl_t^\epsilon)$, $\overline{P}(Cl_t^\epsilon)$ それぞれ以下のようになる．

$$\underline{P}(Cl_{Yes}^{0.5}) = \{1,3,6\} \quad \overline{P}(Cl_{Yes}^{0.5}) = \{1,2,3,5,6\}$$
$$\underline{P}(Cl_{No}^{0.5}) = \{4\} \quad \overline{P}(Cl_{No}^{0.5}) = \{2,4,5\}$$

下近似・上近似集合から，次のような IF-Then ルールが導出された．() はルールを支持している対象を表す．

- If $f(x, Headache)$ = No, If $f(x, Musule)$ = Yes, $f(x, Temp.)$ = High, $d^{0.5}(x)$ = Yes. (1)
- If $f(x, Headache)$ = Yes, If $f(x, Musule)$ = No, $f(x, Temp.)$ = High, $d^{0.5}(x)$ = Yes or No. (2,5)
- If $f(x, Headache)$ = Yes, If $f(x, Musule)$ = Yes, $f(x, Temp.)$ = Very High, $d^{0.5}(x)$ = Yes. (3)
- If $f(x, Headache)$ = No, If $f(x, Musule)$ = Yes, $f(x, Temp.)$ = Normal, $d^{0.5}(x)$ = No. (4)
- If $f(x, Headache)$ = No, If $f(x, Musule)$ = Yes, $f(x, Temp.)$ = Very High, $d^{0.5}(x)$ = Yes. (6)

4 おわりに

本論文では，集団意思決定問題のためのラフ近似手法を提案した．ラフ集合で取り扱われる情報のあいまいさや矛盾をできるだけ省くためには，こういった集団の決定を用いることも十分に有用であると考えている．

参考文献

[1] Z.Pawlak : Rough Classification, *International Journal of Man-Machine Studies*, 20, 469-483, 1984

問い合せ先 〒910-8505
福井市学園3丁目6番1号
福井工業大学工学部経営工学科
杉原 一臣
電話:0776-22-8111, Fax:0776-29-7891(代)
E-mail : sugihara@ccmails.fukui-ut.ac.jp

ラフ・ファジィ集合とAnnotated論理

Rough Fuzzy Sets and Annotated Logic

村井 哲也　赤間 世紀　工藤 康生
Tetsuya MURAI　Seiki AKAMA　Yasuo KUDO
北海道大学　帝京平成大学　室蘭工業大学
Hokkaido Univ.　Teikyo Heisei Univ.　Muroran Inst. of Tech.

Abstract: Rough sets and rough fuzzy sets are described in a setting of propositional annotated modal logic developed by Akama and Abe. For the purpose a proof theory and a Kripke semantics of the logic proposed by Akama and Abe are explained with slight adaptation for rough fuzzy sets. Then rough sets and rough fuzzy sets are shown to be represented in a model of the logic.

1 はじめに

情報の不完全性やあいまいさを扱う有力な武器であるZadeh[8]のファジィ集合とPawlakのラフ集合[6]を統合したものにラフ・ファジィ集合やファジィ・ラフ集合がある[4, 7]. しかし, これらと自動推論との関係に関する論理的研究は少なく, Akamaら[2]によるファジィannotated論理などがある. da Costaらが研究したAnnotated論理[1, 2, 3, 5]は情報の不完全性と矛盾を形式的に扱う論理であって, 矛盾するが自明でない(paraconsistentな)理論を扱える. これに基づき, Subrahmanianら[5]は論理プログラミングを矛盾を扱えるように拡張した. 本稿では, ラフ集合とラフ・ファジィ集合が命題annotated様相論理の枠組で表現できる事を示す.

2 ラフ集合とラフ・ファジィ集合

全体集合Uとその上の同値関係Rが与えられた時, 組$\langle U, R\rangle$をU上の**Pawlak近似空間**[6]という. Pawlak近似空間$\langle U, R\rangle$において, Uの任意の部分集合Xに対して, XのRに関する**下近似**と**上近似**は

$$\underline{R}(X) \stackrel{\text{df}}{=} \{x \in U \mid [x]_R \subseteq X\}, \quad (1)$$

$$\overline{R}(X) \stackrel{\text{df}}{=} \{x \in U \mid [x]_R \cap X \neq \emptyset\}, \quad (2)$$

で定義される. $[x]_R$はRに関するUの元xの同値類である. ラフ集合のファジィ化には, Uの部分集合Xをファジィ化した**ラフ・ファジィ集合**とU上の関係Rをファジィ化した**ファジィ・ラフ集合**がある. 本稿では第一のファジィ化を扱う. Thiele[7]は下・上近似の定義を特性関係を使って, それぞれ, $\chi_{\underline{R}(X)}(x)=\inf\{\chi_X(y) \mid y \in [x]_R\}$, $\chi_{\overline{R}(X)}(x)=\sup\{\chi_X(y) \mid y \in [x]_R\}$と書き換えた結果, 次のラフ・ファジィ集合の表現を得た:

$$\mu_{\underline{R}(F)}(x) = \inf\{\mu_F(y) \mid y \in [x]_R\}, \quad (3)$$

$$\mu_{\overline{R}(F)}(x) = \sup\{\mu_F(y) \mid y \in [x]_R\}. \quad (4)$$

3 命題annotated様相論理

τを**有限(完備)束**$\langle |\tau|, \leq, \sim\rangle$で, (a) $|\tau|$は単位区間$[0,1]$に属する有理数の集合, (b) $0, 1 \in \tau$, (c) $|\tau|$は否定演算子$\sim$(ここで, $\sim(a)=1-a$)に関して閉じている, を満たすとする. ラフ・ファジィ集合を扱うための**言語**$\mathfrak{L}_{\mathrm{RF}}(\mathfrak{P}, \tau)$を**命題記号**の集合$\mathfrak{P}$と有限束$\tau$から, (a) $\neg$, $\wedge$, $\vee$, $\rightarrow$, (b) $\Box$, $\Diamond$, (c) $|\tau|$の元, (d) 括弧 (,), を使って, 規則 (i) $\mathsf{p} \in \mathfrak{P}$, $\alpha \in |\tau| \Rightarrow \mathsf{p}_\alpha \in \mathfrak{L}_{\mathrm{RF}}(\mathfrak{P}, \tau)$, (ii) $p, q \in \mathfrak{L}_{\mathrm{RF}}(\mathfrak{P}, \tau) \Rightarrow \neg p, p \wedge q, p \vee q, p \rightarrow q, \Box p, \Diamond p \in \mathfrak{L}_{\mathrm{RF}}(\mathfrak{P}, \tau)$, で生成される最小の集合とする.

言語$\mathfrak{L}_{\mathrm{RF}}(\mathfrak{P}, \tau)$の元を**式**と呼ぶ. 命題記号$\mathsf{p} \in \mathfrak{P}$と束の元$a \in |\tau|$に対し, p_αの形の式を**原子式**という. 式pと非負整数$k \geq 0$に対し, $\neg^k p$を$\neg^0 p$はp自身, $\neg^1 p$は$\neg p$, $\neg^k p$は$\neg(\neg^{k-1} p)$と定義する. 命題記号$\mathsf{p} \in \mathfrak{P}$に対し, $\neg^k \mathsf{p}_\alpha$ $(k \geq 0)$の形の式を**ハイパー・リテラル**, ハイパーリテラルでない式を**複合式**と呼ぶ. **強い否定**$\neg_* p$は$p \rightarrow (p \rightarrow p) \wedge \neg(p \rightarrow p)$の省略形とする.

命題anotated様相論理K_τの**ヒルベルト式公理化**はAkamaら[1]が行った:

1. $p \rightarrow (q \rightarrow p)$
2. $(p \rightarrow (q \rightarrow r)) \rightarrow ((p \rightarrow q) \rightarrow (p \rightarrow r))$
3. $((p \rightarrow q) \rightarrow p) \rightarrow p$
4. $p, p \rightarrow q$からqを推論する
5. $(p \wedge q) \rightarrow p$
6. $(p \wedge q) \rightarrow q$
7. $p \rightarrow (q \rightarrow (p \wedge q))$
8. $p \rightarrow (p \vee q)$
9. $q \rightarrow (p \vee q)$
10. $(p \rightarrow r) \rightarrow ((q \rightarrow r) \rightarrow ((p \vee q) \rightarrow r))$
11. $(p' \rightarrow q') \rightarrow ((p' \rightarrow \neg q') \rightarrow \neg p')$
12. $q' \rightarrow (\neg q' \rightarrow p)$
13. p_0
14. $\neg^k \mathsf{p}_\alpha \leftrightarrow \neg^{k-1} \mathsf{p}_{1-\alpha}$ $(k > 0)$
15. $\mathsf{p}_\alpha \rightarrow \mathsf{p}_\beta$ $(\alpha \geq \beta)$
16. $(\mathsf{p}_{\alpha_1} \wedge \cdots \wedge \mathsf{p}_{\alpha_m}) \rightarrow \mathsf{p}_\alpha$, $(\alpha = \sup\{\alpha_1, \cdots, \alpha_m\})$
17. $\Box(p \rightarrow q) \rightarrow (\Box p \rightarrow \Box q)$
18. $\Diamond p \leftrightarrow \neg_* \Box \neg_* p$
19. pから$\Box p$を推論する

ここで, p, q, rは任意の式, p'とq'は複合式, p_αは原子式

である．次に，命題 annotated 様相論理の **Kripke 意味論**を説明する．**Kripke モデル** $\mathfrak{M}$ とは組 $\langle U, R, I\rangle$ であり，U は非空集合，R は U 上の二項関係，$I : \mathfrak{P} \times U \to \tau$ は解釈関数である．関係 $\mathfrak{M}, x \models p$ を帰納的に定義する：

1. 原子式 p_α に対して，
   (a) $\mathfrak{M}, x \models \mathsf{p}_\alpha$ iff $I(\mathsf{p}, x) \geq \alpha$
   (b) $\mathfrak{M}, x \models \neg^k \mathsf{p}_\alpha$ iff $\mathfrak{M}, w \models \neg^{k-1} \mathsf{p}_{1-\alpha}$
2. 式 p, q に対して，
   (a) $\mathfrak{M}, x \models p \wedge q$ iff $\mathfrak{M}, x \models p$ and $\mathfrak{M}, x \models q$
   (b) $\mathfrak{M}, x \models p \vee q$ iff $\mathfrak{M}, x \models p$ or $\mathfrak{M}, x \models q$
   (c) $\mathfrak{M}, x \models p \to q$ iff $\mathfrak{M}, x \not\models p$ or $\mathfrak{M}, x \models q$
3. 複合式 p に対して，
   (a) $\mathfrak{M}, x \models \neg p$ iff $\mathfrak{M}, x \not\models p$
4. 式 p に対して，
   (a) $\mathfrak{M}, x \models \Box p$ iff $\forall y (xRy \Rightarrow \mathfrak{M}, y \models p)$
   (b) $\mathfrak{M}, x \models \Diamond p$ iff $\exists y (xRy$ and $\mathfrak{M}, y \models p)$

Kripke モデル $\mathfrak{M}$ において，$\|p\|^{\mathfrak{M}} \stackrel{\text{df}}{=} \{x \in U \mid \mathfrak{M}, x \models p\}$，$U_R(x) \stackrel{\text{df}}{=} \{x \in U \mid xRy\}$ と定義すると，次を得る：

$$\|\Box p\|^{\mathfrak{M}} = \{x \in U \mid U_R(x) \subseteq \|p\|^{\mathfrak{M}}\}, \tag{5}$$
$$\|\Diamond p\|^{\mathfrak{M}} = \{x \in U \mid U_R(x) \cap \|p\|^{\mathfrak{M}} \neq \emptyset\}. \tag{6}$$

R が同値関係なら $U_R(x) = [x]_R$ であることに注意．本定式化の完全性に関しては Akama ら [1] を参照のこと．

4 ラフ・ファジィ集合と命題 annotated 様相論理

まず，ラフ集合に相当する $|\tau| = \{0, 1\}$ の場合を考える．原子式 p_1 の真理集合 $\|\mathsf{p}_1\|^{\mathfrak{M}}$ を P と書く．その特性関数は $\chi_{\mathsf{P}}(x) = 1$ iff $I(\mathsf{p}, x) = 1$ で定義される．式 (1), (2) と式 (5), (6) とをそれぞれ比較して

$$\underline{R}(\mathsf{P}) = \|\Box \mathsf{p}_1\|^{\mathfrak{M}} = \{x \in U \mid [x]_R \subseteq \|\mathsf{p}_1\|^{\mathfrak{M}}\},$$
$$\overline{R}(\mathsf{P}) = \|\Diamond \mathsf{p}_1\|^{\mathfrak{M}} = \{x \in U \mid [x]_R \cap \|\mathsf{p}_1\|^{\mathfrak{M}} \neq \emptyset\}$$

を得る．よって，ラフ集合は命題 annotated 様相論理の枠組で表現できる．

次に，ラフ・ファジィ集合に相当する一般の τ の場合を考える．各原子式 p_α $(\alpha \in |\tau|)$ の真理集合 $\|\mathsf{p}_\alpha\|^{\mathfrak{M}}$ はまた U の部分集合である．$\mathsf{P}_\alpha = \|\mathsf{p}_\alpha\|^{\mathfrak{M}}$ としよう．その特性関数は同様に $\chi_{\mathsf{P}_\alpha}(x) = 1$ iff $I(\mathsf{p}, x) \geq \alpha$ で定義される．集合族 $\{\mathsf{P}_\alpha\}_{\alpha \in |\tau|}$ からメンバシップ関数が構成できることはよく知られている：

$$\mu_{\mathsf{P}}(x) \stackrel{\text{df}}{=} \sup_{\alpha \in |\tau| \setminus \{0\}} \min(\alpha, \chi_{\mathsf{P}_\alpha}(x)). \tag{7}$$

このメンバシップ関数が表すファジィ集合を P とする．各レベル $\alpha \in |\tau|$ で

$$\underline{R}(\mathsf{P}_\alpha) = \|\Box \mathsf{p}_\alpha\|^{\mathfrak{M}} = \{x \in U \mid [x]_R \subseteq \|\mathsf{p}_\alpha\|^{\mathfrak{M}}\},$$
$$\overline{R}(\mathsf{P}_\alpha) = \|\Diamond \mathsf{p}_\alpha\|^{\mathfrak{M}} = \{x \in U \mid [x]_R \cap \|\mathsf{p}_\alpha\|^{\mathfrak{M}} \neq \emptyset\},$$

が成り立つ．一方，式 (3) と (4) から，次の二つのファジィ集合が得られる：

$$\mu_{\underline{R}(\mathsf{P})}(x) = \inf\{\mu_{\mathsf{P}}(y) \mid y \in [x]_R\}, \tag{8}$$
$$\mu_{\overline{R}(\mathsf{P})}(x) = \sup\{\mu_{\mathsf{P}}(y) \mid y \in [x]_R\}. \tag{9}$$

以上から，$\underline{R}(\mathsf{P})_\alpha = \underline{R}(\mathsf{P}_\alpha)$ と $\overline{R}(\mathsf{P})_\alpha = \overline{R}(\mathsf{P}_\alpha)$，すなわち，

$$\mu_{\underline{R}(\mathsf{P})}(x) = \sup_{\alpha \in |\tau| \setminus \{0\}} \min(\alpha, \chi_{\underline{R}(\mathsf{P}_\alpha)}(x)), \tag{10}$$
$$\mu_{\overline{R}(\mathsf{P})}(x) = \sup_{\alpha \in |\tau| \setminus \{0\}} \min(\alpha, \chi_{\overline{R}(\mathsf{P}_\alpha)}(x)). \tag{11}$$

が成立するかが問題となるが，実際，証明ができる．よって，ラフ・ファジィ集合も各レベル α で命題 annotated 様相論理の枠組で表現できる．

5 おわりに

Thiele[7] はラフ集合のファジィ化と Zadeh[9] の一般化モダス・ポネンスの間に興味深い関係を見出した．よって，annotated 論理によるラフ集合のファジィ化の考察はファジィ推論と自動推論や論理プログラミングとの関係を探る手がかりとなる．本研究の一部は日本学術振興会科学研究費基盤研究 (B) No.14380171 の援助を得た．

文 献

[1] Akama, S. and Abe, J.M. (1998): Many-Valued and Annotated Modal Logics. *Proc. of 28th ISMVL*, 114-119.

[2] Akama, S. and Abe, J.M. (2000): Fuzzy Annotated Logics. *Proc. of IPMU 2000*, 504-509.

[3] da Costa, N.C.A., Abe, J.M., Subrahmanian, V.S. (1991): Remarks on Annotated Logic. Zeitschr. f. Math. Logik und Grundlagen d. Math., **37**, 561-570.

[4] Dubois, D., Prade, H. (1990): Rough Fuzzy Sets and Fuzzy Rough Sets. International Journal of General Systems, **17**, 191-209.

[5] Lu,J.J., Henschen, L.J., Subrahmanian, V.S., da Costa, N.C.A. (1991): Reasoning in Paraconsistent Logics. *R.S.Boyer(ed.), Automated Reasoning: Essays in Honor of Woody Bledsoe*, Kluwer, 181-209.

[6] Pawlak, Z. (1991): *Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data*. Kluwer.

[7] Thiele, H. (1997): Rough Fuzzy Sets versus Fuzzy Rough Sets: An Interpretation and a Comparative Study using Concepts of Modal Logics. *Proc. 5th EUFIT*.

[8] Zadeh, L.A. (1965): Fuzzy Sets. Information and Control, 8(1965), pp.338-353.

[9] Zadeh, L.A. (1973): Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Analysis. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, **3**(1), 28-44.

連絡先:
村井 哲也
〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目
北海道大学 大学院工学研究科
システム情報工学専攻 数理情報工学講座
Phone & Fax: 011-706-6757
E-mail: murahiko@main.eng.hokudai.ac.jp

ソフト制御による電動四輪車の自動運転システムの開発

-動的障害物の回避-

Intelligent Soft Driving System for Four-wheeled Vehicle

-Elusion of Dynamic Obstacles-

井上 真樹　　安信 誠二
Masaki INOUE　　Seiji YASUNOBU
筑波大学 機能工学系
Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

Abstract There are electric four-wheeled vehicles to assist senior persons. Because of the vehicles' dynamical characteristic such as impossible to move abeam, it is difficult for these persons who has little experience and has little knowledge to drive. Also to judge the future state of dynamical obstacles and to decide how to elude them safely are more difficult. We installed the predictive fuzzy controller (evaluates the future states which several kinds of operation candidates were done and chooses the best one) that modeled humans' algorithms in the system. Human predicts the future states of dynamic obstacles and chooses an operation(wait, steer, go back, etc) to elude safely. To elude dynamic obstacles flexibly, we added expert's knowledge for safe driving to this controller. In this paper, we propose the intelligent soft driving system by the controller that can elude dynamic obstacles safely, and we confirm the effectiveness by a simulation experiment.

1　はじめに

高齢者等の移動を補助する目的で, 電動四輪車 (図 1) が市販されているが, その運転には切りかえしなどの知識・技術が必要である. しかし, その利用に免許等の取得が不要であるため, 車両の動特性を十分に理解できていない利用者が数多く存在する [1]. そこで, 知識・技術が不十分な利用者にも, 四輪車を利用できるよう操作支援システム [2] 等が研究されている. 特に, 近所への買い物などで利用する場合, 他の交通参加者に配慮した運転を行う必要がある. 文献 [3] によると, 多くの高齢ドラーバーは, 動的障害物が存在する交差点の右左折や車線変更などを苦手としていることが分かっている. その理由は, 自車両の運転操作だけではなく他車両や歩行者などの動的障害物の挙動に注意を払わなければならない事, 身体的衰えによって機敏な操作ができない事が原因であると考えられる. そのため, これらの電動四輪車の自動運転化・運転操作支援には, 動的障害物への対応が欠かせない.

これまでに, 我々は人間の運転知識をコンピュータに組み込むことで, 人間の意志を受け入れ協調する自動運転システム [4] を開発してきた. 本稿では, このシステムをベースに動的障害物に柔軟に対処する機能を付加したソフト制御による電動四輪車の自動運転システムを提案する.

図 1: 電動四輪車と動的障害物 (歩行者) の例

2　人間の運転知識

本研究では, 前輪操舵の四輪車を扱う. この四輪車はハンドルによる操舵とアクセル・ブレーキによる速度指令により運転する. このため真横に移動できない等の動特性を持ち, 運転には熟練と経験 (切りかえしなど) が必要である. また, その非線形性から自動制御することが難しい.

我々は, 人間と一致した運転知識により, 人間が容易に理解できる動作によって, 安心して利用可能な自動運転を実現するため, 人間の運転アルゴリズムを分析した. その結果, 人間は「車両と道路の状況を監視」しながら,

「車両の動特性を考慮し目的地までに通過すべきポイントを設定」し,「車両・障害物の将来の状態を予見しながら上手い運転」をしている. さらに動的障害物が存在する場合は, 周囲の状況や動的障害物の動作予測結果から, 安全に回避できるような操作を行っている.

以下では, 人間の運転知識を 3 層に分ける.

状況監視

人間は, 周囲の状況や自車両の現在状態, 設定した目的地に到達しているか向かっているかどうかを監視する.

目標設定

人間は, 車の持つ真横に移動できない等の動特性を考慮しながら, 現在の位置から目的地に達するために通るべきポイント (目標) を設定する. また, 目標に到達するために, 前進するか後進するか判断する.

運転操作

人間は, 実際に舵角操作を行う前に, その舵角操作を実行したとしたら自動車の将来状態がどうなるか予見し, 安全に目標までうまく到達できるような操作を選択する. 例えば, 人は「ハンドルを少し切る」,「ハンドルを切らずに進む」などの操舵候補に対して,「だいたい目標に到達できる」,「うまく目標に到達できる」という曖昧な評価をしている. また, 自車両と動的障害物の将来状態を予見して,「一旦停止 (やり過ごす)」「減速 (やり過ごす)」「現在の速度を保持して操舵 (操舵回避)」「バック (後退回避)」といった安全に目標に達成できるような候補を選択している. 動的障害物が停止した場合には「右に大きく操舵」から「右に小さく操舵」に, 動的障害物が加速した場合には「直進, 減速」から「一旦停止」といったように, 現在の状態や予見した将来の状態にあわせて安全で目標に到達できそうな操作を行っている.

3 システム構成

人間の持つ安全な運転操作を行うための知識をコントローラに導入するため, 前章のアルゴリズムを 3 階層に分割した階層型ファジィコントローラを設計し, 図 2 に示すシステムを構築した. 動的障害物の状態は, 制御周期毎に座標値 $(x_{obs}, y_{obs}, \theta_{obs})$ が与えられ, その形態が車両の場合は座標値から舵角 ϕ_{obs} を計算する.

3.1 状況監視部

状況監視部では, 目標設定部で設定された目標に向かって進みつつあるか, 到達したかどうかを監視している. 目標に到達していなければ現在の目標を維持し, 到達していれば次の目標設定部に目標設定指令を送る. 同時に, 静的障害物・動的障害物との接触を監視している.

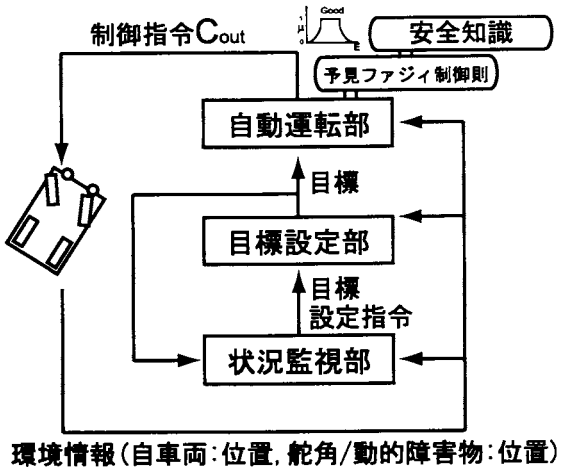


図 2: システム構成

3.2 目標設定部

人間は最終目標に到達するまでに, 車両の動特性を考慮していくつかの目標を設定している. 目標設定部では, 目標設定指令を受信した時に, 車両の現在位置と最終目標との位置関係から目標を設定する. これらの目標設定アルゴリズムについては, 文献 [5] で提案されている.

3.3 自動運転部

自動運転部では, 制御周期 $100[msec]$ おきに, 予見ファジィ制御を用いて n 個の操作候補 $C_i(i = 1, \cdots, n)$ で, ある時間だけ操作を行ったと仮定したときの将来状態を多目的ファジィ評価することで, 安全で目標達成に適した操作指令 C_{out} を選択出力する.

3.3.1 将来状態の予見

図 4 に示すように, 操作候補 C_i で予見刻み幅 Δt だけ操作を実行したときの自車両の将来状態と, 動的障害物の情報 (位置, 速度, 舵角) を基に動的障害物の将来状態を予見し, これを予見時間 t_a まで実行する. 現在状態から目標までの絶対距離を速度で割ることによって求めた到達予想時間を t_a として用いる.

3.3.2 安全量

絶えず安全な状態でいられるよう, 人間は自車両と動的障害物の将来状態を予見し, 安全に目的を達成可能な操作を選択している. そこで, コントローラに人間の安全に対する知識を導入するため, 本稿では操作候補 C_i で t_a の運転を仮定したとき, その t_a 時間内における自車両と動的障害物との接触の可能性を安全量 $Safe_i$, また Δt 毎の自車両と動的障害物との接触の可能性を安全度

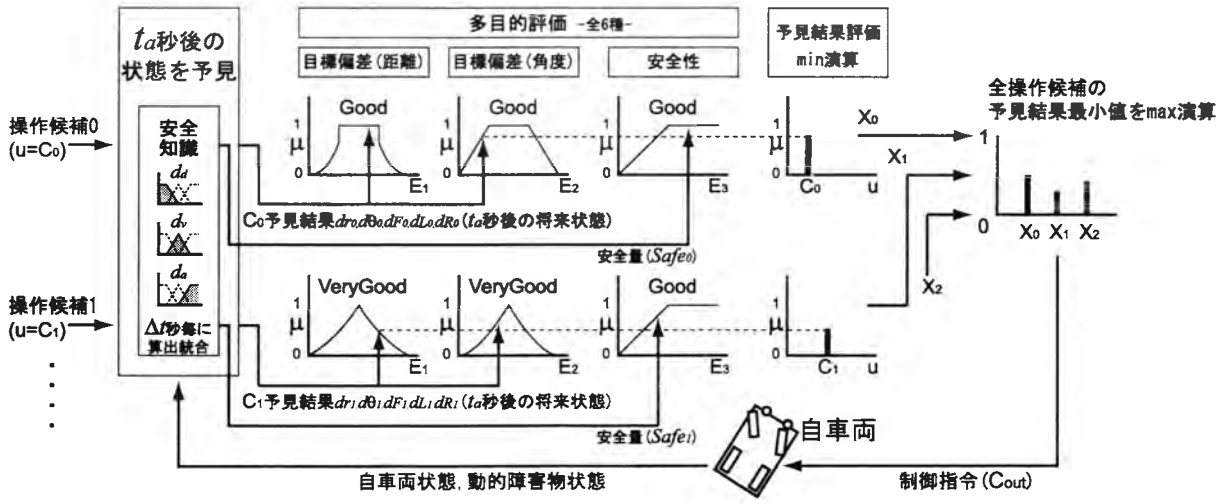


図 3: 予見ファジィコントローラ

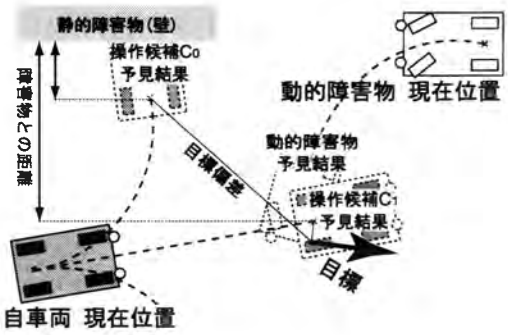


図 4: 予見の例

y_t と定義する. 絶えず安全な状態であるかどうかを判断するため, 安全量 $Safe_i$ は, 安全度 y_t を t_a の時間分だけ統合することで表現される. 人間にとって近未来の安全度は遠未来の安全度に比べて重要な意味を持つことを考慮し, 以下の式 (1) に示す安全量算出式においては, 時間 $t(\Delta t\times$ 現在の予見ステップ回数) の逆数を掛けることで, 近未来の安全度を重要視している.

$$Safe_i = \sum_{t=0}^{t_a} \left(y_t \times \frac{t_a}{t} \right) \tag{1}$$

$$y_t = \frac{\sum_{j=0}^{26} \omega_j D_j}{\sum_{j=0}^{26} \omega_j} \tag{2}$$

$$\omega_j = \mu_{dj}(d_d) \times \mu_{vj}(d_v) \times \mu_{aj}(d_a) \tag{3}$$

人間は, 動的障害物との関係が「距離が Small, 速度が Big, 速度の向きが Small(接近)」のとき「非常に危険」といったような曖昧な評価を行っている. 表 1 は, 「距離が Small」といった人間の曖昧さを定量化した図 5 のようなファジイ集合をもつルール群である. 安全度 y_t は,Δt 毎 (最長 t_a) に, 操作候補 $C_i(i = 1, \cdots, n)$ を実行したときの自車両の将来状態と, 動的障害物の情報 (位置, 速度, 舵角) より算出したその将来状態から, 表 1 に示す全 27 種のルールに対する自車両と動的障害物の関係 (相対距離 d_d, 相対速度 d_v, 相対速度方向 d_a) の適合度 ω_j を式 (3) によって求め, 式 (2) のようにそれらと安全度 D との積の合計値とする. 式 (1) に示すように安全量 $Safe_i$ は, 予見時間 t_a 内における, 時間的重みを付加した安全度の合計値である.

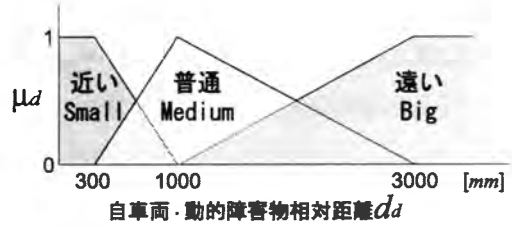


図 5: 相対距離評価メンバーシップ関数 μ_d

表 1: 安全知識

j	$\mu_d(d_d)$	$\mu_v(d_v)$	$\mu_a(d_a)$	安全度 D
0	Big	Big	Big	+ 15
1	Big	Big	Medium	+ 10
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	Small	Big	Small	− 30
21	Small	Medium	Big	− 10
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
26	Small	Small	Small	− 15

3.3.3 多目的評価

予見した t_a 後の自車両の将来状態から dr_i(目標と将来状態との絶対距離),$d\theta_i$(目標と将来状態との角度偏差),d_{Fi}(車体前部と静的障害物までの距離),d_{Li}(車体右側面と静的障害物までの距離),d_{Ri}(車体左側面と静的障害物までの距離), を求める. これらの値と安全量の計 6 項目を, 図 3 のように多目的ファジィ評価し, 安全も考慮した総合評価が高い操作候補を制御指令 C_{out} とする.

4 シミュレーション実験

図 6 に示す環境でシミュレーション実験を行った. 動的障害物は, システムと同形態の四輪車で人間が運転していると仮定し「ほぼ一定速度, ほぼ直進」で前進する. コントローラには, 目的地座標値 (0,2,1.57), 静的障害物 (壁) の形状,100[$msec$] 毎に動的障害物の座標値を与える.

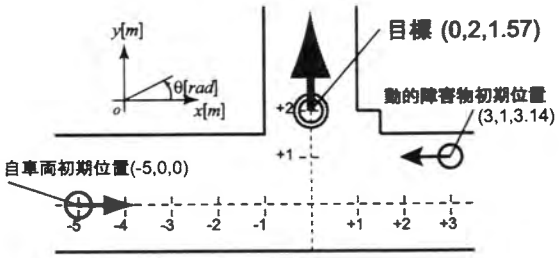


図 6: 実験環境

4.1 実験結果

シミュレーション実験の結果, システムは図 7 に示す軌跡で動的障害物を回避し目標に到達できた.

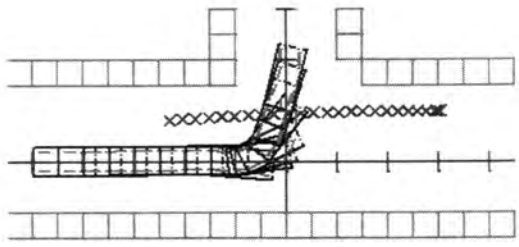


図 7: 走行軌跡

4.2 考察

人間は右折を行う場合, 対向車の進路を塞がない程度まで前進して停止し, やり過ごしてから右折する. 図 8 に示すように, 提案システムは接近する動的障害物の将来状態を予見して, 実験開始から 3.6〜6.8 秒後の間停止することでこれをやり過ごしている. このように, 提案システムは人間の運転知識を用いて人間と同様の自動運転を実行するため, 利用者はその挙動を容易に理解し安心してシステムを利用可能である.

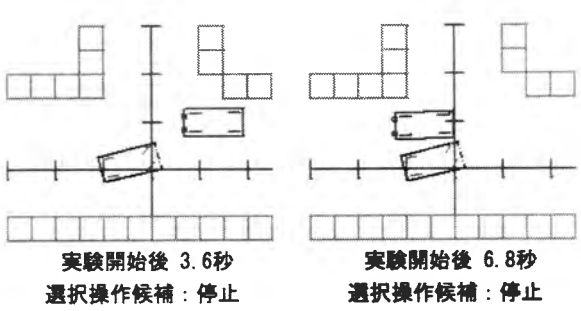


図 8: 回避中の位置関係

5 おわりに

本稿では, 予見ファジィ制御を用いて人間の運転知識をコンピュータに組み込み, ソフト制御による電動四輪車の自動運転システムに動的障害物の将来状態を予見して安全に回避する機能を追加し, シミュレーション実験によってその動作を確認した. 今後は実機を用いた実験を行い, 本システムの有効性を確認する予定である.

参考文献

[1] 警察庁: 電動車いすの安全利用に関するマニュアル, http://www.npa.go.jp/koutsuu/kikaku12/tebiki.htm

[2] 武藤 裕美, 安信 誠二: 福祉車両の走行支援情報提供システムの提案, 第 17 回 ファジィ システム シンポジウム 講演論文集, pp.245-248(2001)

[3] 高木 修, 蓮花 一己: 交通行動の社会心理学 運転する人間のこころと行動, 北大路書房 (2000)

[4] S.Yasunobu, M.Inoue: Intelligent Soft Driving System Cooperating with Human, International Fuzzy Systems Association World Congress IFSA2003-ID-001911, pp.1-4(2003)

[5] S.Yasunobu, N.Minamiyama: A Proposal of Intelligent Vehicle Control System by Predictive Fuzzy Control with Hierarchical Temporary Target Setting, The Proceeding of FUZZ-IEEE 1996, pp.873-878(1996)

連絡先：
〒 305-8573
茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学機能工学系 知的制御システム研究室
井上 真樹
電話: 029-853-6186
E-mail: m_inoue@edu.esys.tsukuba.ac.jp

クラッチ機構を有する可変剛性構造物の振動制御に関する研究

A Study on Vibration Control of Variable Rigidity Structure with Clutch Mechanism

入江 寿弘
Toshihiro IRIE
日本大学理工学部
Nihon University

新宮 清志
Kiyoshi SHINGU
日本大学理工学部
Nihon University

Abstract: There are many studies on base isolation and seismic isolation of structures. In order to clarify experimentally, the efficacy of variable stiffness control that has been considered using numerical simulation, a variable stiffness structure using a small-sized clutch system was made. A simple on-off control with a clutch mechanism of a variable stiffness structure to the magnitudes of displacements is proposed. Three control methods were examined in this research. Those stiffness change methods contributed for the improvement of the control effect.

1 はじめに

構造物の振動抑制方法の一つとして剛性や減衰を変化させて、地震や風などの様々な外力による共振を避けるセミアクティブ制御が注目されている[1]、[2]。これはアクチュエータで付加質量をアクティブに駆動する振動抑制の方法に比べエネルギー消費量が小さいというメリットがある。これまで、セミアクティブな振動制御としてクラッチ式可変剛性制御の研究を行ってきた[2]~[6]。その結果、シミュレーションと実験において、かなり良好な制御効果を確認することができた。この実験では単純化した閾値を用いてクラッチの着脱により剛性を変化させ、制御を行ってきた。このため、閾値を一定値に決めることにより、変位の振幅が大きくなり過ぎると振動抑制効果の割合が小さくなるという問題が発生した。そこで、２つの改良した切り替え方法を検討し、正弦波の周波数掃引した波形で振動台を駆動して制御効果の改善を確認した[7]。本研究では地震波（El Centro NS）を元にした振動波形で振動台を駆動して、それぞれの制御方法について制御効果を確認した。

2 可変剛性の実験モデル

クラッチ OFF のとき主構造物と付加構造物は別々に振動し、クラッチ ON のとき主構造物と付加構造物は連結され、一体となって運動する。クラッチ ON になると構造物全体の剛性は高まるが、質量の変化は小さいので固有振動数は高くなる。

3 数学モデル

装置の各物理定数を Table 1 に示す。

主構造物の加速度・速度・変位をそれぞれ $\ddot{x}$・$\dot{x}$・x、入力加速度を a、時間を t で表すと主構造物の運動方程式は式(1)のようになる。

$$M(t)\ddot{x}(t)+C(t)\dot{x}(t)+K(t)x(t)=-M(t)a(t)=F(t) \quad (1)$$

ただし、クラッチ OFF のときは $M=m_1$, $C=c_1$, $K=k_1$,で、クラッチ ON のときは $M=m_1+m_2$, $C=c_1+c_2$, $K=k_1+k_2$, となる。

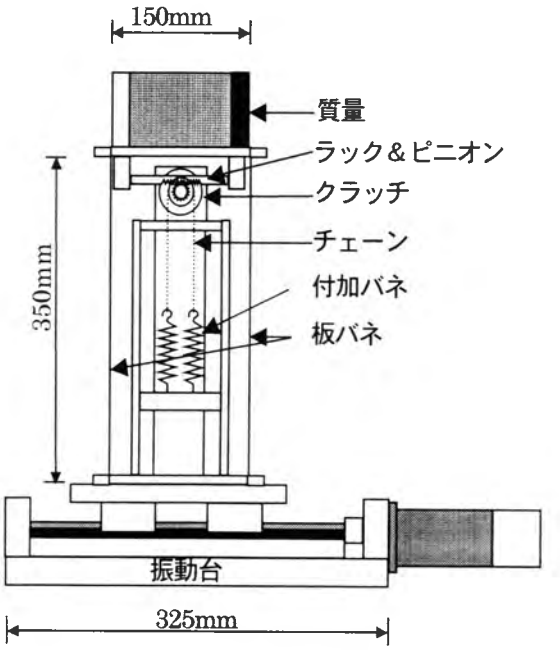


Fig. 1 クラッチ式可変剛性構造物

Table 1 装置の各物理定数

m_1	10.6 kg
m_2	0.1 kg
k_1	4.6 kN/m (板バネ)
k_2	2.1 kN/m (付加バネ)
c_1	26.5 N/(m/sec)
c_2	5.6 N/(m/sec)
ζ	0.06

4　制御方法

これまで実験で行ってきた制御方法はFig. 2 のような、閾値により剛性を変化させるものである。この制御方法を用いることにより、かなり良好な振動抑制効果が確認されたが、閾値を大きく上回る振幅に対しては、クラッチがONの状態が長く続くため、切り放しによる付加構造物のエネルギー逸散が起こりにくいという欠点があった。

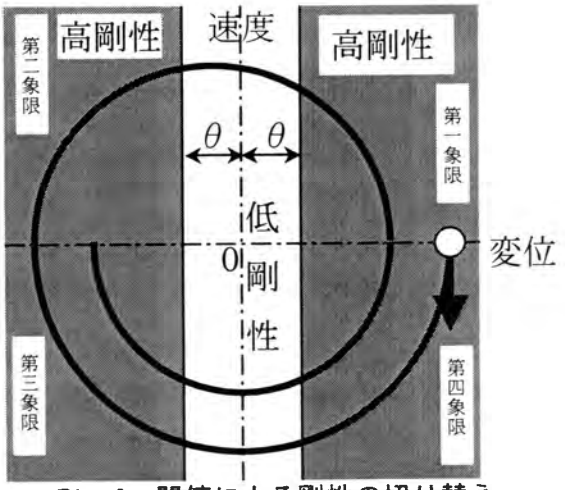


Fig. 2　閾値による剛性の切り替え

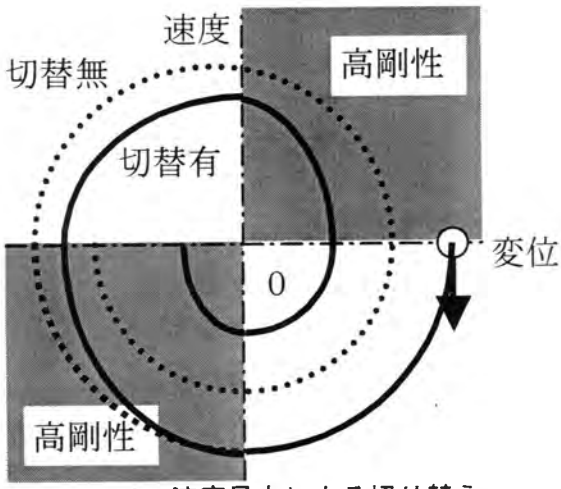


Fig. 3　速度最大による切り替え

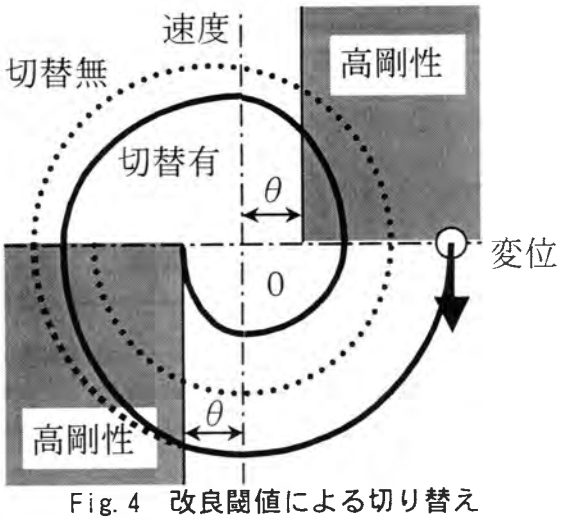


Fig. 4　改良閾値による切り替え

そこで、Fig.3 の様に構造物の速度が最大になった時にクラッチ接続を行うことにより、エネルギーの逸散が最大になるような制御規則を考案した（4.2 参照）。

また、Fig.4 の様に閾値と速度最大の特徴を取り入れつつ、変位振幅が閾値より大幅に大きくなった場合でも、クラッチの着脱が起こりやすい改良した閾値による制御方法を提案する（4.3 参照）。以上の事を次に詳細に説明する。

4．1　閾値による制御

クラッチ切り替えの閾値をθとして、主構造物の変位xのみ用い、式（2）、（3）のように制御を行う。

$$|x| \geq \theta \Rightarrow \text{クラッチ ON} \quad (2)$$

$$|x| < \theta \Rightarrow \text{クラッチ OFF} \quad (3)$$

適切なθの値は、入力波形や構造物の特性により左右されるので、実験において周波数掃引波形（2～6Hz）を入力して制御を行い、制御効果が最も高いθ＝1.5（mm）を採用した。

4．2　速度最大による制御

主構造物の速度が最大の時にクラッチ接続を行い、変位が最大になった時点でクラッチを切り放すため、位相平面上では第1，第3象限でクラッチONの状態とし、その他の領域はOFFとする。すなわち式（4）、（5）のように制御を行う。

$$x \times \dot{x} \geq 0 \Rightarrow \text{クラッチ ON} \quad (4)$$

$$x \times \dot{x} < 0 \Rightarrow \text{クラッチ OFF} \quad (5)$$

4．3　改良した閾値による制御

位相平面上の第1象限と第3象限において、閾値を超えるとクラッチをONとし、それ以外はOFFとする。

すなわち式（6）、（7）のように制御を行う。

$$x \times \dot{x} \geq 0 \cap |x| \geq \theta \Rightarrow \text{クラッチ ON} \quad (6)$$

$$x \times \dot{x} < 0 \Rightarrow \text{クラッチ OFF} \quad (7)$$

5　実験

実験装置を用いてクラッチ式可変剛性構造物の制御効果を加振実験により検討した。前述の3パターンの制御方法を用い、El Centro NSの地震波を元にした入力波形を振動台で発生させて実験を行った。

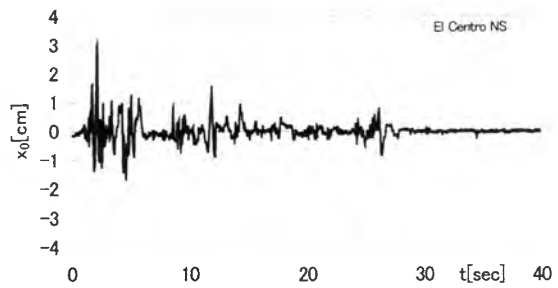


Fig. 5　振動台応答変位（最大変位振幅3.10mm）

振動台の最大振幅は0.70mm, 1.58mm, 3.10mmの３種類でそれぞれの制御方法での制御効果の比較を行った。本研究では１例としてFig.5に最大振幅3.10mm時の振動台の応答変位x_0を示す。

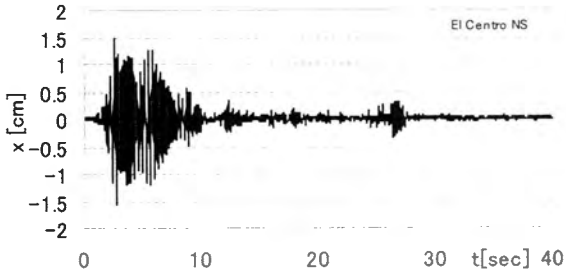


Fig.6　非制御時の応答変位（クラッチOFF）

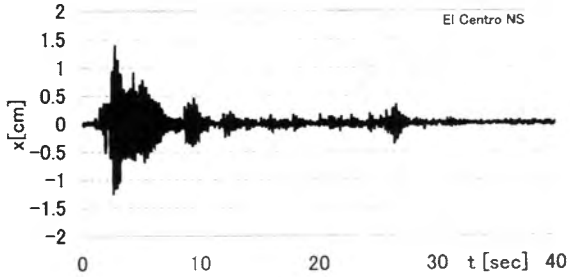


Fig.7　非制御時の応答変位（クラッチON）

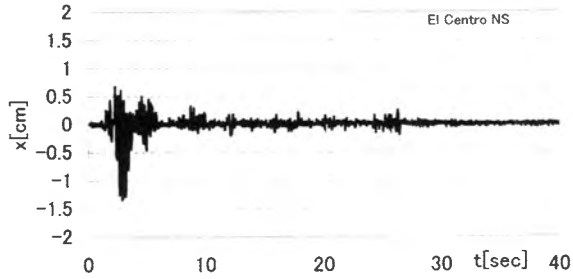


Fig.8　制御時の応答変位（閾値による方法）

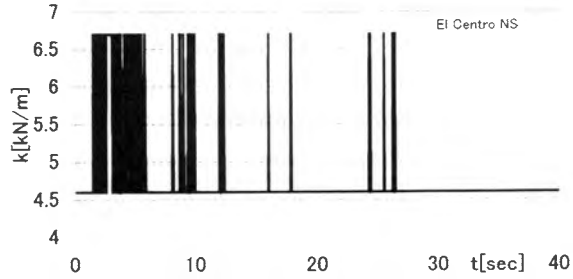


Fig.9　制御時の剛性変化（閾値による制御）

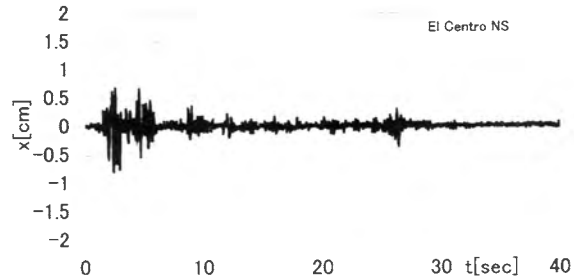


Fig.10　制御時の応答変位
（速度最大による制御）

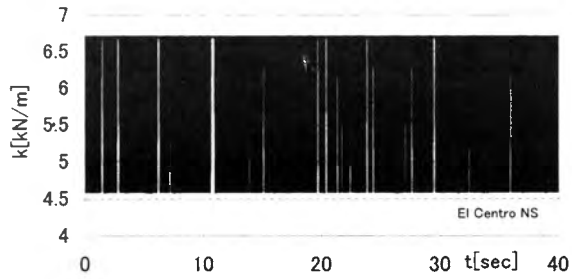


Fig.11　制御時の剛性変化
（速度最大による制御）

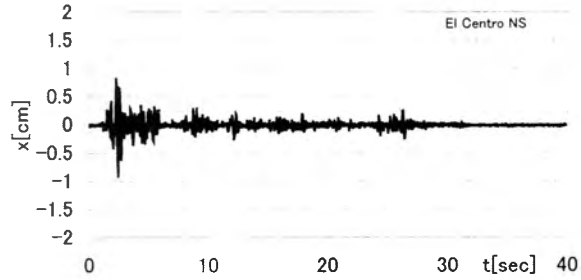


Fig.12　制御時の応答変位
（改良閾値による制御）

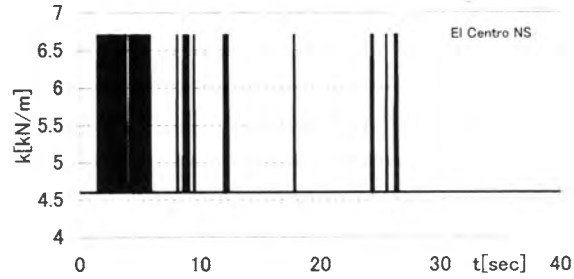


Fig.13　制御時の剛性変化
（改良閾値による制御）

6　結果と考察

Fig.6に非制御時でクラッチOFF時の構造物の応答変位をFig.7にクラッチON時の応答変位を示す。クラッチOFF時の最大応答変位は15.4mm、クラッチON時は13.5mmの最大応答変位が計測された。Fig.8は従来の閾値による切り替え制御を行った制御結果である。最大応答変位は13.3mmでクラッチON時の最大応答変位とあまり代わらない結果となっている。Fig.9は剛性変化の様子を示す。Fig.10は速度最大による制御を行ったときの応答変位である。最大応答変位が7.8mmとなり、閾値による方法と比べかなり応答変位が抑えられている。しかし、Fig.11の剛性変化のグラフに示される様に常にクラッチのON・OFFを繰り返している。現実の構造物では、ある程度以下の変位ではクラッチのON・OFFを行わない事が望ましい。Fig.12は改良閾値による制御を行った場合の応答結果である。最大応答変位は9.1mmとなり速度最大による制御には及ばないものの、Fig.13の剛性変化が示す様に、変位の少ない時のON・OFFは行われていない事が分る。

振動台振動振幅を変えた場合の制御結果も含めて結果をまとめるとTable2の様になる。速度最大による制御では振動台振幅が小さい(0.7mm)とき逆に制御後に振幅が増えてしまっている。この事からも改良閾値による制御を採用することが適切であると考えられる。

Table 2　制御方法による応答変位の比較

制御方法	振動台応答変位 [mm]	非制御 [mm]	制御 [mm]	減少率 [%]
閾値制御	0.70	2.0	2.0	0
	1.58	7.2	3.7	48
	3.10	15.4	13.3	13
速度最大制御	0.70	2.0	2.4	-20
	1.58	7.2	4.1	43
	3.10	15.4	7.8	49
改良閾値制御	0.70	2.0	1.8	10
	1.58	7.2	4.3	40
	3.10	15.4	9.1	40

7　結論

提案したクラッチ式可変剛性構造物は、地震波を元にした波形を用いた振動実験においても「速度最大による制御」、「改良した閾値による制御」による方法で共に、あらゆる大きさの入力変位において良好な制御効果を示した。しかしON・OFFの剛性変化に着目した場合には「改良した閾値による制御」を用いる事が適切であると考えられる。

謝辞

本研究を行うに当たり実験等を行って頂いた新宮研究室の北村慶多氏に感謝致します。本研究は、日本学術振興会 平成15年度科学研究費補助金 基盤研究(A)(1)「複雑系科学による人間・環境に適応する建築・都市・社会のシステムデザイン」(課題番号：14205087)の援助の下に行われた。また研究の一部に日本大学学術研究助成金(総合研究,研究代表者：新宮清志)を使用した。御礼申し上げます。

参考文献

[1] T. KOBORI, M. TAKAHASHI, T. NASU, et al.: Seismic Response Controlled Structure with Active ,Variable Stiffness System, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.22, pp.925-941, 1993

[2] 入江・新宮:質点系構造物のファジィ振動制御に関する研究—ファジィ可変剛性制御の提案—，日本ファジィ学会誌, Vol.9, No.6, pp.942-951, 1997年12月

[3] T. IRIE and K. SHINGU: A Study on Fuzzy Vibration Control of a Structure of Particle System - A Proposal of Fuzzy Variable Rigidity Control, Japanese Journal of Fuzzy Theory and Systems, Volume9, No.6, 1977, Allerton Press, Inc. pp.617-630, 1999

[4] T. IRIE and K. SHINGU: A Study on Fuzzy Variable Rigidity Control of a Structure, 1998 ASME/JSME Joint Pressure Vessels and Piping Conference, pp.163-170, PVP Conference-Vol.379, The American Society of Mechanical Engineers, July, 1998

[5] 入江・高木・池田・新宮:質点系構造物のファジィ振動制御に関する研究—ファジィスライディングモード制御を用いた可変剛性制御の検討—,第7回ファジィ建築土木応用シンポジウム論文集, pp.21-28, 2000年3月

[6] 北村・入江・新宮 他:クラッチ式可変剛性による構造物の振動制御,第18回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ, pp.227-228、2002年8月

[7] 入江・新宮: クラッチを利用した可変剛性構造物の振動制御の研究—切り替え規則の改良—、日本建築学会大会学術講演梗概集、2003年9月（発表予定）

[問い合わせ先]
〒274-8501　船橋市習志野台7-24-1
日本大学理工学部精密機械工学科　入江　寿弘
TEL：047-469-5411　FAX：047-467-9504
E-mail: tirie@eme.cst.nihon-u.ac.jp

数値空間分割による石油製品性状の推定精度の向上

The Identification Method for a Highly-Accurate Prediction Model of Oil Products Quality Using Input-Space Division

入 月 康 晴*1　谷　哲 次*1
Yasuharu IRIZUKI, and Tetsuji TANI

*1出光興産(株) 製造部
Manufacturing Dep. Idemitsu Kosan Co.,Ltd

Abstract: A method is herein proposed for an inferential model for determining the quality of light gas oil (LGO) through the use of ID3, a data-mining algorithm. ID3 algorithm classifies the required input variables and then ranks them according to their significance. Inferential multiple-regression models are then created for each subspace of the input-variable classification hierarchy. Through this methodology, a high-accuracy predictive assessment of LGO quality can be obtained.

Keywords: データマイニング、ＩＤ３、性状推定、常圧蒸留装置

1. はじめに

石油プラントの重要な装置の一つに常圧蒸留装置があり、この装置では、原油をナフサ、灯油、軽油、重油に分留し製造している。使用している分析計の信頼性が低いという問題があったため、分析計を代替する推定式を作成する必要があった。推定式を作成する際に、要求されることは、

（１）膨大な運転変数の中から、推定式に用いる運転変数の選定、および
（２）選定した運転変数に対する状況が大きく変化する境界値の算出（選定された運転変数中の特徴抽出）である。

一方、効率的に対象特性を種別化し、特徴を抽出する方法として ID3 がある。ID3[1-3] は相互情報量を用いた簡単で強力な決定木作成法である。そこで入力空間分割には ID3 のアルゴリズムを用いて、分割のための代表変数選択や優先順位付けを行なうことでオペレータの経験やノウハウを顕在化する。これを実装置に適用することで、その有効性を確認する。本報では、常圧蒸留装置を対象に、オペレータの経験やノウハウに依存した性状推定を試みた。

2. 装置概要と性状推定式を作成する際の問題点

常圧蒸留装置は、原油を分留し、ナフサ、灯油、軽油、重油といった製品を製造する装置である。その概要を（図１）に示す。原油は、分留塔でナフサ、灯油、軽油、重油に分留される。製品性状制御は、分留塔の LGO 抜出中の蒸留 90%点を分析計で監視しながら LGO 抜出流量により制御している（図２）。この時、蒸留 90%点は、装置の原料処理量、 原料性状、原料油温度等により変動する。特に、原料性状により大きく変化する。

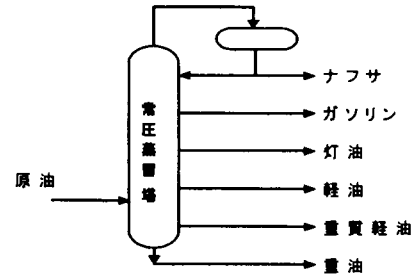


図１ 常圧蒸留装置

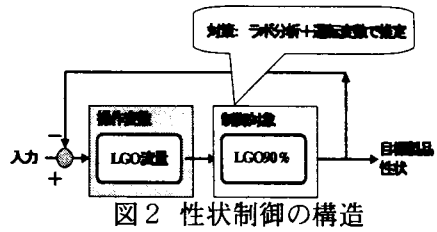


図２ 性状制御の構造

しかし、使用している分析計の信頼性が低いという問題があったため運転変数から、蒸留 90%点を推定する必要があった。装置の特性上、原料性状を直接把握できないため、把握できる運転変数から原料油性状の変化を特定することにした。さらに、状況により適切な蒸留90%点推定式が大きく変わることが予想されるため、運転状況毎に蒸留 90%点推定式を算出することを試みる。この推定式の作成にあたっては、オペレータの経験やノウハウを顕在化するところに主眼を置いている。

3. ID3 活用による性状推定モデル生成

性状推定式作成のための判断要素を抽出するために、オペレータとのヒアリングを実施した。オペレータは性状推定作成にあたり、どの運転変数が重要であるかは良く認識しているものの、決定までの手順は人によって異なり、判断に使用している運転変数と性状との定量的な判断基準があいまいであることが判った。しかしながら、オペレータは何らかの判断基準で性状推定のための特徴を抽出している。そこで、蓄積された運転データを基に、性状に関する特徴抽出決定のための標準化、定量化を試みた。標準化、定量化の手法として、ＩＤ３[1]（情報量）を用いることで特徴変数の選択と特徴分類のためのしきい値算出を行なった。性状推定モデルの生成にあたっては、概略３つのステップを繰り返す（**図３**）。

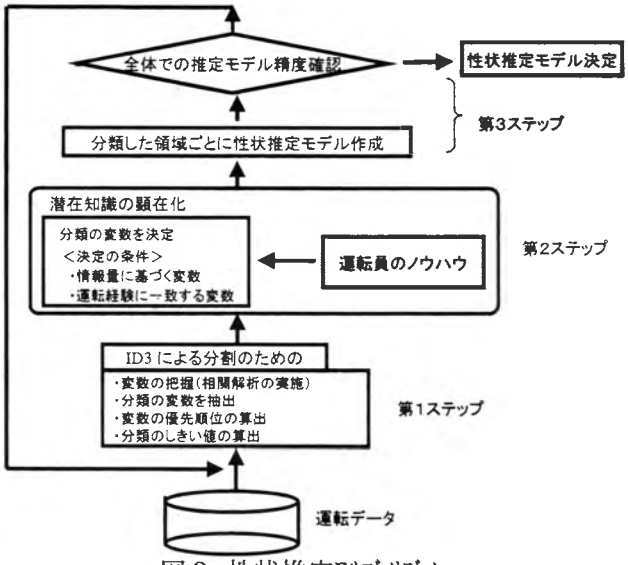


図３　性状推定ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑ

第１ステップは、ＩＤ３による分類のための変数把握（相関解析）、抽出、変数の優先順位の決定、分類のしきい値の算出である。第２ステップは、これで得られた分類のための代表変数とその優先順位に関して、オペレータの経験、ノウハウと照合して見直すことを行なう。

第３ステップは、分類のための代表変数に基づいて分類された領域ごとに回帰モデルを作成し、全体での精度を評価する。満足できる精度が得られるまで以上のステップを繰り返す。

LGO 抜出中の蒸留 90%点性状推定にあたっては、**図４**のように分類し、結果として３領域に分けることとした。

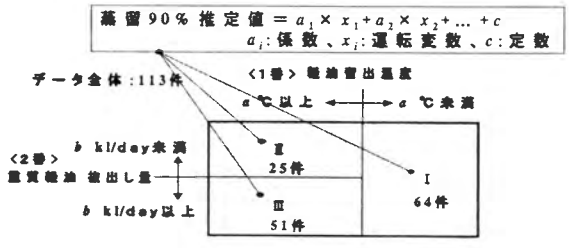


図４　性状推定モデル作成のための分類結果

4. 性状推定モデルの評価

蒸留90%点性状推定を実装置に適用するにあたり、各領域に蒸留 90%点回帰式を同定した。蒸留 90%点性状推定値と分析値の差の標準偏差 σ は 4.0 であり、ID3 分割を用いることで目標を満足する推定精度が得られた（**図５**）。

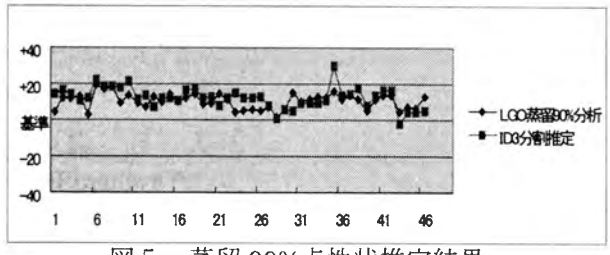


図５　蒸留 90%点性状推定結果

評価期間の中には、原料性状の変動など、従来の経験やノウハウでは予測できない場合も含まれている。また、今回の蒸留 90%点性状推定においては、使用するモデルの分類境界上の非連続性は、実用においては問題とならなかったため、境界領域のファジィ化[2]までは行わなかった。

5. おわりに

性状推定においてＩＤ３で分類の変数候補を抽出し、ノウハウと照合して変数を選択し、各領域ごとに回帰分析を行うことを繰り返す方法で、オペレータの予測に近い推定モデルの構築が可能なことが確認できた。今後は、オンラインでの推定性能を確認していく。ID３は、経験やノウハウに依存した部分を定量化する有力な手段の一つであり、さらなる適用を検討したい。また、分類の細分化による推定精度向上ということで事例ベース推論等の手法の適用も検討していく。

参考文献

[1] J. R. Quinlan : "Introduction of Decision Trees", Machine Learning, Vol. 1 , 81-106 (1986)

[2] 入月，古橋，谷，大熊：「ID3 と相互情報量に基づくファジィ分割を用いた酸素濃度推定モデル同定法の提案」，ファジィ学会誌, Vol.13, No.6, 672-679 (2001)

[3] 鈴木，入月，谷：「データマイニング（ID3）を活用した重油流動接触分解装置での触媒投入量制御」，第 18 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 453-454 (2002)

連絡先：

〒299-0107
千葉県市原市姉崎海岸 26 番地
出光興産（株）製造部 プロセスシステムセンター
入月 康晴
電話： 0436-61-7895
Fax.： 0436-61-7836
Email： yasuharu.irizuki@si.idemitsu.co.jp

非線形システムに対するNumerical Controller Design法の提案

A Numerical Controller Design Method for Nonlinear Systems

坂口　誠，田中　一男

Makoto Sakaguchi and Kazuo Tanaka

電気通信大学 知能機械工学科

Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems

The University of Electro-Communications

Abstract This paper presents a numerical controller design (NCD) method for a class of nonlinear systems represented by $\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t)) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}(t))\boldsymbol{u}(t)$. A main feature of NCD method is to design a controller by using point-wise information of a system. The design philosophy is that any systems and controllers can be regarded as constants in very small local state space. According to the philosophy, constant control inputs are determined in very small local state spaces. After addressing outline of the design, we provide design conditions of the controller. The controller design requires to obtain the maximum and minimum values of the functions $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t))$ and $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}(t))$ in each local state spaces. Therefore, we also give conditions for unknown cases of the maximum and minimum values of the functions $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t))$ and $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}(t))$. A design example demonstrates the utility of the NCD method.

1　はじめに

本論文では，非線形システムに対して解析的ではなく数値的に制御系を設計するNumerical Contoroller Design法(NCD法)を提案する．NCD法の最大の特徴は，モデルのダイナミクスを直接扱うのではなく，格子状に領域を細分化することでモデルのダイナミクスを数値に置き換え，格子ごとに設計条件を解くことで制御器を設計する点にある．したがって，この方法はモデル形式を限定しない汎用的な設計手法である．この考え方は，すでに菅野ら[1][2][3]によって論じられており，興味深い結果を得ている．しかし，[1][2][3]ではシステムをタイプIIファジイモデルに変換する必要があるが，本手法ではモデルダイナミクスを直接数値に置き換えるだけである．また，[1][2][3]ではタイプIIファジイモデルに対して厳密な安定条件を与えているが、オリジナルなモデルの安定性は厳密には保証していないようである．一方，本論文では格子状に領域を細分化しモデルのダイナミクスを数値に置き換えることによって生じるモデル誤差を補償する制御器設計条件を導出する．この設計条件を用いることでオリジナルなモデルの安定性を厳密に保証できる．また，本手法では分割された格子状領域ごとに個別にLMI条件を解くことができるので，高次元化・多変数化にともなうLMI数の爆発的増加による計算負荷の増大を抑制できることも特徴である．さらに，この特徴を活かした効率的な領域細分割アルゴリズムに基づく制御器設計法も合わせて提案する．

2　Numerical Controller Design法

まず，Numerical Controller Design法（NCD法）を用いた制御器設計の大まかな流れについて述べる．NCD法はn個の状態変数$\boldsymbol{x}(t) \in \boldsymbol{R}^n$，m個の入力$\boldsymbol{u}(t) \in \boldsymbol{R}^m$を持つ連続な非線形システム

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t)) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}(t))\boldsymbol{u}(t) \tag{1}$$

を対象としている．

NCD法では，始めに(1)式のシステムにおける状態空間を以下の定義に従って細分化する．なお，本論文では多次元の変数を簡単に表現するために，$R(s_1,\cdots,s_n) = R_{\boldsymbol{s}}, \boldsymbol{x}(s_1,\cdots,s_n) = \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{s}}, \boldsymbol{u}(s_1,\cdots,s_n) = \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{s}}$などと略記する．同様に，$\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{s}}(k_1,\cdots,k_n) = \boldsymbol{x}_{(\boldsymbol{s},\boldsymbol{k})}$と表現する．また，$\forall s_1,\cdots,\forall s_n$を$\forall \boldsymbol{s}$と表記する．

定義 1 領域の分割

状態空間において領域を格子状に分割し，分割された矩形の小領域$R(s_1,\cdots,s_n)$を以下のように定義する．

$$\begin{aligned} R(s_1,\cdots,s_n) &= R_{\boldsymbol{s}} \\ &= \{(x_1,\cdots,x_n) \mid x_i^{min} + \Delta S_i \cdot (s_i - 1) \\ &\qquad < x_i \leq x_i^{min} + \Delta S_i \cdot s_i, \quad i = 1,\cdots,n\} \end{aligned}$$

ここで，s_iはx_i軸での格子分割番号で$s_i = 1,\cdots,\phi_i$の値をとる．また，x_i^{min}，Δs_iは，x_iの最小値，格子分割の分割幅を表す．例えば$n = 2$のシステムの場合，図1のように領域が分割されることになる．

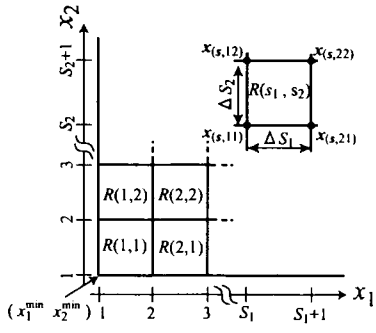


図 1: 2次元の場合の領域分割

(1)式を安定化するための制御器として(2)式を提案する．

$$\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{u}(s_1,\cdots,s_n) = \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{s}} \tag{2}$$

これは，領域$R_{\boldsymbol{s}}$の内部では入力$\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{s}}$は一定値であり，領域が変わるごとに別の一定値にスイッチすることを意味している．$\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{s}}$の設計条件は3章で述べる．

3　制御器設計条件

本章ではNCD法における設計条件を導出する．Theorem 1はオリジナルシステムを各領域で近似した近似システム(3)式に対する設計条件である．近似を用いているために設計条件は大変シンプルで，解を得やすい条件になっている．しかし，(3)式の近似システムの安定性を保証しているだけで，(1)式のオリジナルシステムの安定性を保証しているわけではない．

Theorem 2, Theorem 3 は厳密にオリジナルシステムの安定性を保証している．各領域で $f(\boldsymbol{x}(t))$, $g(\boldsymbol{x}(t))$ の最大値および最小値が得られる場合は Theorem 2 を用いる．Theorem 3 は近似システムとオリジナルシステムとのモデル誤差の許容域を最大にするように設計を行っており，$\beta_1 \sim \beta_{n+mn}$ から作られる $\boldsymbol{v_f}$,$\boldsymbol{v_g}$ が各領域において $f(\boldsymbol{x}(t))$, $g(\boldsymbol{x}(t))$ の変動幅を包み込むことができれば，オリジナルのシステムの安定性を保証する．

3.1 シンプルな近似条件の導出

ここでは，分割された各領域 $R_{\boldsymbol{s}}$ において，(1) 式の $f(\boldsymbol{x}(t))$, $g(\boldsymbol{x}(t))$ が領域ごとに固有な定数値 $f(\boldsymbol{x}(t)) = f(s_1,\cdots,s_n) = \boldsymbol{f_s}$, $g(\boldsymbol{x}(t)) = g(s_1,\cdots,s_n) = \boldsymbol{g_s}$ に置き換えられると仮定する．これは，オリジナルのシステムを各領域ごとに，

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{f_s} + \boldsymbol{g_s}\boldsymbol{u}(t) \tag{3}$$

に近似することを意味する．この仮定は Δs_i がシステムに要求される分解能に比べて十分に小さい場合は良い近似を与える．

NCD 法によってコントローラを設計するためには，まず文献 [2] と同様に設計の基準となる正定対称行列 $\boldsymbol{P}$ を求める．例えば，(1) 式を平衡点近傍で線形化したモデルを $\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t)$ とし，$J(t) = \int_0^\infty (\boldsymbol{x}^T(t)\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{x}}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{u}^T(t)\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{u}}\boldsymbol{u}(t))dt$ を最小にする制御器を求める場合，リッカチ方程式 $\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{P} + \boldsymbol{P}\boldsymbol{A} - \boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{u}}^{-1}\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{P} + \boldsymbol{W}_{\boldsymbol{x}} = 0$ を解くことで，正定対称行列$\boldsymbol{P}$と平衡点近傍での制御入力 $\boldsymbol{u}(t)$ を求めることができる．また，平衡点 $\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{0}$ を含む領域では，$\boldsymbol{u_s} = \boldsymbol{u}(t) = -\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{u}}^{-1}\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{x}(t)$ とする．

Theorem 1 は (3) 式の近似システムを安定化する制御器を設計する条件を与えている．Theorem 1 は $\boldsymbol{P}$ が与えられているために，$\boldsymbol{u_s}$ に関する LMI 条件になっている．このため数値的な可解問題に定式化されている．

Theorem 1 領域 R_s での制御入力 $\boldsymbol{u_s} = [u_{s1}\ \cdots\ u_{sm}]^T$ の最大値と最小値を $\boldsymbol{u_s^{max}} = [u_{s1}^{max}\ \cdots\ u_{sm}^{max}]^T$, $\boldsymbol{u_s^{min}} = [u_{s1}^{min}\ \cdots\ u_{sm}^{min}]^T$ としたとき，以下の条件を満たす $\boldsymbol{u_s}$ が見つかれば，*(3)* 式の近似システムは制御器 *(2)* 式によって安定化可能である．

$$(\boldsymbol{f_s} + \boldsymbol{g_s}\boldsymbol{u_s})^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{x}_{(\boldsymbol{s},\boldsymbol{k})} < 0,\ \forall \boldsymbol{s},\ \forall \boldsymbol{k} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{E}_j\boldsymbol{u_s} < \boldsymbol{E}_j\boldsymbol{u_s^{max}},\ \forall j,\ \forall \boldsymbol{s} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{E}_j\boldsymbol{u_s^{min}} < \boldsymbol{E}_j\boldsymbol{u_s},\ \forall j,\ \forall \boldsymbol{s} \tag{6}$$

ここで，$\boldsymbol{E}_j$ は j 番目の要素が 1 で他のすべての要素がゼロの行列である．また，$\boldsymbol{x}_{(\boldsymbol{s},\boldsymbol{k})}$ は以下のように定義する．

$$\boldsymbol{x}_{(\boldsymbol{s},\boldsymbol{k})} = \boldsymbol{x_s}(k_1,\cdots,k_n) = \begin{bmatrix} x_1^{min} + \Delta S_1\xi_{k1}(s_1) \\ \vdots \\ x_n^{min} + \Delta S_n\xi_{kn}(s_n) \end{bmatrix},$$

$$\xi_1(s_i) = s_i - 1,\ \xi_2(s_i) = s_i,\ k_i = 1,2$$

(証明) 略

Remark 1 *Theorem 1* における *LMI* の数は，$(2^n + 2m)\prod_{i=1}^n \phi_i$ 個である．しかしながら，本手法はすべての条件を同時に連立させて解く必要はなく，領域ごとに別々に *(4)* 式～*(6)* 式の条件を連立させて解ける点に注意されたい．すなわち，本手法は同時に連立させる *LMI* 数を $(2^n + 2m)$ 個に抑えることができる．これは，将来的に高次のシステムを扱う場合に大変有効である．

Remark 2 入力制限は領域ごとに任意の値を設定することが可能であるが，入力の絶対値の最大値が平衡点からの距離に比例するように定める，すなわち領域の中心点を $\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{s}}^{\boldsymbol{c}}$, α_j を比例定数として $|u_j(t)| \le \alpha_j\sqrt{\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{s}}^{\boldsymbol{c}T}\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{s}}^{\boldsymbol{c}}}, (j = 1,\cdots,m)$ となるように定めることもできる．

3.2 厳密な条件の導出

Theorem 1 は近似した (3) 式を用いているため，オリジナルシステム (1) 式の安定性は保証していない．Theorem 2 において，オリジナルシステム (1) 式を安定化する制御器の設計条件を導出する．(1) 式中の $f(\boldsymbol{x}(t))$ と $g(\boldsymbol{x}(t))$ はファジィモデル表現を用いて以下のように書き換えられる．

$$f(\boldsymbol{x}(t)) = \sum_{\eta_1=1}^{2} w_{f_1}(t) \cdots \sum_{\eta_n=1}^{2} w_{f_n}(t)\boldsymbol{f}_{(\boldsymbol{s},\boldsymbol{\eta})}$$

$$g(\boldsymbol{x}(t)) = \sum_{\theta_{11}=1}^{2} w_{g_{11}}(t) \cdots \sum_{\theta_{nm}=1}^{2} w_{g_{nm}}(t)\boldsymbol{g}_{(\boldsymbol{s},\boldsymbol{\theta})}$$

ここで，

$$\boldsymbol{f}_{(\boldsymbol{s},\boldsymbol{\eta})} = \boldsymbol{f_s}(\eta_1\cdots\eta_n) = [\psi_{\boldsymbol{s}f1}(\eta_1)\ \cdots\ \psi_{\boldsymbol{s}fn}(\eta_n)]^T,$$

$$\boldsymbol{g}_{(\boldsymbol{s},\boldsymbol{\theta})} = \boldsymbol{g_s}\begin{pmatrix} \theta_{11} & \cdots & \theta_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{n1} & \cdots & \theta_{nm} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{\boldsymbol{s}g11}(\theta_{11}) & \cdots & \psi_{\boldsymbol{s}g1m}(\theta_{1m}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{\boldsymbol{s}gn1}(\theta_{n1}) & \cdots & \psi_{\boldsymbol{s}gnm}(\theta_{nm}) \end{bmatrix},$$

$$\psi_{\boldsymbol{s}fi}(\eta_i) = \begin{cases} \max_{\boldsymbol{x}(t)} f_i(\boldsymbol{x}(t)),\ \boldsymbol{x}(t) \in R_{\boldsymbol{s}} & \text{if } \eta_i = 1 \\ \min_{\boldsymbol{x}(t)} f_i(\boldsymbol{x}(t)),\ \boldsymbol{x}(t) \in R_{\boldsymbol{s}} & \text{if } \eta_i = 2 \end{cases}$$

$$\psi_{\boldsymbol{s}gij}(\theta_{ij}) = \begin{cases} \max_{\boldsymbol{x}(t)} g_{ij}(\boldsymbol{x}(t)),\ \boldsymbol{x}(t) \in R_{\boldsymbol{s}} & \text{if } \theta_{ij} = 1 \\ \min_{\boldsymbol{x}(t)} g_{ij}(\boldsymbol{x}(t)),\ \boldsymbol{x}(t) \in R_{\boldsymbol{s}} & \text{if } \theta_{ij} = 2 \end{cases}$$

である．

Theorem 2 領域 R_s での制御入力 $\boldsymbol{u_s}$ の最大値と最小値を $\boldsymbol{u_s^{max}}$, $\boldsymbol{u_s^{min}}$ としたとき，以下の条件を満たす $\boldsymbol{u_s}$ が見つかれば，*(1)* 式のオリジナルシステムは制御器 *(2)* 式によって安定化可能である．

$$(\boldsymbol{f}_{(\boldsymbol{s},\boldsymbol{\eta})} + \boldsymbol{g}_{(\boldsymbol{s},\boldsymbol{\theta})}\boldsymbol{u_s})^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{x}_{(\boldsymbol{s},\boldsymbol{k})} < 0,\ \forall \boldsymbol{\eta},\ \forall \boldsymbol{\theta},\ \forall \boldsymbol{s},\ \forall \boldsymbol{k} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{E}_j\boldsymbol{u_s} < \boldsymbol{E}_j\boldsymbol{u_s^{max}},\ \forall j,\ \forall \boldsymbol{s} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{E}_j\boldsymbol{u_s^{min}} < \boldsymbol{E}_j\boldsymbol{u_s},\ \forall j,\ \forall \boldsymbol{s} \tag{9}$$

(証明) 略

Remark 3 *Theorem 2* における *LMI* の総数は，$(2^{2n+mn} + 2m)\prod_{i=1}^n \phi_i$ 個であり，*Theorem 1* より多くなっている．*Remark 1* で述べた通り，本手法はすべての条件を連立させるわけではないので，同時に連立させる *LMI* 数はそれぞれの領域ごとに $(2^{2n+mn} + 2m)$ 個となる．

Remark 4 後の例題で示すとおり，多くの場合，$\boldsymbol{f}_{(\boldsymbol{s},\boldsymbol{\eta})}$, $\boldsymbol{g}_{(\boldsymbol{s},\boldsymbol{\eta})}$ を見つけることができる．しかし，これらの値が明示的にわからない場合であっても，*Theorem 2* の代わりに *Theorem 3* を用いることが可能である．*Theorem 3* では，各領域でモデル誤差の許容範囲 β を最大にするように入力を決定することが特徴である．領域内部での $f(\boldsymbol{x}(t))$, $g(\boldsymbol{x}(t))$ の変動幅がこの β の中に納まっていれば，安定性を保証していることになる．

Theorem 3 領域 R_s での制御入力 $\boldsymbol{u_s}$ の最大値と最小値を $\boldsymbol{u_s^{max}}$, $\boldsymbol{u_s^{min}}$ としたとき，以下の条件を満たす $\boldsymbol{u_s}$ が見つかれば，*(1)* 式のオリジナルシステムはコントローラ *(2)* 式によって安定化可能である．ただし，a_v は $\sum_{v=1}^{n+mn} a_v = 1$ を満たす重み係数である．

$$\underset{\boldsymbol{u_s}}{\text{maximize}} \quad \sum_{v=1}^{n+mn} \alpha_v \beta_v$$

subject to *(8),(9) and*

$$\left((\boldsymbol{f_s} + \boldsymbol{v_{f\eta}}) + (\boldsymbol{g_s} + \boldsymbol{v_{g\theta}})\boldsymbol{u_s}\right)^T \boldsymbol{P}\boldsymbol{x}_{(\boldsymbol{s},\boldsymbol{k})} < 0, \quad \forall\boldsymbol{\eta},\ \forall\boldsymbol{\theta},\ \forall\boldsymbol{s},\ \forall\boldsymbol{k} \quad (10)$$

ここで，

$$\boldsymbol{v_{f\eta}} = [(-1)^{\eta_1}\beta_1 \quad \cdots \quad (-1)^{\eta_n}\beta_n]^T,$$

$$\boldsymbol{v_{g\theta}} = \begin{bmatrix} (-1)^{\theta_{11}}\beta_{n+1} & \cdots & (-1)^{\theta_{1m}}\beta_{n+m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (-1)^{\theta_{n1}}\beta_{n+m(n-1)+1} & \cdots & (-1)^{\theta_{nm}}\beta_{n+nm} \end{bmatrix}$$

である．ただし，η_i, θ_{ij} は $\eta_i = 1,2, \theta_{ij} = 1,2$ の値をとる．

Remark 5 *Theorem 3* では，$\beta_1, \cdots, \beta_{n+mn}$ が別々に定義されていたが，これらの変数が一定と仮定する，すなわち $\beta_1 = \cdots = \beta_{n+mn} = \beta$ と仮定すると *Theorem 3* は以下のように非常に簡単になる．

$$\underset{\boldsymbol{u_s}}{\text{maximize}} \quad \beta$$

subject to *(8),(9) and*

$$\left((\boldsymbol{f_s} + \beta\boldsymbol{h_{f\eta}}) + (\boldsymbol{g_s} + \beta\boldsymbol{h_{g\theta}})\boldsymbol{u_s}\right)^T \boldsymbol{P}\boldsymbol{x}_{(\boldsymbol{s},\boldsymbol{k})} < 0, \quad \forall\boldsymbol{\eta},\ \forall\boldsymbol{\theta},\ \forall\boldsymbol{s},\ \forall\boldsymbol{k} \quad (11)$$

ここで，

$$\boldsymbol{h_{f\eta}} = [\ (-1)^{\eta_1} \quad \cdots \quad (-1)^{\eta_n}\ ]^T,$$

$$\boldsymbol{h_{g\theta}} = \begin{bmatrix} (-1)^{\theta_{11}} & \cdots & (-1)^{\theta_{1m}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (-1)^{\theta_{n1}} & \cdots & (-1)^{\theta_{nm}} \end{bmatrix}$$

である．

Remark 6 *Remark 2* で述べたように，*Theorem 2*, *Theorem 3* においても $|u_j(t)| \le \alpha_j \sqrt{\boldsymbol{x_s^{cT}}\boldsymbol{x_s^c}}, (j = 1, \cdots, m)$ となるように定めることができる．後述の *Example* でもこの条件を付加している．

4 NCD 法を用いた制御器設計

4.1 設計アルゴリズム

図 2 は NCD 法のフローチャートを示している．NCD 法は以下の Step1～Step5 の手順で制御器を設計する．

[Step1] 制御器設計の基準となる正定対称行列 $\boldsymbol{P}$ を決定し，対象とする領域について適当な精度で初期分割を行う．

[Step2] Theorem 1～Theorem 3 のいずれかの設計条件を用いて細分化された各領域ごとに制御入力 $\boldsymbol{u_s}$ を求める．

[Step3] 解が求まらない領域（不解領域）があった場合，設定した分割レベル（最大分割レベル）に達していなければ領域の再細分化を行う．再細分化の方法は次節で述べる．

[Step4] 対象とするすべての領域で解が求まるか，最大分割レベルを超えるまで，Step2, Step3 を繰り返す．

[Step5] 解が求まらなかった場合は別の $\boldsymbol{P}$ を用いるか，最大分割レベルを上げて Step1～Step4 を繰り返す．

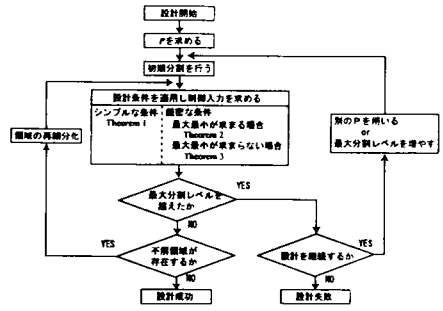


図 2: NCD 法のフローチャート

4.2 効率的な再細分化方法

最も簡単に再細分化するには，単純に領域全体で分割を細かくして全領域を解き直せばよいが，これでは無駄が多く最終的な分割数が増してしまう．そこで，解が見つかった領域（可解領域）については，そのまま解を制御入力として採用し，不解領域のみをさらに細分化する方法を用いる．このようなことが可能なのは，Remark 1 で述べたような理由である．図 3 は分割の様子を表している．不解領域が見つかった場合は，その領域を各軸ごとに 2 分割し，さらなる小領域を生成する．新たに生成された領域に不解領域があれば，同様に分割を繰り返していく．このように分割を行うと，結果的に必要な領域のみを細分化することになり，大変効率的である．

初期分割からの細分化度を分割レベルと呼ぶ．分割レベルは初期分割をレベル 1 とし，初期分割からの分割が増すたびにレベル 2，レベル 3 と分割が細かくなっていく．

また領域定義の対象となっている範囲を層と定義し，初期分割を行った平面を第 1 層とする．再細分化処理を行うと新たな層が定義される．これらの層は定義される順に第 2 層，第 3 層と呼び，特に層を区別して表現する必要がある場合は，第 d 層を R_s^d として表記する．

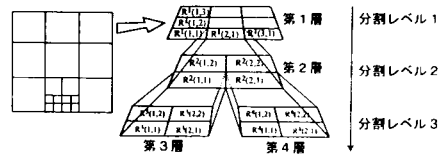


図 3: 効率的な領域の細分化

5 Example

以下のような非線形システム [4] に NCD 法を適用する．

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -2x_1 + ax_2 + \sin x_1 \\ \dot{x}_2 = -x_2 \cos x_1 + ucos2x_1 \end{cases} \quad (12)$$

ここで，$a = 1$ である．(12) 式は，$\boldsymbol{x} = [x_1 \ \ x_2]^T$, $f(\boldsymbol{x}(t)) = [f_1(\boldsymbol{x}(t)) \ \ f_2(\boldsymbol{x}(t))]^T$, $g(\boldsymbol{x}(t)) = [g_1(\boldsymbol{x}(t)) \ \ g_2(\boldsymbol{x}(t))]^T$ とすると，

$$\begin{aligned} f_1(\boldsymbol{x}(t)) &= -2x_1 + ax_2 + \sin x_1, & g_1(\boldsymbol{x}(t)) &= 0 \\ f_2(\boldsymbol{x}(t)) &= -x_2 \cos x_1, & g_2(\boldsymbol{x}(t)) &= cos(2x_1) \end{aligned}$$

となる．$f_1(\boldsymbol{x}(t)), f_2(\boldsymbol{x}(t)), g_1(\boldsymbol{x}(t)), g_2(\boldsymbol{x}(t))$ を適当な範囲で図示したのが図 4 である．図 4 を見ても明らかな通り，最低限 $x_1 = \frac{\pi}{4} \times k$($k$ は整数)，$x_2 = 0$ で分割すると，$\boldsymbol{f_{(s,\eta)}}$, $\boldsymbol{g_{(s,\eta)}}$ を見つけることができる．そこで Theorem 2 を用いて設計を行う．

領域の初期分割を，x_1 については -4π から 4π まで $\frac{\pi}{4}$ 刻みで，x_2 については -2.5 から 2.5 まで 0.5 刻みに分割した．また，入力制限は Remark2 で述べたように $|u_j(t)| \le \alpha_j \sqrt{\boldsymbol{x_s^{cT}}\boldsymbol{x_s^c}}$ となるように設定した．ここで $\alpha = 10$ である．

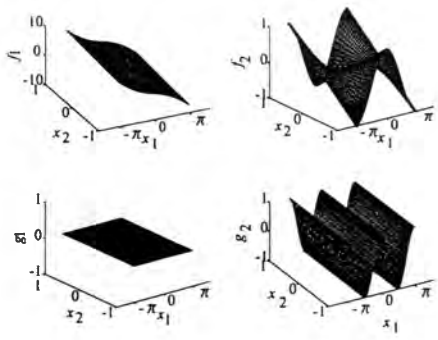


図 4: Example のモデルの特性

これらの条件の下，初期分割から再細分化を繰り返すと，分割レベル 4 で全領域で可解領域となった．可解領域に含まれる最大の矩形領域を安定保証領域と呼ぶことにする．分割レベルを上げていった際の安定保証領域，不解領域の変化を図 5 に示す．図 5 より，細分化することによって安定保証領域が拡大していくことが分かる．分割レベル 4 で黒く見える領域があるのは，領域の分割を表す線が重なって見えているためである．

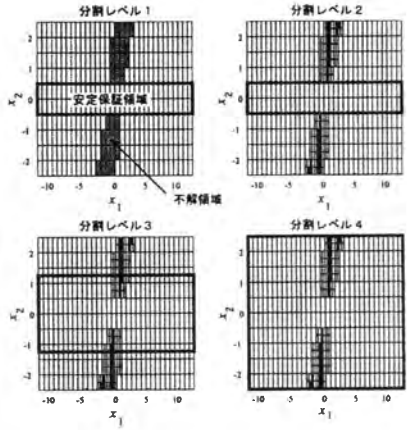


図 5: 領域の分割と安定保証領域の拡大

また，分割レベル 4 での制御入力 u_s とその u_s を用いたシミュレーション結果を図 6〜図 8 に示す．

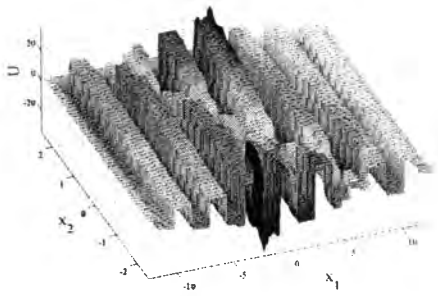


図 6: Example の制御入力

Remark 7 例題では，図の見やすさのため $-4\pi \leq x_1 \leq 4\pi$，$-2.5 \leq x_2 \leq 2.5$ での結果を示したが，最大分割レベルを *10* とすると，最大で $-20\pi \leq x_1 \leq 20\pi$，$-2.67 \leq x_2 \leq 2.67$ まで拡張できることを確認している．なお，x_1 に関してはさらに安定保証領域を拡大できるようであったが，際限がないので 20π までしか確認していない．

Remark 8 *[2]* においても，*(12)* 式に対する安定化制御がなされている．*[2]* では *(12)* 式を近似したタイプ II ファジィ

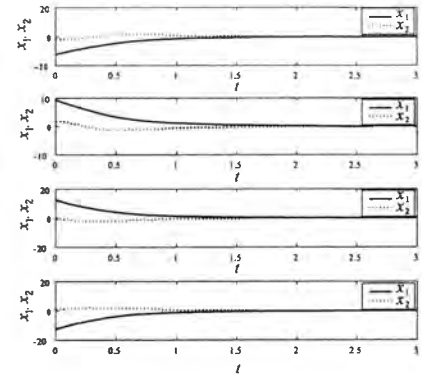


図 7: シミュレーション結果

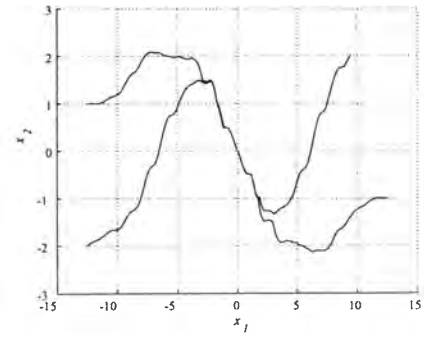


図 8: 位相平面

モデルに対して $-5/3\pi \leq x_1 \leq 5/3\pi$，$-2\pi \leq x_2 \leq 2$ の範囲で安定性の確認がなされているが，*Remark 7* で述べたように *NCD* 法でははるかに広い範囲の安定性をオリジナルシステム *(12)* 式に対して保証している．

6 まとめ

本論文では格子状に領域を細分化することで数値的に制御器を設計する NCD 法について提案した．はじめに NCD 法の概要について述べ，次いで制御器設計条件を導出した．また，NCD 法を用いて制御器を設計するアルゴリズムについて論じ，効率的な分割方法を提案した．さらに，簡単な例題を用いて，他の方法に比べて格段に広い安定領域を確保できることを示した．

NCD 法は分割された領域ごとに別々に解くことが可能であり，同時に連立させる LMI の増加を抑制している点が特徴である．これは，分割領域数の爆発的な増加がおこる高次なシステムでも扱える可能性を示唆している．今後，より高次なシステムに対して NCD 法を適用し，その有効性を確認する予定である．

参考文献

[1] 菅野道夫，“非線形システムの区分的パラメトリック近似モデルとリアプノフ安定条件”，第 31 回制御理論シンポジウム，2002.

[2] 谷口，菅野，“タイプ II ファジィシステムの安定化制御”，第 18 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，455/458，2002.

[3] M.Sugeno, “On Stability of Fuzzy Systems Expressed by Fuzzy Rules with Singleton Consequents”, IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS VOL.7 NO.2,201/224 ,1999.

[4] Jean-Jacques E. Slotine and Weiping Li, “Applied Nonlinear Controll” Prentice Hall, 213/216, 1991.

問い合わせ先

〒 182-8585　東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
電気通信大学 知能機械工学科 田中研究室 坂口 誠
Tel: 0424-43-5431 E-mail: saka@rc.mce.uec.ac.jp

相関係数を用いた色に関する好き嫌いの予測について

On Likes and Dislikes Prediction Systems Concerning Colors

武市　正人　　椎塚　久雄
Masato Takechi　and　Hisao Siizuka
工学院大学大学院　工学研究科　情報学専攻
Informatics, Graduate School of Kogakuin University

Abstract: It is an interesting problem to predict a color of preferences for individual, so the purpose of this paper is to establish such a system for predicting the color of preferences. Two kind of data utilized in this prediction are the correlation coefficient of the image of appearance of color, for example, "blight – dark" and "hard – soft", and the personal preferences of color, and the general image of appearance of color. The data was obtained by questionnaire. This time, a prediction experiment was performed using this method. The result of an experiment, the result good considering a simple technique was obtained, but it was not a thing that it can actually be used, because personal preferences of color are judged not only from the image of appearance but from the personal experience. The prediction has to consider the personal experience.

1、はじめに

現在，人間の感性について様々な研究が行われている．その多くが個人の感性から一般的な感性を導き出すものであり，個人の感性についてはあまり研究がなされていない．

本論文では単色についての個人の好みを予測する実験を行っている．個人の色の好みと色の見た目から受けるイメージをアンケートによって調査し，その相関を求める．得られた数値は色に関するイメージと好みのつながりを示すものであり，人により異なった数値を示すことは明らかである．これをもとにし，色の見た目の一般的なイメージから好みの予測を行っている．この手法を使って十分な予測が出来れば，一定の入力を行うことですべての色についての好みが判断できる．

本論文の構成は以下のようになっている．2 では予測実験の方法を示す．まず予測実験のイメージを図で示し，次に 6 段階の手順を紹介する．3 では実験の結果を具体的な数値を用いて説明する．最後に，4 では結果に対する考察を行う．新たに予測に使用すべき要素と，今後の研究の方向を示す．

2、予測実験の方法

本論文は単色についての個人の好き嫌いを予測する方法について述べている．この方法では，好き嫌いを色の見た目のイメージ，つまり「明るい-暗い」「きれい-汚い」などから予測する．図 1 は好き嫌いを予測する手法のイメージを表わしている．

図中の「明るさ」「きれいさ」「華やかさ」が色の見た目のイメージを表わしている．見た目のイメージは人それぞれであるが，今回の実験ではその違いはあまり大きくないものであると考えて一般的なイメージをもとに予測を行う．色の見た目のイメージは，見た目のイメージ（例えば「明るい-暗い」）を -3～+3 の 7 段階で評価するアンケートにより得られる．矢印は見た目のイメージがどれくらい好き嫌いに影響を与えるかの重み w_n を持つ矢印である．この重み w_n が個人によって大きく異なる値であり，色の好みが個人によって様々になる原因であると考えられる．よって色の好みは，見た目のイメージを K_n と表わすと $K_n \times w_n$ の式で得られるものと定義する．

図 1 の好き嫌い予測イメージに基づいて個人の単色についての好き嫌い予測実験を行った．以下にその手順を示す．

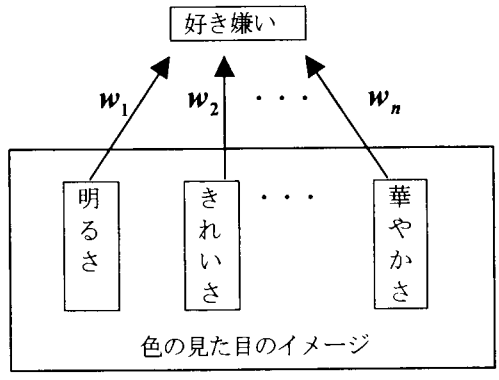


図 1. 好き嫌い予測の概念

【手順 1】

色のイメージと好き嫌いに関するアンケートを行う．評価項目は以下に示す 24 項目で，-3～+3 の 7 段階で評価してもらった．

表 1．評価項目一覧

好き - 嫌い	興奮する - 落ち着く
かわいい - 渋い	楽しい - 楽しくない
華やかな - 暗い	暖かい - 冷たい
しゃれている - ださい	さわやかな - さわやかでない
明るい - 暗い	開放的な - 閉鎖的な
現代的な - 古風な	品がある - 品が無い
陽気な - 陰気な	浅い - 深い
軽い - 重い	澄んだ - にごった
派手な - 地味な	きれい - 汚い
かたい - やわらかい	情熱的 - 理知的
あっさりした - くどい	強い - 弱い
動的 - 静的	大人っぽい - 子供っぽい

【手順2】
アンケートを行った被験者それぞれのデータについて，評価項目「好き-嫌い」とそれ以外の評価項目の相関係数を求める．これはある個人の好みとイメージの関係を表す数値である．

【手順3】
アンケートの「好き-嫌い」以外の評価項目それぞれについて，アンケートを行った被験者全員分のデータの平均を取る．これは色に対する一般的なイメージの導出のためである．

【手順4】
手順2で求めた相関係数で「好き嫌い」と相関の高い評価項目を上から順に4つ選ぶ．4つの評価項目を選ぶことにより，予測の精度を上げることができる．

【手順5】
選ばれた4つの評価項目について，(相関係数)×(平均データ)を計算する．これを各評価項目が「好き嫌い」に与える影響を具体的に表す数値とする．

この方法で得た4つのデータを x_1，x_2，x_3，x_4 とする．これをベクトル $\vec{X}=(x_1,x_2,x_3,x_4)$ と考え，$|\vec{X}|$ を予測すべき好き嫌いの絶対値とする．また $\vec{X}$ の正負を調べるために $\vec{e}=(1,1,1,1)$ として次の計算を行う．

$$\cos\theta=\frac{\vec{X}\cdot\vec{e}}{\left|\vec{X}\right|\left|\vec{e}\right|} \qquad (1)$$

式（2）の $\cos\theta$ の正負が $\vec{X}$ の正負となるのだが，それは $x_1+x_2+x_3+x_4$ の正負と一致する．従ってこれが $\vec{X}$ の正負となる．

この計算により導出される±付きの数値が好き嫌いの値である．数値が正なら好きへ，負なら嫌いへ作用している．

【手順6】
導出された数値を「好き」「どちらでもない」「嫌い」の3段階に分割する．導出された数値の最大値と最小値をもとに3分割し，上から順に「好き」「嫌い」「どちらでもない」とする．

3、実験結果

今回，5名の被験者についてインターネットを使ってアンケートを収集し好き嫌い予測実験を行った．評価の対象となる色を白，40%灰色，オレンジ，紫，黄，黒，青，50%灰色，緑，水色，ゴールド，ピンク，赤，80%灰色，黄緑，茶色，25%灰色，ベージュ，深緑，スカイブルー（色とその名称はMicrosoft word2000による）の20色とした．好き嫌い予測実験の結果を以下に示す．

図の的中率は，被験者の「好き」「どちらでもない」「嫌い」の入力と予測結果が的中した割合を示している．全被験者とも好きな色，嫌いな色は様々であったが，全体の平均として60%の的中率が得られた．

表2．予測実験の結果

	的中率
評定者A	60%
評定者B	50%
評定者C	60%
評定者D	50%
評定者E	55%

4、考察

今回の実験では色の見た目のイメージから好き嫌いを予測した．単純な手法を用いた割に55%程度の結果を得られた．この結果より，色の見た目のイメージから好き嫌いを予測する方法は有意義であると言える．しかしこの結果ではシステムを構築し個人の好き嫌いを実社会に応用していくことは不可能である．予測の精度を向上させなければならない．

今回の予測実験の精度が55%程度であった原因の一つとして，次のことが挙げられる．アンケートを行っている際に分かったのだが，人は色の好き嫌いを決定する際に色の見た目のイメージだけではなく，自分に合うか合わないか等の経験をふまえて判断しているのである．（図2）

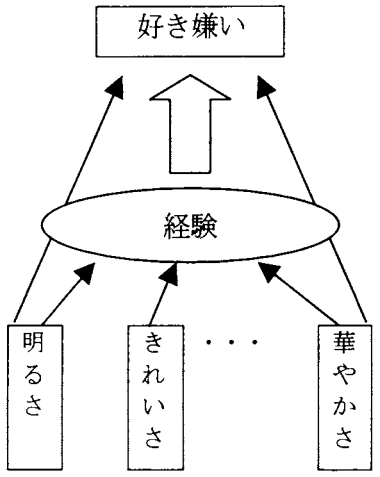


図2，人の好き嫌い決定の概念

個人の経験が好き嫌いに与える影響が小さくないことは十分に予想できることである．それ故に今後予測の手段にこれを反映させることは非常に重要であると考えられる．今後は個人の経験を予測に反映させると同時に，ニューラルネットワークを用いた予測を行い予測手段による結果の違いも調査していく．

【参考文献】
1）中森義輝："感性データ解析"，森北出版，2000
2）長谷川勝也："これならわかる　Excelで楽に学ぶ多変量解析"，技術評論社，2002

【連絡先】
〒163−8677
東京都新宿区西新宿1−24−2
工学院大学大学院　工学研究科情報学専攻
数理情報研究室　武市正人
Tel:03−3342−1211（代表）　内線：2653
E-mail：EM03008@ccs.kogakuin.ac.jp

ファジィ理論を用いた音楽と動画の関係

The relation of the music and the animation using fuzzy theory

小杉　智　Satoshi Kosugi
伊藤　孝明　Takaaki Itou
松田　修三　Syuzou Matsuda
増井　重弘　Shigehiro Masui
法政大学工学部
Faculty of Engineering Hosei University

Abstract: The relation of the music and the arrangement of a dance is regarded as importance by promotion video etc. In this paper, we suggest a sport system of creating promotion video. This system creates the arrangement of a dance that is synchronized the swing speed of the character's arm, arm position and waist position by expressing music at tempo and interval.

1　はじめに

情報化社会の現代において、ラジオのように音声や音楽だけを流すだけでなく、TV のように音声や音楽と画像や動画を流すことは当たり前になっている。それはTV のほうが情報量が多く、印象に残ることが多いからである。

そのなかでも、映像と音楽の相乗効果を活かしたプロモーションビデオ、映画、BGM、ダンスの振り付けなどにおいては、映像と音楽の関係が人間の感性にあっているもののほうがよりよいものが作られる。そこで、どのようにすれば音楽や映像の関係が人間の感性に合い、印象強いものが作れるのかを人間思考に基づく情報処理であるファジィ推論を用いて表現しようと考える

本研究では、音楽に関してはテンポと音程、動画においてはそれにあったキャラクターの踊りの速さ、腕や腰の位置で表現することによりプロモーションビデオやダンスの振り付けなどを作成する際の支援となるようなシステムを構築することを目標とした。

2　システム構成

本研究におけるシステム構成を図２．１に示す。

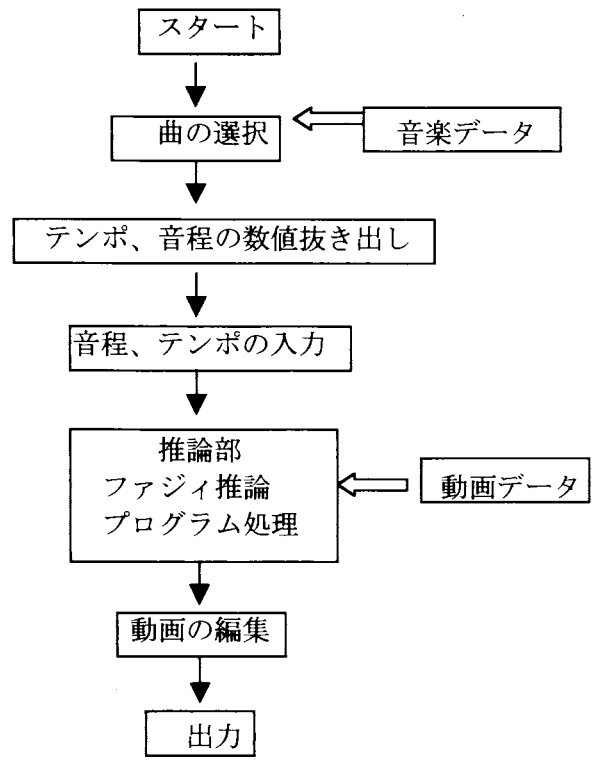


図２．１　音楽にあわせた動画出力システム

本システムでは、始めに使う音楽を自由に決定し、その曲中のＡメロ、Ｂメロ、サビというようなテンポや音程が変わる部分で、それぞれ数値を抜き出します。それを入力値として、推論部にてファジィ推論を行い、もっとも適した動画を決定し、それを編集して、出力させます。

3　音楽について

本研究に用いる音楽データは MIDI 形式ファイルを使っています。MIDI とは Musical Instrument Digital Interface の略称で、音楽の情報をやり取りするための統一規格であり、MIDI は音楽のデータ（音色、音程、長さ、テンポ、ボリューム、etc）が楽譜で表されている。

３．１　テンポにの抜き出し方

始めに曲の主旋律を弾いていると思われる楽器を決めて、その楽器のテンポを全体のテンポとした。

次に、１小節ごとにテンポを測定します。テンポを表す式は

テンポ　＝
　　１小節に含まれる音符の数　×　BPM

と設定した。ここで BPM とは Beat Per Minute の略で「一分間のビート」ということになりますが、この数字が高ければ１小節を弾くのが速くなります。この BPM は曲によっても変化があり、また曲中でもかわってくるのでこの項目をつけました。

１小節中のテンポに動画を割り与えるとひどく乱雑なものが出来上がると考えたので、曲調が変わったと判断した部分のところで区切り、その区切った間隔内での１小節中のテンポの平均値を取ることにした。

例として、図３．１に「クラシックパーティー３」という曲のテンポのグラフを示す。

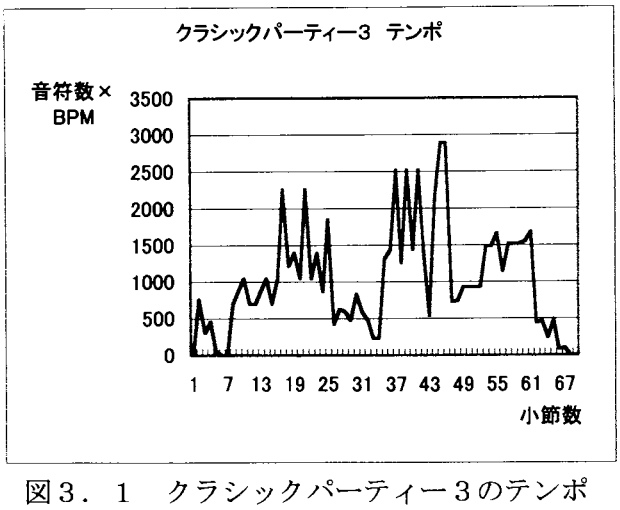


図３．１　クラシックパーティー３のテンポ

これを２～７（１小節目には音が入っていない）、８～１５、１６～２６、２７～３４、３５～４２、４３～４９，５０～５２、５３～６１、６２～６７小節に区切り、平均値を取りテンポの入力値とした。以下の表３．１に示す。

表３．１　テンポの入力値

小節数	テンポの平均値
2～7	262.67
8～15	826.50
16～26	1345.09
27～34	505.38
35～42	1807.00
43～49	1549.29
49～52	925.00
53～61	1506.33
62～67	300.00

３．２　音程の抜き出し方

音程に関しても、テンポ同様に主旋律を弾いている楽器の音程を抜き出し、曲調のかわる部分で区切って、数値を出している。

音程は一番低い音 1.0～一番高い音 77 として、数字を割り当てた。

次に、１小節中の音程の高さを測り、またそれがどのくらいの長さ鳴っているのかを測定する。１小節中に音程が高い音符と低い音符があるとすると、低い音符が高い音符より長い時間鳴っているなら音程は低いと感じ、逆に低い音符が高い音符より短い時間なっているなら音程はさっきより高いと感じるだろうと考えのもと重心法を用いて音程を計算することにした。

図３．２にテンポ同様「クラシックパーティー３」という曲を用いて、抜き出した音程のグラフを示す。

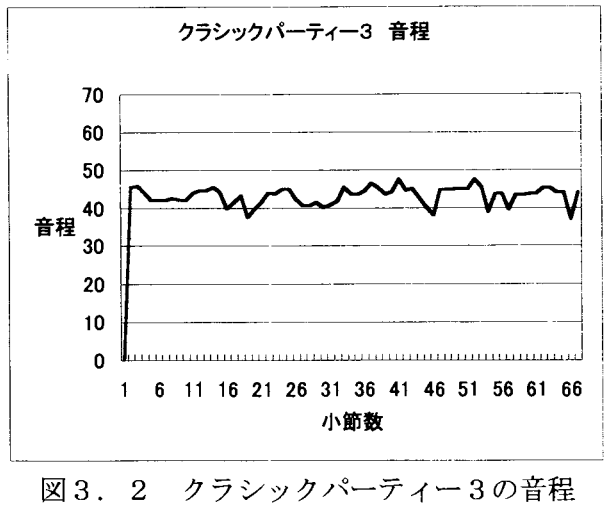


図３．２　クラシックパーティー３の音程

これをテンポのときと同様２～７、８～１５、１６～２６、２７～３４、３５～４２、４３～４９，５０～５２、５３～６１、６２～６７小節に区切り、平均値を取り音程の入力値とした。以下の表３．２に示す

表３．２　音程の入力値

小節数	音程の平均値
2～7	43.531
8～15	43.661
16～26	42.108
27～34	41.849
35～42	44.994
43～49	42.854
49～52	45.530
53～61	42.839
62～67	43.271

4　動画について

動画の動きについて、本研究では入力部にてテンポ、音程の入力が行われるが、そのテンポ、音程に対してどのように動画が変化するかをキャラクターの腕の振りの速さ、腰と腕の位置の違いによって表現する。図４．１には腕の振りの速さを表す動画の一例を、図４．２は腰や腕の位置の違う動画の一例を示す。

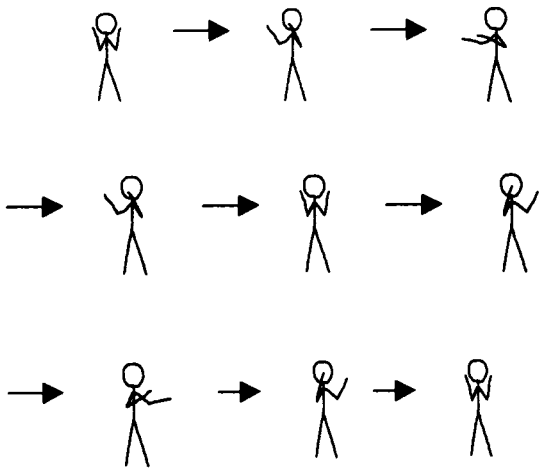


図４．１　腕の振りの速さ

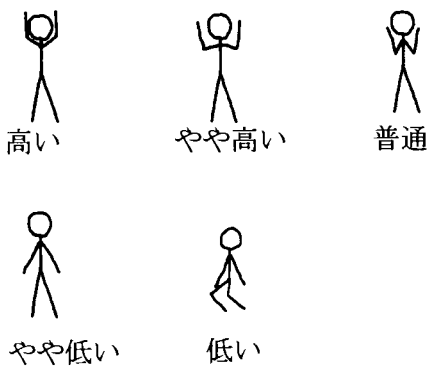


図４．２　キャラクターの腰と腕の位置

動画データベースとして、キャラクターの腰と腕の位置が違う動画を６個用意し、それぞれに腕の振りの速さが違う動画を８～１０個用意したので、合計５０個くらいの動画を用意した。

5　推論部

５．１　前件部のメンバーシップ関数

入力に関するメンバーシップ関数を以下のように設定しました。図５．１にテンポのメンバーシップ関数を、図５．２に音程のメンバーシップ関数を表す。

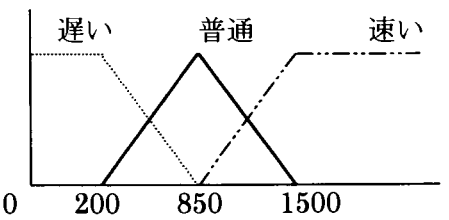


図５．１　テンポのメンバーシップ関数

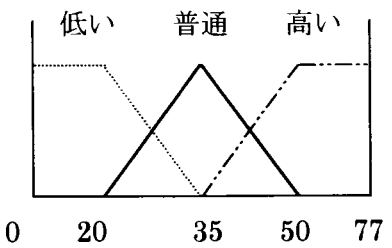


図５．２　音程のメンバーシップ関数

５．２　後件部のメンバーシップ関数

出力に関するメンバーシップ関数を以下のように設定した。図５．３は腕の振りの速さに関するメンバーシップ関数を、図５．４に腕と腰の位置に関するメンバーシップ関数を表す。

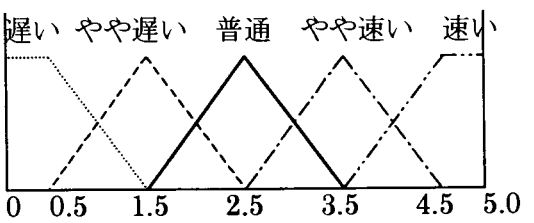


図５．３　腕の振りの速さのメンバーシップ関数

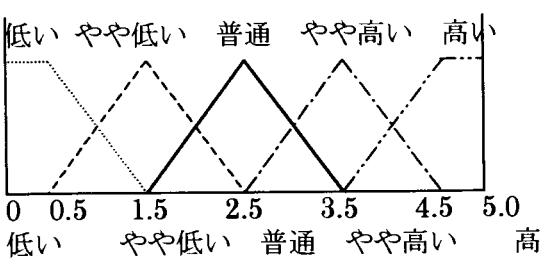


図５．４　腕と腰の位置のメンバーシップ関数

5．3　ファジィルール

推論方法についてはIF-THENルールを用いることにする。音楽のテンポ・音程の測定値に対してルールに従ってメンバーシップ関数の値の間でMIN演算を行い、それぞれの後件部の値の間でMAX演算した結果を重心法を用いて非ファジィ化を行う。「腕の振りの速さ」と「腕や腰の位置の違い」に対してそれぞれ作成したルールを以下に示す。

腕の振りの速さに関するIf-Thenルール

T(テンポ)　I(音程)　S(腕の振りの速さ)

If Tis 遅い and Iis 低い then Sis 遅い
If Tis 遅い and Iis 普通 then Sis 遅い
If Tis 遅い and Iis 高い then Sis やや遅
If Tis 普通 and Iis 低い then Sis やや遅
If Tis 普通 and Iis 普通 then Sis 普通
If Tis 普通 and Iis 高い then Sis やや速
If Tis 速い and Iis 低い then Sis やや速
If Tis 速い and Iis 普通 then Sis 速い
If Tis 速い and Iis 高い then Sis 速い

腰と腕の位置に関するIf～Thenルール

T(テンポ)　I(音程)　P(腰と腕の位置)

If Tis 遅い and Iis 低い then Pis 低い
If Tis 遅い and Iis 普通 then Pis やや低
If Tis 遅い and Iis 高い then Pis やや高
If Tis 普通 and Iis 低い then Pis 低い
If Tis 普通 and Iis 普通 then Pis 普通
If Tis 普通 and Iis 高い then Pis 高い
If Tis 速い and Iis 低い then Pis やや低
If Tis 速い and Iis 普通 then Pis やや高
If Tis 速い and Iis 高い then Pis 高い

6　結果

「クラシックパーティー3」の実行結果を以下の表6に示す。

表6　クラシックパーティー3のプログラムの実行結果

小節数	テンポの平均値	音程の平均値	腕の振りの速さ	腕と腰の位置
2～7	262.67	43.53	1.39	2.43
8～15	826.50	43.66	2.73	3.11
16～26	1345.10	42.11	3.71	3.38
27～34	505.38	41.85	1.79	2.46
35～42	1807.00	44.99	4.40	3.85
43～49	1549.00	42.85	4.42	3.73
50～52	925.00	45.53	3.17	3.39
53～61	1506.00	42.84	4.40	3.73
62～69	300.00	43.27	1.57	2.40

この結果を元に、動画データベースからもっともマッチするものを選び、編集したものを出力結果とした。

7　まとめ

テンポや音程の変化がある音楽に関しては動画の動きも合っているものが作れたが、テンポや音程にあまり変化のみられない音楽に関しては動画もあまり変化せず、見ていて飽きてしまうものになった。

今後、もっと、音楽の項目、動画の項目を増やしてこの研究を続行する。たとえば音楽に関しては、音楽の三要素であるリズム、メロディ、ハーモニーなどを考慮して、項目数を増やし、動画においても、それに対応させてバリエーションを増やすなどするともっと人間の感性にあい、印象が残る動画が作れるのではないかと思われる。

このシステムは将来歩行ロボットのダンスにも利用されることを期待している。

参考文献

[1]　水本雅晴：講座ファジィ2巻　「ファジィ集合」
日刊工業新聞社

[2]　吉田敬一・竹内淑子：教養　C言語　C＋＋への道
共立出版株式会社

連絡先
〒184-8584
東京都小金井市梶野町3-7-2
法政大学　工学部
システム制御工学科　増井研究室
小杉　智
電話：042-387-6249
FAX：042-387-6123
Email: masui@k.hosei.ac.jp

音楽専用形容詞イメージチャート作成の可能性

Possibility of the adjective image chart creation only for music

山脇 一宏　　椎塚 久雄
Kazuhiro YAMAWAKI　　Hisao SHIIZUKA
yamawaki@a3.ctkev.ne.jp　shiizuka@cc.kogakuin.ac.jp
工学院大学大学院工学研究科情報学専攻
Informatics, Kogakuin University Graduate School, Nishishinjuku 1-24-2, Shinjuku, Tokyo 163-8677 Japan

Abstract: The method that grasps the characteristic of music by an adjective has been carried out. This paper proposes the entirely new method that grasps the characteristic of music, by putting an adjective on the axis of coordinates. We announced the usefulness of the characteristic grasp of music by using the color image chart by precedence research. We advance research furthermore and search the possibility of the preparation of the adjective image chart of the music

1．はじめに

音楽の特徴抽出における一つの手法として，従来，形容詞によるイメージの把握がなされてきた．本研究は，イメージの近似を元に作成した形容詞のチャートを利用することにより，より詳細な音楽の特徴抽出が可能な新しい手法を探るものである．

我々は，色彩・デザインの世界で利用されているカラーイメージスケール[1]を音楽における特徴抽出に用いる可能性について先行研究を行ってきたが，音楽と色彩の感性的対応によって，音楽における特徴抽出に形容詞イメージチャートが有用であるという結果に至っている[2]～[4]．しかし，同時にカラーイメージチャートではネガティブなイメージの抽出が難しいことも判明している．本研究はネガティブなイメージをも抽出が可能な，音楽専用のイメージチャートの作成をめざすものである．実際の手法としては，音楽大学の学生等へのアンケートによってその有用性を確認する．以下，第２章において，アンケートの詳細について述べる．第３章ではアンケート結果について述べる．第４章ではアンケート結果を考察し，第５章では，今回の実験結果から得られる音楽専用形容詞イメージチャートの作成の可能性についてそれぞれ述べる．

2．アンケートの詳細

アンケートはサンプル曲を聴取者に聴かせ，そのイメージを形容詞群の中から選び出す形を採った．そのアンケートに使用する楽曲は，先入観の排除のために，著者の一人が作曲したオリジナル曲とした．調性以外の要素が同一である２曲を作曲した．なお、サンプル曲はイメージの拡散を防ぐ為，以下の３点にも留意した．①同一のメロディーライン、同一の楽想の繰り返しであること．（二部形式）②調性的にはDes dur（変二長調）とcis moll（嬰ハ短調）であること．つまり異名同音調である．また，調性の確定のために転調・副Ⅴの和音を使用しないこと．③20秒程度で楽曲のイメージが拡散しないこと．当然であるが、Des durとcis mollの楽曲の差異は、音階のⅢ音・Ⅵ音の変化のみによって作り出すこととする。

この２曲について形容詞を選択する形のアンケート聴取を行う．使用する形容詞は以下の２グループを設定した．まず，カラーイメージチャートに使われている代表的な形容詞から46個厳選して，positiveグループとした．次にその形容詞の反対の意味を持つ形容詞を反対語辞典[5]等から導き出し，negativeグループとした．もちろん，聴取者には規則性がない形に両グループの形容詞を混ぜ合わせて提示した．アンケート被験者には，イメージに合致する形容詞を最大４個選ぶように指示した，

3．アンケート結果

一人当たりの持ち点を10点とし、１語のみ選択→10点。４語選択→それぞれ2.5点…として換算した。今回は予備実験として，10名の学生にアンケートを課した．まず，選択頻度の高い順に表１に示す。尚，形容詞の前につけられている(+) (-)はそれぞれ、(+)…positiveグループ，(-) …negativeグループを表す．

表１　形容詞選択状況表

↓選択頻度	第一曲	第二曲
１位	(+) かわいい/33.3点	(-) 寂しい/43.3点
２位	(+) ほがらか/20点	(-) 内向的な/20.8点
３位	(+) 子供らしい/18.3点	(+) 繊細な/10点
４位	(+) 楽しい/5.8点	(-) 地味な/6.6点

次に，各形容詞の評価値をイメージスケール上での形容詞の座標点にプロットした．（図１，図２，図３参照）．座標点は，カラーイメージスケールのＸ軸（WARM-COOL）Ｙ軸（SOFT-HARD）を踏襲し，各形容詞の選択値をバルーン

の大きさとしてプロットする。positive グループ，negative グループそれぞれを別のグラフとした。尚，第一曲の negative グループにはデーターが全く存在しない為，割愛した．

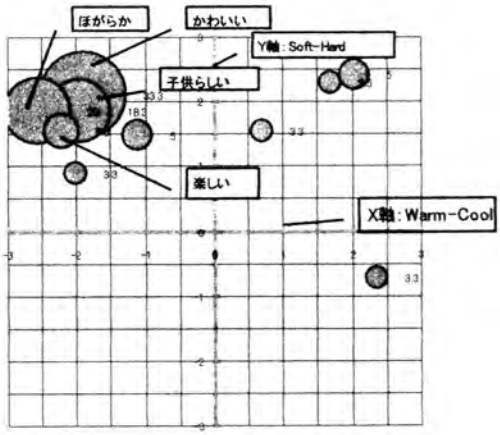


図 1．第一曲　プロット図（positive グループ）

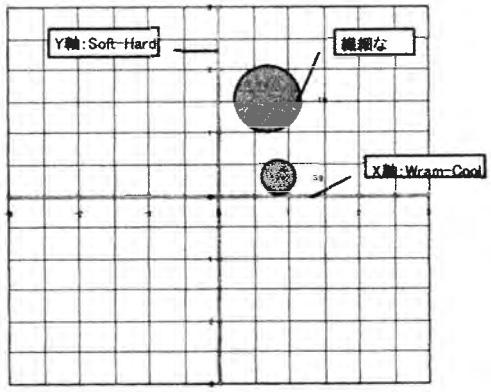


図 2．第二曲　プロット図（positive グループ）

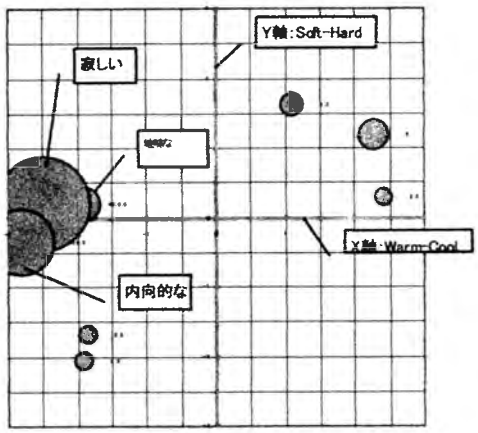


図 3．第二曲　プロット図（negative グループ）

4．アンケートの結果考察

A．形容詞イメージチャートの有用性

選択頻度の高い形容詞群を見て、一つの傾向を見出すのは難しい。しかし、形容詞イメージスケールの座標にプロットした図を見ると、ある傾向を読み取ることができる。イメージカラースケールにおいて、座標点が近いと形容詞のイメージが近いという特徴によってその音楽の特徴が見出せるのである。

B．ネガティブなイメージの抽出の可能性．

楽曲の特徴によって positive グループ，negative グループのデーターに大きな変化が見られ，しかもそのデーターは楽曲の基本的に特徴である調性から想像しても肯ける結果である．しかも，第二曲（cis moll 嬰ハ短調）の楽曲にも positive なイメージが存在することも判明した．このように，通常の形容詞による特徴抽出では得られない，楽曲の微妙な傾向を見出せる可能性も見出せた．

5．まとめ

以上の結果考察から，ネガティブなイメージを抱合した，音楽専用形容詞イメージチャートの作成の可能性は十分確認できた．今回の実験結果を元に更なるアンケートを施し，音楽の特徴抽出における有用性を確認すると同時に音楽の特徴把握に役立てるつもりである．

文　献

[1]（株）日本カラーデザイン研究所編，新カラーイメージ事典，講談社，(1993)

[2]山脇一宏・椎塚久雄：音楽とカラーイメージの感性的対応について，第 4 回日本感性工学会大会予稿集 2002，p 237 (2002)

[3]山脇一宏・椎塚久雄：カラーイメージの音楽検索システムへの応用について，日本感性工学会　あいまいと感性研究部会研究発表会，第 9 回，pp44-47(2002)

[4]山脇一宏・椎塚久雄：音楽とカラーイメージの類似性について，情報処理学会研究会報告，音楽情報科学研究報告，No. 47-18，pp105-109(2002)

[5]北原保雄・東郷吉男編，反対語対象語辞典，東京出版，(1989)

連絡先

〒163-8677　東京都新宿区西新宿 1-24-2

工学院大学大学院　情報学専攻　博士後期課程

数理情報研究室

山脇　一宏

Email:yamawaki@a3.ctkev.ne.jp

感性情報を用いた音楽推薦システム

Music Recommendation System Using KANSEI Information

黒瀬　崇弘　　梶川　嘉延　　野村　康雄
Takahiro KUROSE　Yoshinobu KAJIKAWA　Yasuo NOMURA
関西大学　関西大学　関西大学
Kansai University　Kansai University　Kansai University

Abstract In this paper, we propose music recommendation systems considering user's taste for music. We have already proposed a music retrieval system using KANSEI words as a user-friendly retrieval system. This system can almost satisfy general users' requests. However, we have never constructed a music retrieval system handling user's taste in which individual difference is large. We therefore propose music recommendation systems considering user's taste for music by using audience histories. In the proposed systems, content-based filtering, collaborative filtering, and the hybrid are utilized, respectively. Evaluation experiments demonstrate the efficiency of the proposed systems.

1. はじめに

近年の情報通信分野における技術革新はめざましく，技術革新を背景とした情報通信の高度化は，社会経済に大きな変革をもたらすものとして期待されている．その中でも，デジタル技術の進展は情報通信分野における最も大きな技術革新の一つとして，情報通信の高度化をもたらすもので，既にインターネット，携帯電話を中心として我々の生活の中にも急速に浸透している．また，情報発信方法として最も普及しているテレビ放送の分野においても1996年6月から衛星デジタル多チャンネル放送が開始され，近く2003年12月には，一部の地域で地上波デジタル放送も開始される予定である．このように，今後益々情報といったものが我々にとって身近になると予想される．しかしその反面，情報の肥大化により個人が本当に得たい情報を探すことが，逆に困難になってしまうといった現状に陥る可能性がある．また，インターネット上のGoogleをはじめとする検索エンジンにおいても得たい情報のキーワード（テキスト情報）を持ち合わせていないと検索できないといった問題を含んでいる．そういった背景から我々はこれまで，音楽情報を対象に曲名，作曲者名等の情報を持ち合わせていないユーザにも音楽の印象から検索を行えるシステムを構築してきた[1]．しかし，個人差の大きく現れる音楽の嗜好は検索指標として扱うことはできなかった．そこで本研究では，個人の利用履歴を参照することにより，ユーザの嗜好に見合った音楽を推薦できるシステムの構築を目的とする．履歴を参照することによって情報を推薦する手法には，内容に基づくフィルタリング，及び協調フィルタリングの手法がある．しかし，双方の手法には，それぞれに問題点がある．そこで，内容に基づくフィルタリングと協調フィルタリングの手法を連動させることで，双方の問題点を補完し，音楽情報を有効に推薦できると考えた．以降，2章では関連研究を紹介し，3章で本研究の提案システムを説明する．4章ではそれぞれの手法の評価実験を行い結果の考察を行う．5章でまとめを述べる．

2. 関連研究

膨大な情報の中から，個々のユーザの嗜好に合った情報を推薦するシステムの研究は大きく分けて内容に基づくフィルタリング(Content-Based Recommendation)と協調フィルタリング(Collaborative Recommendation)の二つの手法が存在する．これらの手法は，主にWorld Wide Webコンテンツの推薦を目的とした研究が多い．この章では，それぞれの手法の基本的な概要，及びそれぞれが持つ問題点について述べる．

2.1. 内容に基づくフィルタリング

内容に基づくフィルタリングとは，過去にユーザが好んだアイテムの内容を分析することでユーザの嗜好傾向を示したユーザプロファイルを生成し，そのユーザプロファイルの情報に類似する情報を推薦する手法である．この手法を用いた例としてInfoFinder[2]やTree Qを用いた方法[3]がある．

内容に基づくフィルタリング手法の問題点は，既存技術において有効な特徴量を抽出できない場合があるといったことである．本稿で扱う音楽情報においても，個人の嗜好に関係する音楽指標とは一般的に定められないといったことから，同種の問題を含んでいる．本研究では，ユーザプロファイルに扱う音楽指標として8種類の感性情報と，17種類の楽曲特徴量をそれぞれ用いた．詳しい音楽指標の説明については，3章で説明する．

二つめの問題点は，過度の専門化の問題である．システムがユーザプロファイルを大いに反映して情報を

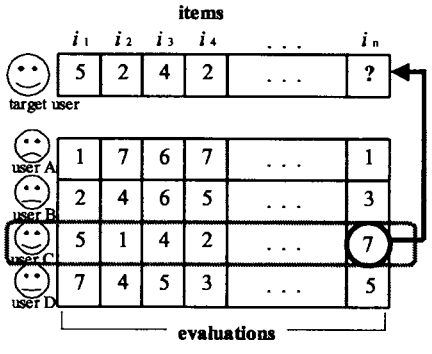


図 1: 協調フィルタリング概要

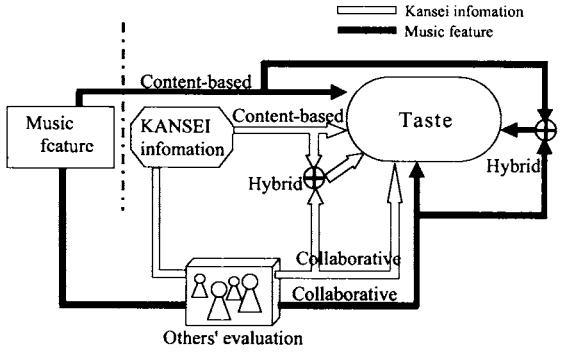


図 2: 提案システム概要

推薦すると，既に高い評価をした情報の特性に似た情報だけが出力される．これは，ユーザの嗜好変化に追随することを困難にし，また，ユーザに新たな嗜好の発見を促す作用は働かないことから閉塞的なシステムになってしまうと考えられる．

2.2. 協調フィルタリング

協調フィルタリングの概要を図 1 を用いて説明する．この図において評価対象ユーザに類似するのは user C である．よって対象ユーザがアイテム i_n を評価していない場合は，類似ユーザである user C がアイテム i_n に高い評価を下していることから対象ユーザの i_n の評価も高い評価が得られると予測される．つまり，ユーザ間の類似度を計算し，類似度の高いユーザの情報を優先的に参照し推薦するというのが協調フィルタリングの手法である．この手法は，内容に基づくフィルタリングと違い，情報自体がどのような特性を持っているかを言及しない．評価対象ユーザ k の未評価音楽 m に対する予測評価値 $est_{k,m}$ の算出法には以下の式が用いられる．

$$est_{k,m} = \overline{fav_k} + \gamma \sum_{n=1,n\neq k}^{N} w_{kn}(fav_{n,m} - \overline{fav_n}) \quad (1)$$

ここで，N はユーザ総数，$fav_{n,m}$ はユーザ n の音楽 m に対する嗜好評価値であり，$\overline{fav}$ は平均値である．また，w_{kn} はユーザ k とユーザ n のプロファイルの類似度 (一般的に相関係数) を示す．γ は調整係数である．この手法を用いた例として GroupLens[4]，ソフトウェア機能推薦 [5] 等がある．協調フィルタリング手法の問題点は，全てのユーザが未評価である情報は推薦されないことである．これは，ユーザ人数や蓄えられている情報の規模に大きく依存し，ユーザの評価履歴数が少ない場合において，システムは有効に働かず，多くの評価履歴を必要とすることを意味する．しかし，ユーザにとって評価付けは面倒な作業であるため，この手法は現実的でない．よって本研究では，少ない履歴状態での精度の向上を目的としている．

3. 提案システム

本研究では，個人の嗜好にあった音楽情報を推薦するシステムを提案する．概要を図 2 に示す．ユーザプロファイルを構成するための音楽指標には，感性情報及び楽曲特徴量の二種類を用いた．それらについては**3.1** で説明する．**3.2** ではユーザプロファイルの更新方法を説明し，**3.3** では内容に基づくフィルタリングと協調フィルタリングを連動させたハイブリッドシステムについて説明する．なお，本研究で扱う音楽データは，様々なジャンルのピアノ曲 75 曲の SMF(Standard MIDI file) である．

3.1. 感性情報及び楽曲特徴量

2.1 で説明したように，個人の嗜好に関係する音楽指標は定められないが，本研究では感性情報と楽曲特徴量をユーザプロファイルを構成する要素として用いた．ここでの感性情報とは，人が音楽を聞いた時に受ける印象を，表 1 に示す 8 種類の感性語で 7 段階評価を行い数値化したものである．数値化の方法は，データベース中の音楽データ 75 曲の楽曲に対し，交響楽団 50 名が音楽データの印象評価を行い，50 名の評価の中央値を音楽データの感性情報として定めた．ユーザプロファイルとして用いるために 7 段階評価を [-1,1] に正規化する．また，楽曲特徴量は，表 2 に示す 17 種類の特徴量を 75 曲の SMF データからそれぞれ算出したものであり，全ての特徴量は [0,1] に正規化する．

3.2. ユーザプロファイル算出法

ユーザプロファイルは，個人の嗜好評価と音楽指標との関係を示すものである．ユーザは提示される音楽に対して「1. 嫌い-7. 好き」7 段階の評価を下すものとする．7 段階の嗜好評価値も感性情報と同様に [-1,1] に正規化を行い計算を行う．ユーザプロファイルの算出法として一括算出方式と逐次更新方式を用意した．**3.1** で説明した感性情報 adj，楽曲特徴量 fea は音楽指標 ind に代入して計算される．まず，一括算出方式 $pro1$ の説明をする．

$$pro1_i = \frac{\sum(ind_i - \overline{ind_i})(fav - \overline{fav})}{\sqrt{\sum(ind_i - \overline{ind_i})^2}\sqrt{\sum(fav - \overline{fav})^2}} \quad (2)$$

表 1: 感性情報

adj_i	感性語対
adj_1	1. 歯切れのよい − 7. なめらかな
adj_2	1. 厚い − 7. 薄い
adj_3	1. やわらかい − 7. かたい
adj_4	1. 不安定な − 7. 安定な
adj_5	1. 激しい − 7. おだやかな
adj_6	1. 軽い − 7. 重い
adj_7	1. にごった − 7. 澄んだ
adj_8	1. 暗い − 7. 明るい

表 2: 楽曲特徴量

fea_i	特徴量	説明
fea_1	$Pitch-ave$	音程の平均値
fea_2	$Pitch-var$	音程の分散値
fea_3	$Velocity-ave$	音量の平均値
fea_4	$Velocity-var$	音量の分散値
fea_5	$Gate-ave$	音長の平均値
fea_6	$Gate-var$	音長の分散値
fea_7	$Density$	音符密度
fea_8	$Resister$	音程のダイナミクス
fea_9	$Tempo$	テンポ
fea_{10}	$Low-num$	低音域の音符数
fea_{11}	$Middle-num$	中音域の音符数
fea_{12}	$High-num$	高音域の音符数
fea_{13}	$Low-time$	低音域の時間の長さ
fea_{14}	$Middle-time$	中音域の時間の長さ
fea_{15}	$High-time$	高音域の時間の長さ
fea_{16}	$Rest-num$	休符の数
fea_{17}	$Rest-time$	休符の時間の長さ

この式は，履歴中全てのユーザの嗜好評価 fav と音楽指標 ind との相関係数を取ったものである．次に，逐次更新方式を説明する．

$$pro2_i(t+1) = \alpha\, pro2_i(t) + (1-\alpha) ind_i(t) \times fav(t) \quad (3)$$

この式は，ユーザが音楽データに対して嗜好評価を下すごとにユーザプロファイル値を更新することを示している．t はユーザの試聴履歴回数を示している．$pro2$ の初期値 $pro2(0) = 0$ とする．また，α はどれだけ以前の評価を新しいプロファイル値に反映させるかを決める係数であり，本研究では経験的に $\alpha = 0.99$ とした．

3.3. ハイブリッドシステム

2 で二つの推薦手法の問題点を挙げた．それぞれの問題点を補う方法として双方の手法を連動させる考え方がある [6]．本研究で提案するハイブリッドシステムの流れを図 3 に示す．まず，生成されたユーザプロファイルより内容に基づくフィルタリングの手法で，ユーザが未評価である情報に仮の評価値を付加する．これは，内容に基づくフィルタリング手法の予測値に他ならない．次に，推薦対象とするユーザを決定し，ユーザプロファイルより他のユーザとの類似度を算出する．その類似度の高いユーザからの情報を大いに参照し未評価情報に対する予測値を算出する．これは，協調フィルタリングの手法と同じ操作である．この二段階の操作を行うことで，まず内容に基づくフィルタリングの問題点であった，類似情報のみが推薦されるといったことは，協調フィルタリングの手法を行っていることで解決されると考えられる．また，協調フィルタリングの問題点であった，全てのユーザによって評価されていない情報は誰にも推薦されることがないといった点は，内容に基づくフィルタリングの手法によって，全ての情報にはなんらかの評価が得られていると扱うことにより解決される．例として図 3 の No.4 の音楽は普通の協調フィルタリングの操作では，誰も評価を行っていないので，どのユーザにも推薦されることはない．しかし，ハイブリッドシステムにおいては仮評価値を用いてそれぞれのユーザに推薦を行うことができる．

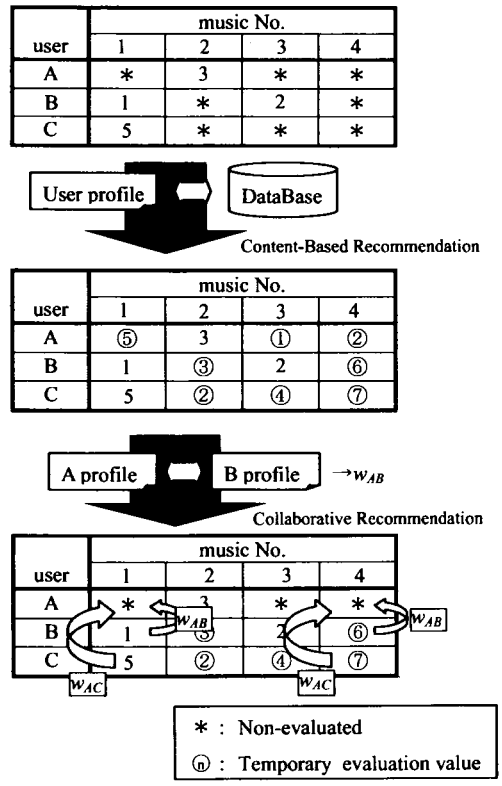


図 3: ハイブリッドシステム

4. 評価実験

これまでに説明してきたそれぞれの推薦手法の評価実験を行う．評価方法は文献 [3] を参考にした．

表 3: 被験者評価データ　(40 曲 ×24 名)

Category	Rating	number of songs	Ration(%)
C_g	7	59	52.6
	6	184	
	5	262	
C_f	4	197	20.5
C_b	3	160	26.9
	2	74	
	1	24	

4.1. 実験手順

被験者 24 名が音楽データ 75 曲に対して「1. 嫌い-7. 好き」の 7 段階で主観評価した結果を用いて推薦精度を調べる．全楽曲中，被験者が試聴した前半 35 曲を学習用のデータとして扱い，残りの 40 曲を評価用のデータとして扱う．評価用のデータを 3 つのカテゴリー (C_g, C_f, C_b) に分類する．C_g, C_f, C_b には評価値が「5 以上」「4」「3 以下」の音楽データをそれぞれ分類する．評価データの内訳を表 3 に示す．被験者 24 名の試聴履歴数が 10 曲から 35 曲の時にそれぞれの推薦方法で評価データ 40 曲分の予測値を算出する．

4.2. 実験結果と考察

それぞれの推薦手法によって評価対象データの予測値を算出し，予測値の順にソートされた評価対象データ一覧の上位 n 件での推薦精度 (以下，Prec@n) を算出することにより評価を行う．推薦精度算出時には，C_g に含まれるデータを「適合」，C_f, C_b に含まれるデータを「非適合」とそれぞれみなしている．表 4,5 にそれぞれの推薦手法で得られた推薦精度の平均値を示す．表 3 より，評価用データの約 52% が「適合」データであるのに対し，表 4,5 のほとんどの場合においてそれを超える推薦精度が得られており，推薦システムの有効性が確認できた．**3.1** で提案した二つの音楽指標による精度の差は，感性情報 adj を用いた方が楽曲特徴量 fea を用いたときより全体的に精度が良いことがわかる．これは，感性情報の方が楽曲特徴量のような物理的な特性よりも人間の嗜好に深く関係しているためと考えられる．また，**3.2** で述べた二種類のユーザプロファイルの算出法については，一括更新 $pro1$ を用いた方が全体的に精度が高かった．最期に**3.3** で述べた三種類の推薦方法については，明確な精度の差を見出すことができなかった．

5. まとめ

ユーザの負担が少なく，嗜好に見合った音楽情報を推薦するシステムの検討した．実験結果から，提案した推薦手法はある程度の有効性を示せたものの，推薦手法による精度の差を明確に示すことはできなかった．

表 4: 音楽推薦精度 (Prec@5)

	協調フィルタリング				内容に基づくフィルタリング				ハイブリッド			
	一括更新		逐次更新		一括更新		逐次更新		一括更新		逐次更新	
履歴	感性	音楽	感性	音楽	感性	音楽	感性	音楽	感性	音楽	感性	音楽
10	0.625	0.583	0.6	0.583	0.625	0.642	0.675	0.583	0.633	0.467	0.592	0.492
15	0.625	0.6	0.558	0.592	0.608	0.6	0.617	0.6	0.6	0.508	0.675	0.458
20	0.658	0.617	0.642	0.583	0.625	0.608	0.675	0.583	0.575	0.483	0.625	0.508
25	0.633	0.6	0.525	0.45	0.617	0.583	0.633	0.642	0.575	0.492	0.642	0.45
30	0.642	0.633	0.625	0.625	0.633	0.608	0.633	0.567	0.667	0.492	0.658	0.517
35	0.7	0.617	0.617	0.65	0.633	0.625	0.667	0.608	0.7	0.508	0.675	0.55

表 5: 音楽推薦精度 (Prec@10)

	協調フィルタリング				内容に基づくフィルタリング				ハイブリッド			
	一括更新		逐次更新		一括更新		逐次更新		一括更新		逐次更新	
履歴	感性	音楽	感性	音楽	感性	音楽	感性	音楽	感性	音楽	感性	音楽
10	0.629	0.563	0.567	0.596	0.633	0.604	0.638	0.583	0.633	0.488	0.6	0.492
15	0.608	0.588	0.567	0.558	0.6	0.621	0.617	0.604	0.588	0.496	0.642	0.529
20	0.613	0.6	0.604	0.533	0.625	0.592	0.642	0.621	0.633	0.521	0.65	0.488
25	0.608	0.596	0.554	0.492	0.629	0.592	0.638	0.613	0.625	0.504	0.629	0.492
30	0.642	0.638	0.575	0.588	0.654	0.608	0.646	0.604	0.642	0.538	0.646	0.521
35	0.671	0.642	0.596	0.588	0.667	0.604	0.654	0.617	0.671	0.55	0.654	0.525

また，実用に耐える精度が得られているとは言い難い．今後は，さらなる精度の向上を目指す．

謝辞　本研究の一部は関西大学重点領域研究ならびに関西大学学術助成基金の援助の下で行われた．

参考文献

[1] 池添剛，梶川嘉延，野村康雄，“音楽感性空間を用いた音楽データベース検索システム”，情処学論，Vol.42, No.12, pp.3201-3212, Dec. 2001.

[2] Krulwich, Burkey,“Leaning user information interests therough extraction ofsemantically significant phrases”, AAAI Spring Symposium, Mar. 1996.

[3] 帆足啓一郎,“ユーザの音楽嗜好に基づく音楽情報検索手法”, 情処学 MUS, Feb. 2003.

[4] Resnick, Iacovon, Suchak, Bergstrom, Riedl, “GroupLens: An Open Architecture for Collaborative Filtering of Netnews”, CSCW '94, pp.175-186, 1994.

[5] 大杉直樹 他，“ソフトウェア機能の推薦システムのための協調フィルタリング”, ソフトウェアシンポジウム, 2002.

[6] Marko Balabanovic, Yoav Shoham, “Fab: Content-Based, Collaborative Recommendation”, Communications of the ACM, Vol.40, No.3, Mar. 1997.

問い合わせ先

〒 564-8680
大阪府吹田市山手町 3-3-35
関西大学工学部電子工学科
梶川　嘉延
TEL: 06-6368-0528
E-mail: kaji@joho.densi.kansai-u.ac.jp

隠れマルコフモデルを用いた情緒計算手法の拡張

Emotion Generating Calculations based on Hidden Markov Model

目良和也，市村匠
Kazuya MERA, Takumi ICHIMURA
広島市立大学情報科学部
Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University

Abstract: The Emotion Generating Calculations (EGCs) method can calculate a human being's current emotion from the content of the utterance. In this paper, we extend the EGCs to refer variance of emotions based on Hidden Markov Model (HMM). Because the EGCs focus on 20 types of emotion, a 20-dimension vector is checked for a stimulus from external world. The enfeeblement process of the emotion vector's degree is expressed by the exponential distribution function and the current emotion vector is calculated based on HMM.

1. はじめに

現在，コンピュータの性能は大きく向上し，またその利用機会も大幅に増加している．しかし，コンピュータに不慣れな人でも快適に操作できるようなインタフェースに関する研究は，まだ十分とはいえない．より自然なコミュニケーションを図るために，我々は現在，感情を考慮したインタフェースについて研究を進めている．

これまで，事象に対してユーザが感じている情緒を，各ユーザの嗜好情報に基づいて計算する手法を提案している．この手法では，まず，情緒計算式[1]を用いて快／不快を計算し，次に，算出した快／不快を，他者の視点，予測と確認，モラルなどの条件に基づいて 20 種類の情緒に分類する[2,3]．

しかし従来の手法では，生起した事象の強度が時間に沿って減衰していく過程を表すことが出来なかった．そこで本研究では，過去に生起した情緒の減衰過程を考慮した情緒強度計算手法を提案する．そのため，隠れマルコフモデルを用いて各生起情緒の減衰過程を表す．減衰関数は，神経電位の減衰過程をもとに作成する．さらに減衰関数を感情ごとに与えることで，一つの事象に対しても時間経過によって現れる感情が変化する様子を再現できる[4]．

2. 情緒計算手法

我々が提案している情緒計算手法の概要を説明する．まず，格フレーム表現された事象に対して，事象タイプ[5]に応じた情緒計算式[1,3]を適用することによって快／不快を計算する．計算には事象中の格要素に対してユーザがあらかじめ持っている好感度を用いる．例えば「私が彼に勝った」という事象では，“私”，“彼”，“勝つ”の 3 要素の好感度を用いる．

好感度は，自分の好きな事物に対して正，嫌いな事物に対して負の値を持つ．なんとも思っていなければ好感度は 0 である．好感度の値は [-1. 0, 1. 0] の実数値で表される．

この手法では，事象の快／不快を判別すると同時に，判別した情緒の強度も計算する．各タイプの高々3 種類の必須要素を三次元空間（情緒空間）の直交軸にベクトルとして配置し，その合成ベクトルの長さを生起した快／不快の強度とする（図 1）．

$$\text{情緒強度} = \left|\vec{f}_1 + \vec{f}_2 + \vec{f}_3\right|$$

f_S ：主体の好感度　　f_O ：客体の好感度
f_{OF} ：出発点の好感度　　f_{OT} ：目標の好感度
f_{OM} ：相互作用の相手の好感度　　f_{OS} ：拠り所の好感度
f_{OC} ：属性の補足の好感度　　f_P ：述語の好感度

表 1: 事象タイプと情緒空間構成要素

事象タイプ	f_1	f_2	f_3
V(S)	f_S	β	f_P
V(S,OF) V(S,OT)	f_S	$f_{OT}-f_{OF}$	f_P
V(S,OM)	f_S	β	f_P
V(S,OS)	$f_S - f_{OS}$	β	f_P
V(S,O) vi.	f_S	f_O	f_P
V(S,O) vt.	f_O	β	f_P
V(S,O,OF) V(S,O,OT)	f_O	$f_{OT}-f_{OF}$	f_P
V(S,O,OM)	−	−	−
V(S,O,I)	f_O	f_I	f_P
V(S,O,OC)	f_O	β	f_{OC}
その他	−	−	−

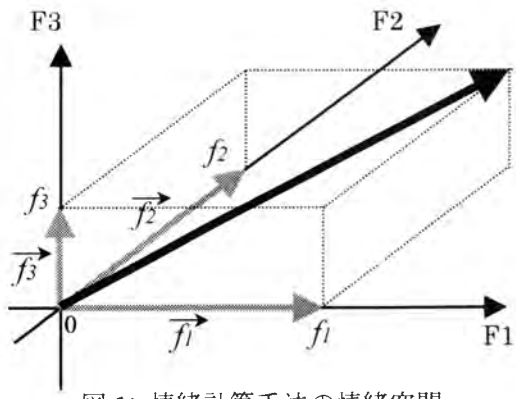


図 1: 情緒計算手法の情緒空間

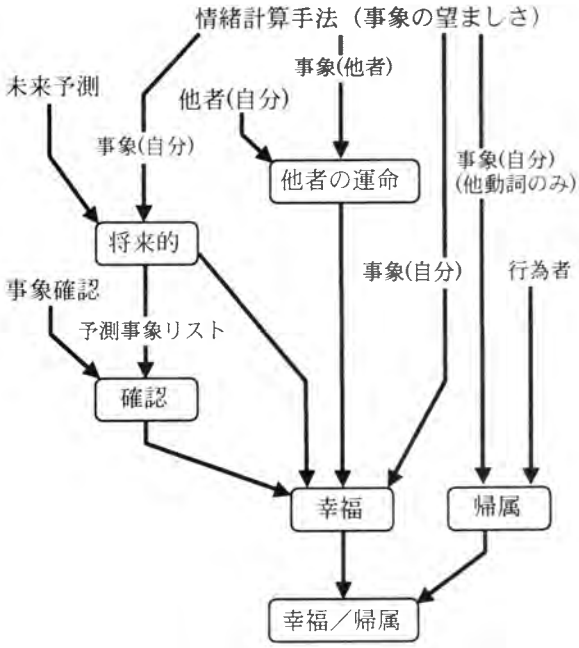


図 2：情緒計算の依存関係

次に，算出した快／不快を，感情誘発条件理論[6]に基づいて 20 種類の情緒に分類する．この手法では，“他者の視点”，“予測と確認”，“行為の承認／非難”という条件に基づいて情緒の分類を行っている．20 種類の情緒は，以下のように分類されている．“幸福”群に「喜び，悲しみ」，“他者の運命”群に「嬉しい，ほくそえむ，憤慨，気の毒」，“将来的”群に「望み，恐れ」，“確認”群に「満足，安堵，恐れていた通り，失望」，“帰属”群に「誇り，賞賛，羞恥，叱責」，“幸福／帰属”群に「感謝，怒り，自己満足，自責の念」がある．各情緒群には，図 2 のような依存関係がある．

以下に本手法の適用例を示す．

快／不快の判別:

事象：ゆうべ大家が迷惑な隣人を叱った
述語 (P) = “叱る” : –0.3
主体 (S) = “大家” : 0.0
客体 (O) = “迷惑な隣人” : –0.5
事象タイプ: “叱る” → V(S, O)

情緒強度 $= (f_O, \beta, f_P)$
$= (-0.5, +0.5, -0.3)$
$= 0.77$

快／不快判別 $= (f_O, \beta, f_P)$
$= (-0.5, +0.5, -0.3) \rightarrow$ 快

多様な情緒の生起:

(1) “迷惑な隣人”の視点からの情緒生起 = “不快” &
話者の視点からの“迷惑な隣人” = “嫌い”
→ 「迷惑な隣人」に対して“**ほくそ笑む**”が生起
(2) “ほくそ笑む”が生起している
→ “**喜び**”が生起
(3) “叱る”は他動詞 & 動作主は自分でない &
話者にとっての事象 = “快”
→ 「大家」に対して“**賞賛**”が生起
(4) “喜び”が生起 & “賞賛”が生起
→ 「大家」に対して“**感謝**”が生起

3. 隠れマルコフモデルに基づく情緒の推移

3.1. 隠れマルコフモデル

図 3 は推移図である．X_t は時間 t での状態である．時間が t から $t+1$ になったとき，状態 i から状態 j に推移する確率を p_{ij} と表す．ここで「マルコフ性」と「推移確率の定常性」について述べる．マルコフ性とは，「時点 n で状態 i にいたとき，次の時点 $n+1$ に状態 j に推移する確率は，時点 $n-1$ 以前にどの状態にいたかには無関係である」ことを示す．このマルコフ性に基づく確率過程を，マルコフ過程と呼ぶ．一方，「推移確率の定常性」とは，「推移の確率が時点 n でも $n+1$ でも全く同じ」ことを示す．

図 4 に示されるように，マルコフ過程は，連続状態及び連続時点について拡張されている．τ_1，τ_2 は他の状態への推移時点を表す．これらは互いに独立である．この時点だけに注目すると，$Z(\tau_1)$，$Z(\tau_2)$，…という離散時点の確率過程は斉時的マルコフ連鎖を作る．このマルコフ連鎖を「隠れマルコフ連鎖」と定義する[7]．

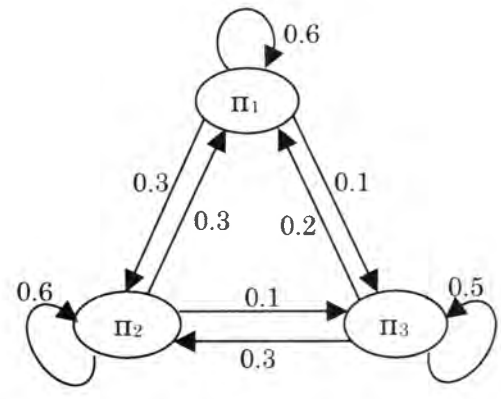


図 3：推移図

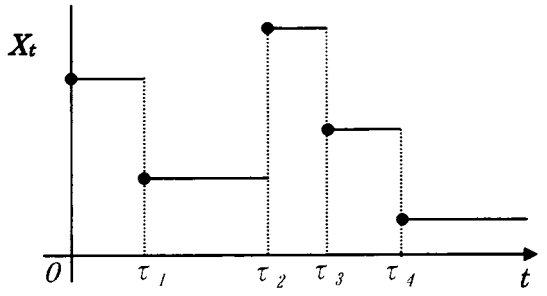


図 4：隠れマルコフモデル

推移時点	事象
τ_i	マーキューシオは殺された． ロミオは我慢できず， ティバルトを殺してしまった． 女達は悲鳴をあげた．
τ_{i+1}	幸いロミオは無事だった．
τ_{i+2}	しかし，街から追放されてしまった．

図 5：連続事象に対する情緒生起例

3.2. 隠れマルコフモデルを用いた感情の推移

情緒計算手法では，“他者の視点”，“予測と確認”，“行為の承認／非難”という条件に基づいて，入力事象に対する生起情緒を計算している．しかし一般的に，事象に対する生起情緒は，それまでにどのような情緒が生起したかに影響されるが，この手法では，生起した情緒の減衰過程については考慮していなかった．

そこで本研究では，隠れマルコフモデルを用いて情緒の時系列変化を扱えるよう，情緒計算手法を拡張する．推移時点 $\tau_i (i=1, 2, \cdots, n)$ は，情緒計算手法によって情緒が生起した時点を表す（図 5）．事象に対する 20 種類の情緒は同時に生起するものとする．そこで，それらの情緒を合成した 20 次元のベクトルを，隠れマルコフモデルにおける状態とする．各次元は各情緒を表す．

$$\boldsymbol{E}_i = (e_i^{joy}, e_i^{distress}, e_i^{happy\text{-}for}, \ldots, e_i^{remorse}).$$

e_i^{joy}：時間 i における“喜び”の度合
$e_i^{distress}$：時間 i における“苦しみ”の度合　(1)
$e_i^{happy\text{-}for}$：時間 i における“嬉しい”の度合
：
$e_i^{remorse}$：時間 i における“自責の念”の度合

しかしながら，時間の影響は個人によって異なる．そこで本研究では，隠れマルコフモデルを用いて情緒強度の推移を表す．

人間の脳内では，情緒も他の処理と同じくニューロン上の電気信号によって処理されている．そして，新たな信号が入ってこない限り，ニューロンの活動電位は図 6 のような時間的推移を示す[8]．

この図では，活動電位は刺激を受容した直後に急速に上昇し，時間 k で頂点に達したあと，徐々に下降していく．この推移過程はポアソン分布によって

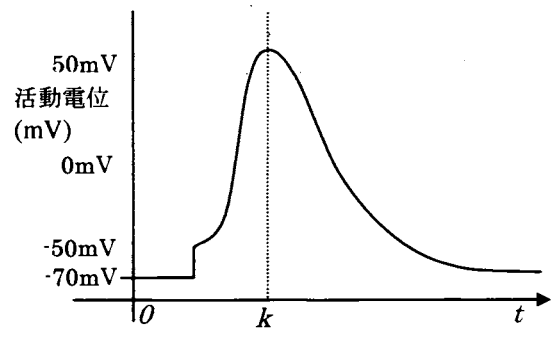


図 6：ニューロンの活動電位

表 2：各情緒の減衰率

タイプ	情緒	減衰率 (λ)
衝動	喜び，悲しみ，怒り	0.5
反応	満足，安堵，恐れていた通り，失望，羞恥，自責の念	0.8
気分	嬉しい，ほくそえむ，望み，恐れ，誇り，自己満足	1.0
態度	憤慨，気の毒，賞賛，叱責，感謝	1.5

表すことが出来る．

$$P_i(t) = \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \qquad (i = 0,1,\ldots) \quad (2)$$

しかし本研究では情緒生起後の減少に注目するため，時点 k 以降の減衰過程のみ対象とする．そこでポアソン分布の頂点 k から始まる式として，式 (2) の i に 0 を代入した (3) 式を対象とする．なお，この式は指数分布の式と同一である．

$$P(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$
$$\lim_{t\to\infty} P(t) = 0 \qquad (3)$$

本研究では，生起した 20 種類の情緒を 20 次元のベクトル $\boldsymbol{E}_i$ として表している．この $\boldsymbol{E}_i$ の各次元を独立に考えると，ある情緒はすぐに減衰するが，別の情緒は長く持続する，といった状況を再現することができる．式 (4) は，“喜び”の情緒強度 e^{joy} の減衰過程を表している．なお，係数 λ は各情緒ごとに異なり，早く減衰する情緒は大きく，持続しやすいものは小さくなっている．本研究では，ひろた[9]の分類に基づき，表 2 のように λ を設定した．

$$\int \frac{\partial P(t)}{\partial e^{joy}} \partial e^{joy} = \lambda_{joy} e^{-\lambda_{joy} t}$$
$$\lim_{t\to\infty} \int \frac{\partial P(t)}{\partial e^{joy}} \partial e^{joy} = 0 \qquad (4)$$

式 (4) の減衰過程では $t=0$ での $P(t)$ の値は λ_{joy} であるが，本手法での初期値は情緒計算手法で得られた情緒強度となるべきである．そこで，式 (4) を

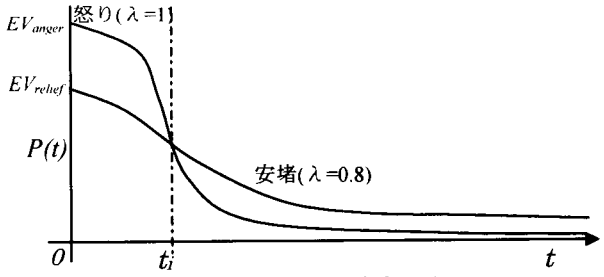


図 7：各情緒強度の減衰過程

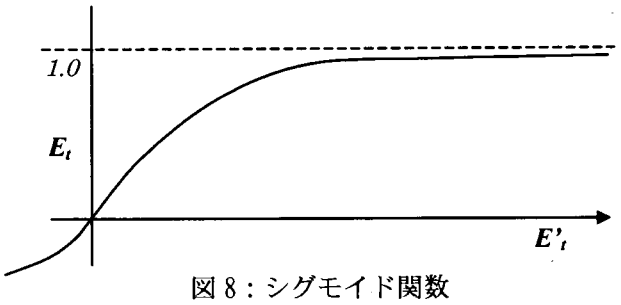


図 8：シグモイド関数

以下のように変更する．式 (5) 中の EV_{joy} は，“喜び”の初期情緒強度を表す．

$$\int \frac{\partial P(t)}{\partial e^{joy}} \partial e^{joy} = EV_{joy}\, e^{-\lambda_{joy} t} \qquad (5)$$

一つの事象に対して複数の情緒が生起し，それらの情緒の減衰関数が異なる場合，時間推移に応じて異なる情緒が表出されることがある．ここで，「彼は私の息子が怪我したと嘘をついた」という事象について考える．情緒計算手法では，“嘘を付いた人に対する怒り”と“息子が無事だったことへの安堵”が同時に生起する．図 8 に 2 つの情緒の推移を示す．初期状態では，“安堵”より“怒り”の程度が強いため，怒りをより強く表出する．しかし，怒りの減衰過程が安堵より急激であるため，時点 t_i で逆転し，エージェントは安堵を強く表出するようになる．

さらに，単発の情緒の減衰だけでなく，ある情緒が減衰途中に新しい情緒が生起した場合についても考える．本論文では，過去に生起した減衰中の情緒と新しく生起した情緒の和を E_t と表す．

しかしこの E_t は単純加算によって得られるため，最大値 1.0 を超える恐れがある．そこで式 (7) のようなシグモイド関数を適用し，値を 1.0 の範囲内に収める．

$$E'_t = P_{t-1}(E_{t-1}) + E'$$
$$E' = (e^{joy}, e^{distress}, e^{happy-for}, ..., e^{remorse}) \qquad (6)$$

$$E_t = \left(\frac{1}{1 + \exp(-E'_t)} - 0.5 \right) \times 2 \qquad (7)$$

4. おわりに

本論文では，複数の情緒が異なる時間に生起した場合の，情緒強度の推移を，隠れマルコフモデルによって計算する手法を提案した．この手法では，情緒計算手法によって得られた 20 種類の情緒を 20 次元のベクトルとして表現し，情緒ごとに用意した減衰関数にそって変化させる．現在の情緒は，減衰しつつある過去の情緒と新しく生起した情緒の和から算出する．

今後は，認知心理学や質問紙調査に基づいて，より詳細な減衰関数を作成し，実際の連続事象に対して適用することで，人間の情緒推移過程との比較を行う予定である．

参考文献

[1] 目良和也，市村匠，相沢輝昭，山下利之，語の好感度に基づく自然言語発話からの情緒生起手法，人工知能学会論文誌，Vol.17，No.3，pp.186-195 (2002).

[2] 目良和也，市村匠，山下利之，吉田勝美，感情誘発条件を用いた多様な情緒の分類手法，東京都立科学技術大学紀要，Vol. 16，pp. 11-16 (2002)

[3] Kazuya MERA ,Emotion Oriented Intelligent Interface，東京都立科学技術大学博士（学術）学位論文 (2003)

[4] Kazuya MERA and Takumi ICHIMURA, Emotion Generating Calculations based on Hidden Markov Model, Proc. of the 7th International Conference on Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems & Allied Technologies (KES2003)(to appear in 2003)

[5] 岡田直之，語の概念の表現と蓄積，電子情報通信学会出版 (1991)

[6] Clark Elliott，高砂美樹訳，人間とコンピュータの間の双方向感情的コミュニケーションの構成要素，—感情と人格に関する広範な基本モデルを用いて，認知科学，Vol.1，No.2，pp.16-30 (1994).

[7] 森村英典，高橋幸雄，マルコフ解析，日科技連 (1979)

[8] Albert B. 他，細胞の分子生物学（第 2 版），教育社 (1990)

[9]ひろたかなん，ココロを動かす技術，ココロを読み解く科学，新風舎 (2001)

連絡先：
〒731-3194
広島市安佐南区大塚東3-4-1
広島市立大学情報科学部
目良和也
電話&FAX： 082-830-1677
Email： mera@its.hiroshima-cu.ac.jp

モーメント補正を用いたファジィ区間データによる二元配置分散分析

Two-way Layout ANOVA by Fuzzy Interval Data using Moment Correction

小西 幹彦
Mikihiko Konishi
広島国際大学
Hiroshima International University

奥田 徹示
Tetsuji Okuda
大阪工業大学
Osaka Institute of Technology

浅居 喜代治
Kiyoji Asai
大阪府立大学名誉教授
Honorary Professor of Osaka Prefecture University

Abstract : Until now, the moment correction method for processing the fuzzy interval data has been proposed. And it processing method is applied to the various methods of data analysises. Furthermore, the processing method of the one-way layout ANOVA has been proposed using its moment correction. By the way, there is a case that the multi dimensional data is analyzed by ANOVA. If the dimension of data is two dimension then the processing method is called the two-way layout ANOVA. But, in the two-way layout ANOVA, it is necessary to estimate a lot of the sum squares as compared with the one-way layout ANOVA. So, in this research, we investigate the estimating methods of these sum squares from the fuzzy interval data using moment correctoin. And, the usefulness of the proposed method is investigated by computer simulation.

1 はじめに

データを観測する場合，得られるデータは常に正確な値であるとは限らず，あいまいさを含む形でデータが観測されることもある．また，あいまいさを含めた形で得られたデータでも，本来はある1点を示すデータであるが，観測条件などによりその1点を正確に観測できずにあいまいさを含むデータで観測される場合も考えられる．このような場合，観測対象を細分化してあいまいさを取り除くことも考えられる．しかし，細分化により観測項目を増やせば統計的モデルにおいては変数が増加することになり，データ処理がより複雑になる．そこで，通常のデータと同様の処理方法であいまいさを含むデータを処理し，正確なデータを処理した場合と同程度の結果を得ることができれば，有用であると思われる．

一方，実験データなどの解析を行なう場合，分散分析が用いられることがある．分散分析は，いくつかの水準において平均に差がないかどうかを検討する分析手法であり，水準が多次元である場合にも対応している．そこで，水準が一次元の場合を一元配置分散分析と呼び，二次元の場合を二元配置分散分析と呼ぶ．いずれの場合にも，平方和を用いた処理が必要となり，次元が増えれば必要となる平方和も増えて処理が複雑になるが，分散分析は多くの統計解析パッケージや表計算ソフトなどに分析機能が組み込まれていることもあり，容易に分析することが可能である．しかし，通常行なわれる分散分析ではデータにあいまいさが含まれることは考慮されておらず，あいまいさを含むデータを用いた場合には誤った結果が得られる可能性もある．そこで，モーメントの補正 [1] を応用して平方和に補正を行ない，あいまいさを含むデータを用いて一元配置分散分析を行なうための処理方法が提案され，その有効性が示されている [2]．しかし，二元配置分散分析では，一元配置での平方和とは別の構造の平方和を求める必要がある．そこで，本研究では二元配置分散分析において必要となる平方和をあいまいさを含むデータから求めるための処理方法を検討する．また，その処理方法の有効性を，コンピュータシミュレーションを用いて考察する．

2 ファジィ区間データ

通常の観測では，明確に示される値 x^0 をデータとして観測する．そして，従来の統計解析ではこの値を用いて処理が行われる．しかし，観測条件などの問題により，x^0 を正確に観測することが難しい場合も考えられる．このような場合，適当な幅を持つ区間データとして観測すれば観測が若干容易になると考えられるが，通常の区間では境界が明確に示されるため，境界付近で発生したデータに対しては，その値を正確に観測して境界値との比較により属する区間を判断しなければならない．そこで，本研究ではデータの属する区間を観測者が主観で判断することを考え，[1] で提案されているような境界のあいまいなファジィ区間データを取り扱うことを考える．

ファジィ区間データは，区間 H_i の中心値を x_i としてその両側に大きさ $h/2$ の幅を持つ区間 $H_i = [x_i -$

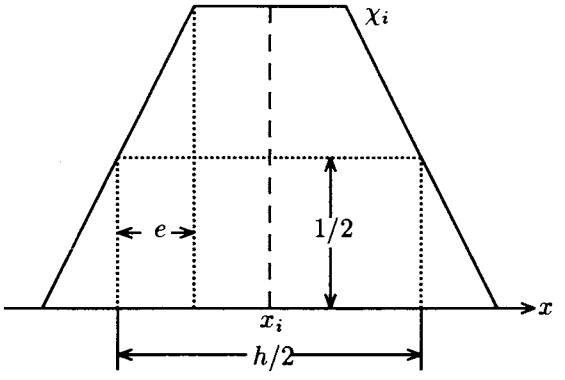


図 1: 台形型メンバシップ関数

$h/2, x_i + h/2]$ で表される区間データで，隣り合う区間 H_{i+1} の中心値 x_{i+1} と $x_{i+1} = x_i + h/2$ の関係にある．したがって，2 つの区間 H_i, H_{i+1} には重複する範囲があり，境界を明確に示すことのできないファジィ区間となる．そこで，区間 H_i として観測されたファジィ区間データを H_i 上で定義されるファジィ事象 χ_i で表すことにする．なお，本研究ではファジィ区間データ χ_i のメンバシップ関数を

$$\chi_i(x) = \max\left\{0, 1 \wedge \left(-\frac{1}{2e}|x| + \frac{h}{8e} + \frac{1}{2}\right)\right\} \quad (1)$$

とする．これは，H_i の中心値 x_i について $\chi_i(x_i) = 1$ となる台形型メンバシップ関数を示し，e は台形の形状を表すパラメータで $0 < e \leq h/4$ である．また，式 (1) は $x = 0$ を中心とするファジィ区間データのメンバシップ関数で，x_i を中心とするファジィ区間データ χ_i の場合は $\chi_i(x) = \chi(x - x_i)$ となる．このメンバシップ関数を，図 1 に示す．

3 ファジィ区間データによる二元配置分散分析

二元配置分散分析では，それぞれ p 個及び q 個の水準からなる水準 A 及び B の二次元データを扱い，表 1 のようなデータイメージとなる．なお，データはすべての水準において分散が等しい正規分布に従うと仮定される．そして，水準間に交互作用が存在するかどうかを検定し，交互作用がないと判断された場合は更に一元配置分散分析に相当する分析を行なう．これらの検定は，全体の総平方和 S_T を分解して

$$S_T = S_A + S_B + S_{A\times B} + S_E \quad (2)$$

とし，この右辺の平方和を用いて行なわれる．ただし，

$$S_T = \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q}\sum_{k=1}^{r}(x_{ijk} - \overline{x})^2 \quad \text{(総平方和)} \quad (3)$$

表 1: データイメージ

	B_1	$\cdots$	B_j	$\cdots$	B_q
A_1	x_{111} $\vdots$ x_{11r}	$\cdots$	x_{1j1} $\vdots$ x_{1jr}	$\cdots$	x_{1q1} $\vdots$ x_{1qr}
$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
A_i	x_{i11} $\vdots$ x_{i1r}	$\cdots$	x_{ij1} $\vdots$ x_{ijr}	$\cdots$	x_{iq1} $\vdots$ x_{iqr}
$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
A_p	x_{p11} $\vdots$ x_{p1r}	$\cdots$	x_{pj1} $\vdots$ x_{pjr}	$\cdots$	x_{pq1} $\vdots$ x_{pqr}

$$S_A = qr\sum_{i=1}^{p}(\overline{x}_{i\cdot} - \overline{x})^2 \quad \text{(A 間平方和)} \quad (4)$$

$$S_B = pr\sum_{j=1}^{q}(\overline{x}_{\cdot j} - \overline{x})^2 \quad \text{(B 間平方和)} \quad (5)$$

$$S_{A\times B} = r\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q}(\overline{x}_{ij} - \overline{x}_{i\cdot} - \overline{x}_{\cdot j} + \overline{x})^2$$

(交互作用平方和) (6)

$$S_E = \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q}\sum_{k=1}^{r}(x_{ijk} - \overline{x}_{ij})^2 \quad \text{(誤差平方和)} \quad (7)$$

であり，

$$\overline{x}_{ij} = \frac{1}{r}\sum_{k=1}^{r}x_{ijk} \quad (8)$$

$$\overline{x}_{i\cdot} = \frac{1}{qr}\sum_{j=1}^{q}\sum_{k=1}^{r}x_{ijk} \quad (9)$$

$$\overline{x}_{\cdot j} = \frac{1}{pr}\sum_{i=1}^{p}\sum_{k=1}^{r}x_{ijk} \quad (10)$$

としている．そして，これらの平方和を用いて表 2 の分散分析表を作成し，F 値を用いて検定を行なう．

ファジィ区間データを用いて二元配置分散分析を行なう場合も，表 2 の分散分析表を作成することになる．しかし，ファジィ区間データの処理は通常代表値を用いて行ない，その場合 2 次以上のモーメントに偏りが生じることが明らかとなっている [1]．分散分析の処理過程においては，それぞれの平方和が 2 次のモーメントを含んでいる．したがって，これらの平方和を代表値より求める場合は偏りが生じるため，偏りを取り除く補正量を用いる必要がある．そこで，それぞれ

表 2: 分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F_0
A	S_A	$\nu_A = p-1$	$V_A = S_A/\nu_A$	V_A/V_E
B	S_B	$\nu_B = q-1$	$V_B = S_B/\nu_B$	V_B/V_E
$A \times B$	$S_{A\times B}$	$\nu_{A\times B} = (p-1)(q-1)$	$V_{A\times B} = S_{A\times B}/\nu_{A\times B}$	$V_{A\times B}/V_E$
E	S_E	$\nu_E = pq(r-1)$	$V_E = S_E/\nu_E$	
計	S_T	ν_T		

の平方和の期待値から補正量を導けば,

$$S_T = \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q}\sum_{k=1}^{r}(x_{ijk}-\overline{x})^2 + (n-1)\Delta \quad (11)$$

$$S_A = qr\sum_{i=1}^{p}(\overline{x}_{i\cdot}-\overline{x})^2 + (p-1)\Delta \quad (12)$$

$$S_B = pr\sum_{j=1}^{q}(\overline{x}_{\cdot j}-\overline{x})^2 + (q-1)\Delta \quad (13)$$

$$S_{A\times B} = r\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q}(\overline{x}_{ij}-\overline{x}_{i\cdot}-\overline{x}_{\cdot j}+\overline{x})^2 + (p-1)(q-1)\Delta \quad (14)$$

$$S_E = \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q}\sum_{k=1}^{r}(x_{ijk}-\overline{x}_{ij})^2 + pq(r-1)\Delta \quad (15)$$

となる. ただし, ここでは分散が共通であることからデータの存在範囲に差はあまりないと考え, すべてのデータに対してファジィ区間の幅は共通であるとしている. そのため, Δ はすべての水準で共通となり, 式 (1) のメンバシップ関数に対して

$$\Delta = -\frac{h^2}{3}\left(\frac{1}{16}+\frac{e^2}{h^2}\right) \quad (16)$$

となる. なお, これらの補正量を含む平方和を用いても, 式 (2) の等号は満たされている. したがって, 平方和を求める段階で偏りを補正できることから, F 値では補正を施す必要がなく, 通常の分散分析と同様に処理が行なえるものと考えられる.

4 シミュレーションによる検討

ここで, 3 で述べた処理方法の有効性を, コンピュータシミュレーションを用いて数値的に検討する.

まず, A, B についてそれぞれ 3 つの水準を考える. そして, それぞれの水準に対して表 3 のような条件を設定し, データを作成する. つまり, (A_0, B_0) の水準では正規分布 $N(50.0, 15.0^2)$ に従う正規乱数を 100 個作成してデータとする. そして, ファジィ区間の幅が $h = 20$ となるように [3] に示される方法でファジィ区間データに変換する. なお, $h = 20$ の場合は 10 間隔で代表値が存在することになり, 平均が 50 前後で分散が 15^2 に従う正規乱数に対しては妥当な間隔であると考えられる. そして, 作成したデータを用いて, 3 で述べた処理方法を適用して分散分析を行なう. なお, ここではファジィ区間データの元となるあいまいさを含まない実データを処理することも可能なことから, 次の 3 つの方法により計算を行なう.

表 3: シミュレーション条件

		B_0	B_1	B_2
平均	A_0	50.0	54.0	50.0
	A_1	51.0	50.0	50.0
	A_2	50.0	50.0	46.0
標準偏差		15.0		
繰返し回数		100		
ファジィ区間の幅		20.0		
集計回数		100		

(a) 実データから通常の方法で計算 (実データ)

(b) 代表値から通常の方法で計算 (代表値)

(c) 代表値から補正を考慮して計算 (補正法)

つまり, (a) は正確にデータが観測可能な場合に得られる結果を表し, (b) と (c) はファジィ区間データとして観測された場合の結果となる. また, (b) はあいまいさを無視した誤った処理方法となる. そこで, (a) の結果を基準として (b) 及び (c) の結果から, 本研究での処理方法の有効性を数値的に検討する. なお, 平均的な視点から検討するために, 同条件でのシミュレーションを 100 回行ない, それぞれの値の平均値を用いて検討することにする.

以上の条件の下で行なった結果を, 表 4 に示す. まず, 平方和について, 交互作用平方和 $S_{A\times B}$ 及び誤差平方和 S_E, 総平方和 S_T については補正の効果が現れ, 代表値より補正法の方が実データの値に近いことがわかる. 一方, S_A, S_B については代表値の方が補正法より実データの値に近くなっている. しかし, 最終

表 4: シミュレーション結果

(a) 実データ

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
A	1653.18	2	826.59	3.6773
B	1524.37	2	762.18	3.3810
$A \times B$	1880.19	4	470.05	2.0880
誤差	201302.88	891	225.93	
計	206360.62	899		

(b) 代表値

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
A	1634.02	2	817.01	3.4646
B	1524.84	2	762.42	3.2176
$A \times B$	1941.12	4	485.28	2.0503
誤差	211318.06	891	237.17	
計	216418.04	899		

(c) 補正法

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
A	1613.19	2	806.59	3.5790
B	1504.01	2	752.00	3.3199
$A \times B$	1899.45	4	474.86	2.0989
誤差	202036.81	891	226.75	
計	207053.46	899		

的に必要な F 値で見れば，すべての処理方法で代表値より補正法の方が実データの値に近くなっている．これは，S_A, S_B 及び $S_{A\times B}$ それぞれの平方和の誤差よりも S_E の誤差の方がはるかに大きく，F 値には S_E の誤差が大きく影響しているためであると思われる．そして，S_E での偏りが補正されることにより，実データによる F 値に近い値が得られたものと考えられる．

また，得られた F 値を用いて有意水準 $\alpha = 0.05$ で検定を行なった結果，3 つの処理方法における結果の組合せは表 5 のような回数になった．ほとんどの場合において，すべての処理方法において検定結果に相違が見られない Type1,2 の結果となっている．しかし，補正を施さなければ検定結果を誤る Type3,4 の場合もあり，補正の効果が顕著に現れる結果も得られている．しかし，補正を施しても代表値と同じ検定結果となる Type7,8 の場合もあり，補正の効果が十分に現れていないことも考えられる．

以上の結果より，分散分析で最終的に必要となる F 値については，ファジィ区間データを処理する場合には補正を施すことにより現実のデータにより得られる F 値に近似でき，補正の効果が現れているものと思われる．また，検定結果からは，補正を施すことにより検定結果を誤る可能性が低くなると考えられる．

表 5: 検定結果のタイプ

Type	(a)	(b)	(c)	A	B	$A \times B$
1	非棄却	非棄却	非棄却	47	52	63
2	棄却	棄却	棄却	45	44	28
3	非棄却	棄却	非棄却	0	0	0
4	棄却	非棄却	棄却	1	2	2
5	非棄却	非棄却	棄却	1	0	0
6	棄却	棄却	非棄却	0	0	0
7	非棄却	棄却	棄却	3	0	2
8	棄却	非棄却	非棄却	3	2	5

5 おわりに

本研究では，ファジィ区間データを用いて二元配置分散分析を行なうための補正を用いた処理方法について検討した．その結果，分散分析表における F 値では補正を施すことにより，正確なデータにより得られる F 値により近似できることが明らかとなった．また，検定結果のタイプから，補正を施すことにより検定結果を誤る可能性を低くできることも明らかとなった．したがって，多くの場合は補正を施さなくても検定結果に誤りはないが，検定に用いる F 値の精度も考えれば，ファジィ区間データを処理する場合には 3 で述べた補正量を用いるべきであると考えられる．

参考文献

[1] 奥田, 古殿, 浅居: ファジィ観測データに基づく統計的推定, 計測自動制御学会論文集, Vol. 26, No. 5, pp.564–571 (1990)

[2] 小西, 奥田, 浅居: モーメント補正によるファジィ区間データからの一元配置分散分析, 第 16 回 FSS 講演論文集, pp.529–532 (2000)

[3] 小西, 奥田, 古殿, 浅居: AIC によるファジィ区間データからの統計的モデル選択, 日本ファジィ学会誌, Vol. 8, No. 4, pp.706–719 (1996)

[連絡先]

〒 724-0695 広島県賀茂郡黒瀬町学園台 555-36
広島国際大学 医療福祉学部 医療経営学科
小西 幹彦
TEL : 0823-70-4648, FAX : 0823-70-4612
E-mail : m-konisi@hw.hirokoku-u.ac.jp

SOMによる株式投資銘柄選定とファジィ推論による最適資産分配法の実データへの適用

An Application to the Actual Data of the Equity-Investment Brands Selection Based on SOM and Optimum Asset Allocation by Fuzzy Reasonings

○中岡　伊織
Iori Nakaoka
立命館大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering
Ritsumeikan University

谷　久壹朗
Kyuichirou Tani
立命館大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering
Ritsumeikan University

亀井　且有
Katsuari Kamei
立命館大学理工学部
Computer Science
Ritsumeikan University

Abstract A portfolio has been calculated a rate of expected earnings and a risk based on changes of a stock price. However, only performed past analyses and no consideration of corporate performances which must be a factor of stock price changes are a big problem for determination of a future equity-investment. This paper describes a new decision support system helping actual investments. First, equity-investment brand selection is performed using SOM (Self-Organizing Maps). Second, an asset allocation to nonrisk / risk assets is optimized using both the management indices of the selected brands and fuzzy reasonings. Third, we apply this technology to real stock price data and show the better results than those by TOPIX. Finally, we discuss the robustness of the proposed system to the steep fall in stock prices such as IT Bubble in 2000 and later.

1　はじめに

投資効率を調べる手法としてH.M.Markowitzが提案したポートフォリオ・セレクションがある [1, 2]．これは証券への分散投資手法の原点であり，その手法は各証券に対する収益率時系列をもとに意思決定者の希求する目標期待収益率に対して最小リスク（最小分散）を実現する各証券への投資比率を求める数理的手法である [3]．しかしながら，従来提案されてきた手法では過去の分析としてしか使用できず，実際にこの先にどういった銘柄に投資すれば良いかといった意思決定支援を行うことができないこと，および株価変動の一要因と考えられている企業業績や業界動向がまったく考慮されていないことが大きな問題となっている．さらに，景気動向の変化によりバブル経済が崩壊した場合に，その関連銘柄のみに投資した場合は大きな損失となってしまう点も問題としてあげられる．これらの対策としては，より良い経営状況にある銘柄を選定し，かつ同じような状況にある銘柄を選定せず，幅広い銘柄選定を行うことが求められている．

一方，良い状況にある銘柄を選定しても株式のみの投資ではリスクが大きくなってしまう．その対処法として，さまざまなものに投資することによりリスクを軽減しようとする資産分配という考え方がある．一般にその資産分配は，国債や公社債などに代表される無リスク資産，株式に代表される有リスク資産，海外への投資や不動産・貴金属への投資等がある [4]．従来より資産分配法としてさまざまな手法が提案されているが [5]，銘柄選定と同様に過去のデータによる分析しか出来ず，実際にこの先どのように分配すれば良いかといった指針にすることは非常に難しいという欠点が存在している [4]．また，代表的な手法として，各資産への分配比を株式ではTOPIXや日経300インデックスを，債券では国債指標銘柄やさまざまなインデックスを用いて求めた後，それぞれを個別銘柄に振り分ける手法があるが，それでは個別銘柄の選択の効果が現れる余地は全くなくなるという問題が生じる [5]．

本研究では，まず，有リスク資産の投資銘柄選定法として，クラス分けによく用いられるSOM（自己組織化マップ）[6, 7] を用いた手法を提案する．次に，有リスク/無リスク資産分配法としてSOMにより選定された銘柄の経営指標を用いてファジィ推論により，選定銘柄に応じて分配比が最適化される手法を提案する．さらに，過去の実際の株価データおよび国債利率を用いて本提案手法による資産運用を行い，TOPIXによる運用よ

り高い受取額が得られることを示す．最後に，IT バブルのような株価急変に対する本手法のロバスト性についても検討する．

2 経営指標の正規化

本研究では投資銘柄の選定や資産分配比率を求める手法を提案するが，そのためのデータ前処理として安定性・収益性における各指標のデータを［0,1］に変換する手法について述べる．従来，各指標の値を別の値に変換して総合評価する手法は提案されているが [8]，線形で設定されていることが多く，細かく設定できないといった問題があった．そこで本研究では，シグモイド関数に代表される指数関数を用いることにより連続的かつ人間の経験的評価を表現することにした．各経営指標において日経経営指標の付録などより個々に関数を設けた．本研究ではその関数のことを正規化指標関数と呼び，式 (1) でその一般形を与える．

$$s_{ij}^k \ , \ p_{ij}^k = \frac{a_k}{1+\exp\frac{-(x_k-c_k)}{d_k}} - b_k \qquad (1)$$

ただし s_{ij}^k , p_{ij}^k はそれぞれ安定性指標および収益性指標における年 i，選定銘柄 j の指標 k の正規化指標値とする．

3 SOM による銘柄選定

本研究では，SOM を用いて株式投資銘柄の選定を行う．その理由として，投資家は分散化投資によって危険性を避け安定性を高めようとするが，同じような状況・状態にある銘柄を選んでしまうことが多銘柄を投資する際には必然的にあり得るためである．その場合，状況によっては経営状況・株価が両銘柄共に下降してしまう可能性があり，効率よく分散化投資ができなくなる．そこで本研究では，SOM を用いることにより安定性・収益性の観点から同じような特徴を持つ銘柄を選ばず，分散化投資する手法を提案する．入力には日経経営指標 [9] から 25 業種・75 銘柄のデータを採用した．75 銘柄は過去の株価などは全く考えず適当に選択した．最近の不況下では企業の合併や倒産などが起こる事が想定されるため，入力銘柄は途中で変更してもよいことにした．また，業界動向の観点も共に判断するため業界平均のデータも SOM への入力に含めた．そして，データの規模・単位を正規化指標関数を用いて正規化し，SOM への入力とした．安定性・収益性から上位 10 銘柄を選定することにするが，その際のランク付けは各指標とも同じ

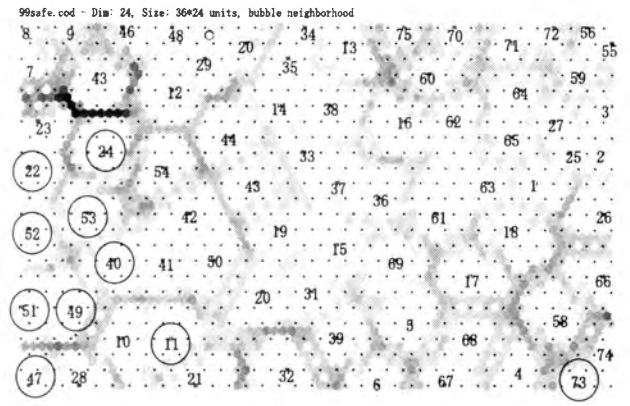


Fig. 1 A result by SOM in the stability analysis in 1999.

重み付けをし，安定性分析においては安定性指標の平均で，収益性分析においては収益性指標の平均にもとづいて行った．また，安定性指標における自己金融比率は企業によって公開していない場合があるため除き，安定性 12 指標・収益性 14 指標を入力に用いた．1999 年の安定性分析の結果の SOM 出力例を Fig. 1 に示す．図中における数字は各銘柄を表す．図中において，1 位にランクされた銘柄は「22」であり，2 位は「23」となった．しかし，銘柄「23」は銘柄「22」と同じ明るい領域に属しているため，銘柄「22」と同じような性質を持つと考えられ，分散化投資の対象とはしていない．このような分析を続け，最終的に選定された銘柄は図中○印で囲まれた銘柄となった．次に，収益性分析についても安定性分析と同様の分析により銘柄選定を行った．

4 有リスク/無リスク資産の資産分配法

資産分配においては，株式投資に代表される有リスク資産への資産分配のみでなく，国債などの無リスクへの資産分配も重要であり，その分配比に関する研究も報告されている [10, 11]．有リスク/無リスク資産分配の重要性は，「ポートフォリオ全体の収益率変動の 90%以上が政策的資産配分によって説明される」[12] とあることからも明らかである．本研究では，SOM により選定された銘柄の経営指標および国債の利率にもとづいて有リスク/無リスク資産分配比をファジィ推論をすることにより，高度な安全性と高い受取利益を得るための最適投資システムの構築を試みる．ここで，安定性とは企業の経営状態を示すものであり，株価の値動きが少ないという意味ではない．また，安定性が高いから株式投資で必ず儲かるというものでもない．本研究では，ファジィ推

論への入力変数としてSOMにより選定された銘柄における安定性平均値 $\bar{s}$，収益性平均値 $\bar{p}$，安定性分散 σ_s^2，収益性分散 σ_p^2・国債利率 b [%] を用い，簡略化ファジィ推論 [13] により，有リスク/無リスク資産の資産分配比 (有リスク分配率 r) を求める．式 (2)〜(5) に各変数の定義を示す．

$$\bar{s} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{k=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} s_j^k \tag{2}$$

$$\bar{p} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{k=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} p_j^k \tag{3}$$

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} (\frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} s_j^k - \bar{s})^2 \tag{4}$$

$$\sigma_p^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} (\frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} p_j^k - \bar{p})^2 \tag{5}$$

ただし，

s_j^k , p_j^k ：選定銘柄 j の指標 k の正規化指標値

m ：選定銘柄数

n ：各指標数.

ファジィ集合は，$\bar{s}$, $\bar{p}$に対しては,[0,1] で均等の 5 分割，σ_s^2, σ_p^2 に対してはそれほど細かく見る必要は無いため,$[0, \sigma_{\max}^2]$ で均等の 3 分割，b に対しては [0,3][%] で均等の 5 分割とした．ただし，$\sigma_{\max}^2$ は理論上考えられる σ_s^2, σ_p^2 の最大値を表し，本論文では $\sigma_{\max}^2$=0.25 となる．具体的なファジィルール例を式 (6) に示す．Fig. 2 に 1993 年から 2000 年までの有リスク分配率のファジィ推論結果を示す．

$$\begin{aligned} R^1 \ \text{If} \ \bar{s} \ \text{is} \ Verybad \ \text{and} \ \sigma_s^2 \ \text{is} \ Bad \\ \text{and} \ \bar{p} \ \text{is} \ Verybad \ \text{and} \ \sigma_p^2 \ \text{is} \ Bad \\ \text{and} \ b \ \text{is} \ Verygood \ \text{then} \ r \ \text{is} \ Verybad \end{aligned} \tag{6}$$

5 実データによる資産運用シミュレーション

本研究では経営指標を用いているが実際に発表されるまでに時間がかかるため，3 月 31 日までの経営指標を用い，翌年の 4 月 1 日に投資するとした。株価データにおいては投資開始は各該当年の 4 月の始値を，投資終了は 3 月の終値を採用するとともに，投資期間は 1 年とした．また過去においてどのように投資するかという問題ではなく，実際に将来への投資を目的としているが，その際の株式の分散化投資の設定は非常に難しい問題である．したがって，その株式の分散化投資割合や杉田ら [14] が提案したような購入単位・株数・株単価は考慮せず，全 10 銘柄を均等に投資すると設定した．また, 元本は 1000 万円，空売りはなしとした．投資終了時の総受取額 R_i[万円] を式 (7) に示す．

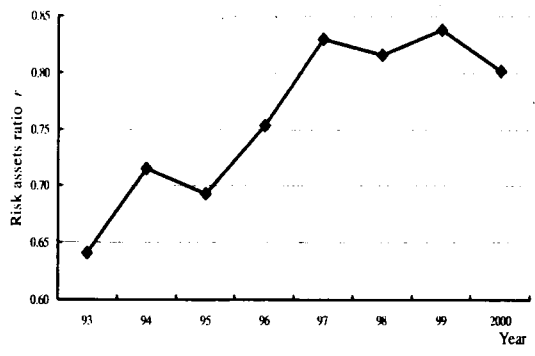


Fig. 2 Reasoning results of risk assets ratio r .

$$R_i = M\{(1-r) \times (1 + r_i^{nonrisk}) + r \times (1 + r_i^{risk})\} \tag{7}$$

ただし，

R_i ：年 i に投資した際の総受取額

M ：投資元本 (1000 万円)

r ：ファジィ推論による有リスク資産への投資率

$r_i^{nonrisk}$ ： 年 i における無リスク資産の利率

r_i^{risk} ： 年 i における有リスク資産の利率.

例えば i = 1994 で安定性分析の利率を用いたとき，本提案手法による分配投資結果は R_i=898.56 万円の受取となり，101.43 万円の損失となった．一方，株式だけに投資していた場合では，54.6 万円の損失となり，有リスク/無リスク分配投資を行った結果，損失を半減させ最小限に食い止めることができた．95 年以降に投資した結果を TOPIX に投資した結果と共に Fig. 3 に示す．ただし，安定性分析を用いて株式だけに元本の 1000 万円投資した結果を SR(Stability Analysis and Risk Investment)，同様に収益性分析を用いた結果を PR(Profitability Analysis and Risk Investment)，安定性分析を用いて分配投資をした結果を SA(Stability Analysis and Allocated Investment)，同様に収益性分析を用いて分配投資した結果を PA(Profitability Analysis and Allocated Investment) で表している．また，93 年に投資して 94 年に受取った額を全額 94 年に投資するというような累積投資を行った結果の受取額を Table 1 に示す．結果としてほとんどの年で提案手法による受取額が TOPIX を上回っているが，2000 年受取時のみ TOPIX に大きく負け越している．その要因として，IT（ネット）バブルによる株

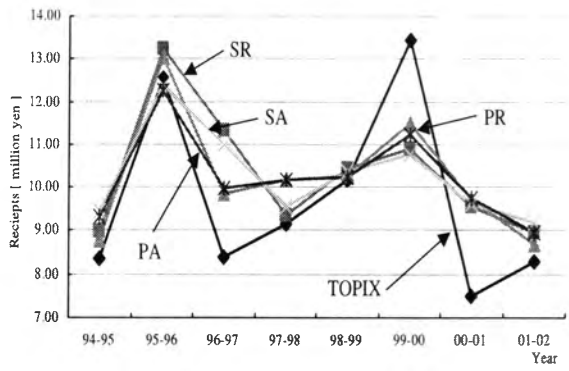


Fig. 3 Receipts.

Table 1 A receipt result in accumulated investment for 8 years (Principal is 10 mil.yen)

Investment methods		Reciepts [mil.yen]
	TOPIX	6.8039
Risk Investment	Stability	12.2153
	Profitability	11.3697
Allocation Investment	Stability	12.0628
	Profitability	11.5812

価の高騰が考えられる．しかし，バブル崩壊後 TOPIX のように大きく損失を出していないことより，提案手法による投資にはロバスト性があると言える．また累積投資においては，TOPIX では大きく損失を出しているのに対して，提案手法は利益を出しており有用性があると考えられる．

6 おわりに

本研究では，SOM を用いて株式投資銘柄の選定を行い，またその選定銘柄によって投資割合が最適化されるシステムの構築を行った．総合的な結果として株式投資により損失を出す場合があるが，全手法のほぼ全ての年において TOPIX に投資した場合と比較して高い受取が得られたことが特徴としてあげられる．また，2000 年以降の投資機会において，IT バブル崩壊による落ち込みが提案手法は抑えられ，ロバストな投資を行えている点もあげることができる．その理由として，本研究では多業種・多銘柄を入力として用いたこと，および SOM を用いて同じような銘柄を選ばないようにしたことにより株価が下がる要因を持った銘柄を多く選択しなかったことがあげられる．多い受取やロバストな投資を行える本提案手法は非常に有用であると言える．今後の課題としては，動的データへ対応ができるシステムの構築をしていくとともに，投資銘柄数も投資機会ごとに最適化されるシステムの構築を行っていきたいと考えている．

参考文献

[1] H.M.Markowitz : Mean-Variance Analysis in Portfolio Choice and Capital Markets, Basil Blackwell (1987)

[2] H.M.Markowitz : Portfolio Selection : Efficient Diversification of Investments, Second Edition, Basil Blackwell (1991)

[3] 水沼，和多田：ファジィ・ポートフォリオセレクション－意思決定者の希求水準の実現；システム制御情報学会論文誌，vol. 8, no. 12, pp. 677–684 (1995)

[4] 津村，若杉，榊原，青山（日本証券アナリスト（編））：証券投資論，日本経済新聞社 (1991)

[5] 今野：理財工学 I －平均・分散モデルとその拡張－，日科技連出版社 (1995)

[6] 徳高，岸田，藤村：自己組織化マップの応用，海文堂 (1999)

[7] G. Deboeck, T. Kohonen：金融・経済問題における可視化情報探索-自己組織化マップの応用-，シュプリンガー・フェアラーク東京 (1999)

[8] 森田：ビジネス・ゼミナール 経営分析入門，日本経済新聞社 (1990)

[9] 日本経済新聞社：日経経営指標，日本経済新聞社 (1994-2001)

[10] 中岡，亀井，金子：ニューロ・ファジィによる最適ポートフォリオ設計の一試み；第 46 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集，pp. 233–234 (2002)

[11] 中岡，亀井，金子：ニューロ・ファジィによる無リスク／有リスク資産の投資割合の最適化；第 18 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp. 397–400 (2002)

[12] Brinson, G. P., Hood, L. R. and Beebower, G. L. : Determinants of Portfolio Performance, *Financial Analysts Journal* 43 (1987)

[13] 坂和，馬野，大里：ソフトコンピューティング用語集，朝倉書店 (1996)

[14] 杉田，渡辺，和多田：運用可能資金を考慮したポートフォリオ選択問題の構成；第 18 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp. 387–388 (2002)

[連絡先]
住所 : 〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1
立命館大学理工学部情報学科亀井研究室
Tel : 077-561-2807
Fax : 077-561-2861
e-mail : nakaoka@spice.cs.ritsumei.ac.jp

ショケ積分による社会シミュレーション
A Social Simulation Model using Choquet Integral

高萩栄一郎 (Eiichiro TAKAHAGI)
専修大学 (SENSHU University)

Abstract– We propose Choquet integral type utility function and reserch the properties. Using the utility functions, we make a primitive social simulation model and get many interesting phenomenon such as a occurrence of merchants.

Keywords– Fuzzy Measure, Choquet Integral, Multiagents Simulation, Utility function, Merchant

1 はじめに

Choqet 積分型の効用関数を使い，多主体 (Multiagent) 社会シミュレーションを行った．Choqet 積分型の効用関数は，リスク解析の理論的な分野では多く使われているが，通常の財の分析やシミュレーションの中で使われた例は少ないように思われる．本稿では，Choqet 積分型の効用関数について，考察し，実際にシミュレーションを行った例を示す．

2 ショケ積分型 Agent

2.1 Agent の意思決定に Choquet 積分を利用

本論文では，Agent の意思決定にファジィ積分（主に Choquet 積分）を用いる場合を考察する．多主体モデルでは，さまざまな意思決定関数が用いられているが，Choquet 積分型の利点を挙げる．

Choquet 積分は，加重和，最大値，平均値，論理式など，人間が普段使うさまざまな関数を表現できる．また，それらのパラメータをいじることにより，それらの中間の関数を表現できる．逆に，学習などなんらかの方法で，ファジィ測度を同定した場合，そのファジィ測度を解釈することも可能である．

ファジィ積分は入力値間の相互作用を表現できるものである．したがって，他の Agent の情報などのさまざまな情報（＝入力値）の相互作用を考えた意思決定が可能になる．その相互作用を表現したものがファジィ測度である．ただし，ファジィ積分は，あくまでも個々の主体の入力値間の相互作用を表現できるものであり，システム全体の相互作用を直接引き起こすものではない．表現をかえれば，ファジィ積分は，間接的にシステム全体の相互作用を引き起こすものである．

2.2 Choquet 積分型効用関数

主体の意思決定の基であり，主体のさまざまな「感性」を表現する効用関数に Choquet 積分を利用した．

効用関数は，財の所有に関する効用を計算するのに用いている．財は A〜E の 5 財あり，効用関数は，個々の所有量から 5 財全体の効用を計算するものである．

「人はバランスをとって財を所有することを望ましいと考えている」という仮説をたて，それを基にモデル化している．バランスを取って所有することが望ましいということは，たとえば，A 財だけを 1000 所有する効用と B 財だけを 1000 所有する効用が同じ場合，A 財と B 財を 500 づつ所有するほうが効用が高いことを意味する．式で表せば，効用関数 $u(x_1, x_2)$(x_1 を A 財，x_2 を B 財の所有量) とすると，

$$\begin{aligned} &u(1000, 0) = u(0, 1000) \text{ ならば} \\ &u(500, 500) > u(1000, 0) = u(0, 1000) \end{aligned} \tag{1}$$

という補完的な関係になる．補完的とは，A 財の所有と B 財の所有が互いに補完し，より大きな効用になっていることを示している．これが，財 A と B の相互作用になっており，後に示すシミュレーションでさまざまな現象を引き起こす．式 (1) は，ファジィ測度の優加法性に対応しており，優加法的な関係を表している．

効用関数は，仮説に基づき，優加法的なファジィ測度を使った Choquet 積分で表現する．しかし，ファジィ測度のパラメータは，5 財の場合，$2^5 - 2 = 30$ 個と多い．そこで，ϕ_s 変換（塚本 [1]) を使った最大値と最小値の中間の評価法 [4] を使う．この評価法は，各財の重要度（嗜好，5 財の場合，実質 4 個）と ξ(1 個) からファジィ測度を求める．ξ は，バランスをどれくらい取るかの指標であり，図 1 のように，0 に近いほど補完的（バランスを求める）である．$\xi = 0$ であると，一番少なく所有した財の数量で決まる．$\xi = 0.5$ で，各財への重要度とする加重平均となる．0.5 を越えると，代替的な効用関数となる，

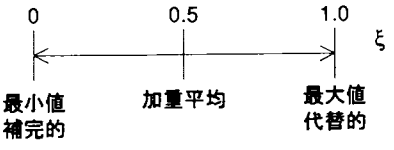


図 1: ξ の意味

§3 のシミュレーションでは，嗜好 $w_A, w_B, \ldots, w_E$ の値は，各 Agent ごとに，0 と 1 の範囲で，和が 1 になるように乱数で与える．また，ξ は，0.05 から 0.1 の範囲で乱数で与えてい

る．しかし，ξ の値は，その Agent の財の保有状況によって異なると考え，財の総保有量に依存するするようにした (図 2).

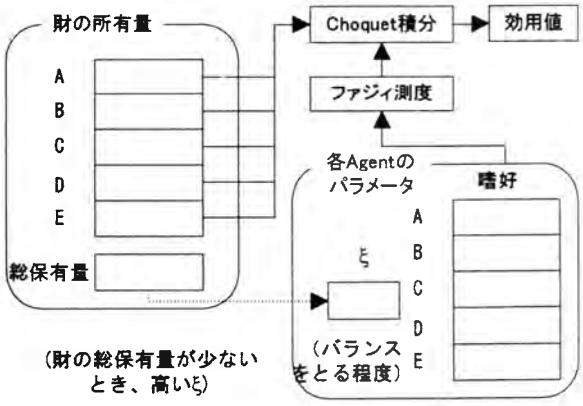


図 2: 効用関数

財の総保有量が一定値 (α) 以下の場合: この場合，$\xi = 0.5$ として，まったくバランスを求めず，財の総量により効用値が決まるようにした[*1].

財の総保有量が一定値 (β) 以上の場合: この場合，初期に乱数で与えた ξ を使う.

財の総保有量が，α と β の中間の場合: ξ の値は，初期に乱数で与えた ξ と 0.5 の中間で，α と β の間で按分した ξ を使う.

したがって，効用関数の値は，違う Agent 間では比較することはできない．また，同じ Agent であっても，総保有量が異なる場合，異なる時点間では総保有量が異なり，したがって ξ も異なり，公用値を比較できない．しかし，実際の意思決定では，意思決定前の各財の保有量による効用値と意思決定後の総保有量による効用値を比較して，その意思決定の良否を検討する．その場合，それぞれの ξ で計算すると比較不可能になるので，意思決定前の ξ を利用する．これは，ξ が，現在の状況により決まるものであり，その状況のもとで，意思決定後の効用を考えるものとして，モデル化している.

2.3 Choquet 積分型効用関数の性質

$0 < \xi < 0.5$ であれば，効用関数は，逓減する．図 3 は，$\xi = 0.2$ で，$w_A = 0.1, w_B = 0.3, w_C = 0.2, w_D = 0.4$ でファジィ測度を求め，$h(A) = 60, h(B) = 70, h(D) = 40, h(E) = 10$ に固定して，$h(C)$ を 0 から 100 まで変化させたものである．効用関数は，区分線型になり，各屈折点は，C 財以外の所有量である.

この性質により，希少な財 (この例では財 E) に対して，高い需要が起こり，相対的に高い価格であっても交換を行おうとするインセンティブが起こる.

[*1] 正しくは，財の嗜好を重みとする加重和により効用値が決まる．したがって，単純に総量ではなく，好みの加重和である．しかし，生産の困難な財は，生産性が低いのであまり生産されず，取引のおいては高価格で取引されるので，実際には，総量を増大させる意思決定が多くなる.

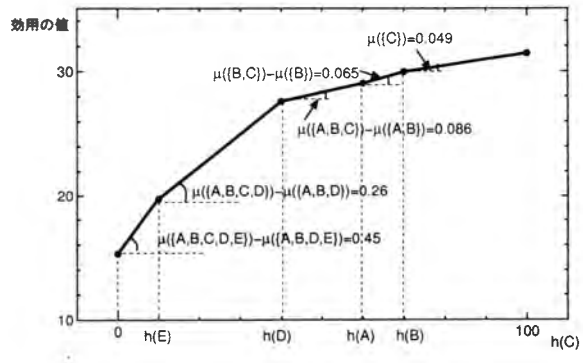


図 3: 財 C の効用関数

3 シミュレーションの概要

図 4 のように，原始社会（単純化した社会）を想定する．登場する Agent は，500 で，すべて同質の Agent である．Agent の違いは，乱数で割り当てたパラメータの違いのみであり，生産者，消費者，商人といった役割をあらかじめ設定したものではない．各 Agent は，1 日を 1 期として行動し，毎日，生産か行動のどちらか行い，また毎日消費を行う.

図 4: 単純化した社会

財は，5 種類あり，各財の特徴は表 1 に示す．生産の困難度は，数値が小さければ小さいほど困難であることを示す．A と B のどちらかは，全 Agent が生産可能で，また各 Agent は C,D,E のどれかを生産可能である．下記に，概略を記すが，くわしくは [5] を参照していただきたい.

3.1 生産

生産行うか交換を行うかの意思決定は，生産できる財 (2-3 財) から，過去の意思決定によりどれくらい良い思いをしたか (意思決定日の効用と（10 日後の所有量＋ 10 日間の消費量）の効用との差）から行動確率を定め，乱数で決定する．たとえば，生産を行うと意思決定をし，生産を行ったとき，10 日後にどれくらい効用が上がっているかでその良し悪しを判断すると

表 1: 各財の特徴

財	生産の困難度	生産できる Agent
A	120	2/3 の Agent
B	110	2/3 の Agent
C	40	1/3 の Agent
D	20	1/3 の Agent
E	10	1/3 の Agent

する．また，古い意思決定の重みを低くすることにより，忘却するように設定している．

また，生産を行うと意思決定をした後，どの財を生産するかも同様に，過去の意思決定による行動確率を求め，乱数で決定している．

3.2 消費

各 Agent は，毎期同量の消費をおこう．これは，消費できる量は同じであり，豊かさはその質であることをモデル化している．すなわち，多数の財を自分の嗜好に合わせてバランスよく消費できることが豊かであるとしている．たとえ，多量に消費しても生活の質には影響を与えないという前提である．各財の消費する割合は，その Agent の財の保有量に比例して行われる．

3.3 交換

交換は，交換しようと意思決定した Agent 同士で行われる．想定される社会は，市場 (交換の場) をもち，その日交換を行おうと意思決定した Agent が集まる．次のステップで，取引を行う．

1. 適当な 2 人の Agent が市場で出会う．
2. 両者それぞれ保有する財から交換する財を決める (乱数).
3. もし，両者ともに同じ財であれば交換は不成立
4. それぞれ保有量の範囲内で，適当な交換量を定める（乱数).
5. 仮に，交換が成立したと仮定し，両者ともに交換後の効用関数の値を計算し，ともに，交換前と比べ交換後の効用関数の値が上昇していれば交換は成立
6. 仮定した交換に不満足な Agent は，自分の交換量を減少させる（乱数）
7. もし，片方の Agent の交換量が一定量 (10) 以下になった場合，交換は不成立.
8. 5. にもどる.

交換を意思決定した Agent は，このプロセスを一定回 (平均 500 回) 繰り返す．

このプロセスでは，各 Agent は価格情報はきわめて限定的である．すなわち，自分の提供する財はいつも高い交換比率 (高価格) で取引されるから，高い交換比率で交換でないと交換しないということはない．あくまでも，各 Agent が，そのときの自分の効用が上昇すれば，すなわち，その取引に満足すれば交換を行うのである．

表 2: $t = 10000$ での相対価格

	B	C	D	E
A	1.26	3.87	6.43	13.66
B		3.29	5.51	11.62
C			1.69	3.43
D				1.96

すべての Agent と交渉し，完全な情報を仕入れ，どの Agent とどの財をいくつ交換するような最適化計算を行っていない．また，せり人がいて，すべての財の交換比率を提示してせりを行うような完全な市場も想定していない．また，財 A と B の交換比率はこれくらいという相場という漠然とした情報もない．情報は，自分の財の保有量と効用の変化と交渉の中でわかる相手が満足する交換比率のみであり，きわめて限られた情報のみで交換に関する意思決定を行っている．

4 シミュレーション結果

4.1 生産量、財の総保有量

図 5 は，生産量の推移である．一見すると生産量は平衡状態になり，均衡しているように見える．しかし，図 6 をみると，A 財,B 財の総保有量は増大し続け，超過供給の状態にある．

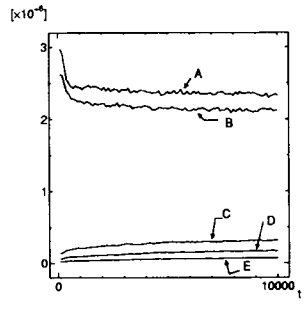


図 5: 生産量の推移

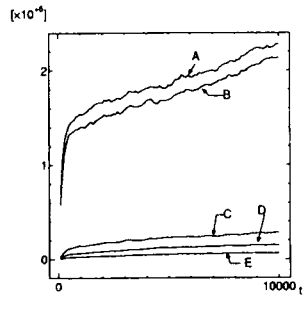


図 6: 総存在量の推移

4.2 価格の推移

表 2 は，9000〜10000 期の取引での相対価格である．1.26 は，A を 1.26 に対して B を 1 で交換されていることを示している．A 財を基準にした相対価格と他の財間は，整合性がとれている．たとえば，C と D の間で，A 財を基準にした間接的に求められる相対価格は，$\frac{3.87}{1.26} = 3.07$ であり，直接では，3.29 と近い値である．したがって，整合的に価格が形成されていると言える．ただし，相対価格では，平均して ±35% 程度のぶれがあり，個々の取引では，取引関係により差異がある．

4.3 商人の発生

シミュレーションを続けていくと，取引活動を中心に行う Agent が現れる．図 7 は，各 Agent の交換に出る確率の分布であり，0.5 以上の Agent を仮に商人と呼び，取引による利益率を計算すると，表 3 のようになり，各財間の取引で 5〜10%の利益（往復で 10〜20%の利益）を得ている．

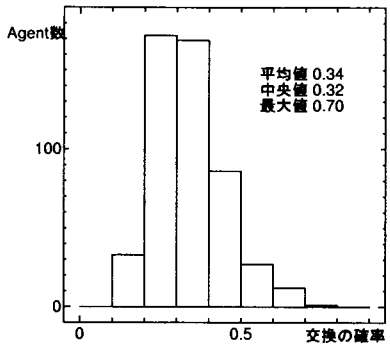


図 7: $t = 10000$ での取引に行く確率の分布

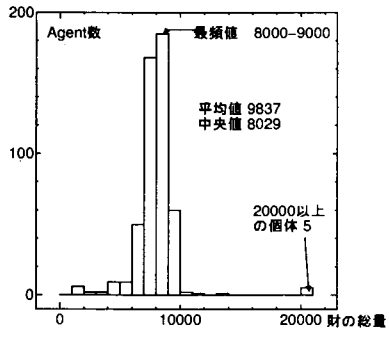


図 8: 財の所有量の分布 ($t = 10000$)

表 3: 商人 $\Longleftrightarrow$ 非商人間の取引の商人の利益率 (片道)

利益率	B	C	D	E
A	9.70%	8.66%	7.27%	4.37%
B		9.22%	6.54%	5.85%
C			10.75%	9.86%
D				8.76%

4.4 ルールの出現

もっとも交換にでる確率の高い商人 (X) の取引を観察すると，あるルールに則って行動しているようにみられる．表 4 の右上のような交換比率を中値とし，それ以上高ければ売却 (販売)，低ければ購入 (仕入) とするルールとすると，左下のような遵守率である．全取引では，約 90%の遵守率であり，単純化したルールで行動したとみることもできる．

しかし，Agent 毎にルールはかなり異なる．たとえば．取引に行く確率が最も低い (もっとも 0.5 に近い) Agent Y の A-B 間のルールは 1.37(遵守率 86%) である．

4.5 貧富の格差

図 8 は，財の所有量の分布で，上位 1%の Agent が全財の 69%を所有する社会であり，貧富の格差が大きい社会である．大富者 (上位 10Agent) の初期パラメータを調べると，ξ の値が高く，財 A,B への嗜好が高い．よって，富の蓄積の原因は節約である．また，貧富の格差を解消するために財産税をかけたシミュレーションも行った．結果は，[5] を参照いただきたい．

表 4: 商人 X の取引ルール (右上) とルール遵守率 (左下)

商人 X	A	B	C	D	E
A	*	1.24	4.31	5.41	12.89
B	85.99%	*	3.42	4.46	11.36
C	71.65%	84.89%	*	1.31	3.36
D	62.69%	61.63%	86.06%	*	2.64
E	58.42%	63.07%	75.93%	76.37%	*

5 おわりに

Choquet 積分型の Agent を作成し，実際に単純な社会のシミュレーションを行った．いろいろ，おもしろい結果を得たように思われる．今後は，[3] のように，ファジィ測度を学習する Agent について考えてみたい．

参考文献

[1] 塚本弥八郎，不確実性を伴う意思決定問題のファジィ測度論による分析，**講座ファジィ** *14* **ファジィ理論と人文社会科学**，日本ファジィ学会編，日刊工業新聞社，148-170，1994.

[2] Joshua M. Epstein and Robert Axtell, Growing Artificial Societies Social Science from the Bottom Up, Brookings Institution,1996 (邦訳：人工社会，共立出版,1999).

[3] 中村和男，鈴木泉，ショケ積分エージェント・ネットの学習的同定，**第** *15* **回ファジィシステムシンポジウム講演論文集**，日本ファジィ学会，pp.139-142，大阪,1999.

[4] 高萩栄一郎，重要度と λ による λ ファジィ測度の同定について，日本ファジィ学会誌,Vol. 12, No. 5,2000 .

[5] 高萩栄一郎，ショケ積分による原始社会シミュレーション，「吉田雅明編，専修大学社会科学研究所 社会科学研究叢書 5 『複雑系社会理論の新地平』」専修大学出版局，2003.

[6] 日本ファジィ学会評価問題研究会編集，「ファジィ評価：ファジィ測度とファジィ積分」科学技術出版 (2002 年出版予定)

[問い合わせ先]

〒214-8580 神奈川県川崎市多摩区東三田 2-1-1
専修大学商学部　高萩 栄一郎
TEL:044-900-7988 FAX:044-900-7849
e-mail:takahagi@isc.senshu-u.ac.jp

ファジィCS分析(その2)

Fuzzy CS Analysis(2)

塚本弥八郎
Yahachiro Tsukamoto
名城大学理工学部情報科学科
Dept. of Information Sciences, Faculty of Science and Technology, Meijo University

Abstract : The methodology of the Customer Satisfaction Survey and Analysis, developed mainly in the field of marketing research, was introduced for analyzing the raw data concerning the questionnaries on the lecture evaluation by students. This challenge aims at establishment of both the numerical and verbal evaluation method for getting the outcomes helpful to lecturers who face the task of assessing their lectures. The earlier paper (Tsukamoto [1]) on Fuzzy CS Analysis presented at Workshop on Heart and Mind was based on the data in the year 2001. The result in 2002 shows some improvement. Yet there remain crucial issues as expected. The main purposes of the present paper are to summarize the earlier studies, and to address issues to consider for the further study.

1 はじめに

学生による授業評価を,「教師の実力や能力をチェックするためのものではなく, 第一には, 高い授業料を払っている学生の授業満足度（到達度）をチェックし, 彼らの可能性を引き出す授業を実現するために, 教師が努力するための指標である.」(安岡 (1999)) のように捉えると, そこには, 企業における顧客満足度分析との類似性が見出される. 前回の報告では, CS 分析 (The Customer Satisfaction Survey and Analysis) での考え方を指針としながら, 学生による授業評価のアンケート結果の分析方法およびその表示の工夫を紹介した. 今回は実践後の反省から今後の考慮事項をいくつか紹介したい. まずは, 前回報告の梗概から示し. 3 節で昨年度との分析結果と比較を述べ、4 節で今後の考慮事項をまとめる.

2 既報告[1,3,4]の若干の説明

2.1 データの概要

以下に示す平成 13 年度前期の分析経過は、他方で, 平成 14 年度を展望してのシミュレーションという意味付けもあった. 評価項目は, 全部で 15 項目, たとえば, "話し方は明瞭で聞き取りやすかった." のように文で問われている.15 項目を略記して示すと 学習努力, 総合満足, 開始時間, 終了時間, 私語対応, 話し方, 板書, ポイント, 発言促進, 授業計画, 質問, 理解配慮, 内容理解, 意欲興味, 熱意誠意. 対象サンプル数は 73,686, また最終的な対象科目数は 10 人未満の授業を除いた 1,408 である. 全体の頻度数はこれに評価項目数の 13 を掛けて得られる 18,303（若干の欠損値あり）である.

五段階評定の数量化を基本的に「順位のあるカテゴリの数量化」の方法で行ったが, 紙面の都合上詳細は (田中 [6], 塚本 [1]) を参照頂ければ幸いである.

2.2 項目別改善要求度の導出

各科目について, 評価項目別に改善要求度という指標を算出し、それに基づいて改善ポイントをグラフや言葉で指摘するシステムを構築した.

不満度：理論的背景として, ファジィ基数の適用を考え, シグマカウントの全体数に対する比率で, 各科目について評価項目別「不満度」を定義した.

影響度：CS 分析の目的は総合満足を高める改善項目の指摘である. 第 2 項目は,「授業は総合的に満足のいくものであった.」であるが, この評価を少しでも高めたいというのが, さしあたりの目標である. 第 3 項目以下の 13 の項目の各々とのクロス集計に基づいて関連の深さを測る Cramer の V を

算出する.

$$r = \sqrt{\frac{\chi^2}{N(k-1)}} \qquad (1)$$

ただし, 分割表が $k \times k$, $k \geq 2$, データ数が N のときの指標で, 最大値が 1, 最小値が 0 である.

全学生について, 総合満足と他の項目のクロス集計から得られた関連度は以下のようである.

開始時間 (0.217), 終了時間 (0.210), 私語対応 (0.239), 話し方 (0.377), 板書 (0.304), ポイント (0.417), 発言促進 (0.295), 授業計画 (0.286), 質問 (0.306), 理解配慮 (0.398), 内容理解 (0.462), 意欲興味 (0.480), 熱意誠意 (0.410).

改善要求度の算出：ある質問項目について, 総合満足への影響度が高いほど, かつ, 上述した不満度が大きければ大きいほど, その項目についての改善が望まれる, という解釈に立って「改善要求度」という変量を影響度と不満度の積（後述 (3) 式）で定義した. これに基づいて各授業の項目別改善要求度が数値で得られる.

言語で改善ポイントの指示：以上までで, 改善要求度は数値で表されたが, 各科目について項目別にグラフ表示し, さらに全ての教官により分かりやすく言葉を用いて改善指針を示す. 以下のルールで簡単な言葉を自動発生させた.

1. if ～について改善要求度（数値）がとても大きい then "～ついて強く改善が要請されています."
2. if ～について改善要求度が大きい then "～について改善の必要があります."
3. if ～について改善要求度が少し大きい then "～について改善の余地があると思われます."
4. if （改善要求度）is less than 0.3 for the all items then "おおむね問題ないようです."

実際には, 約半分の項目について上記 1. 2. 3. のどれかのコメントを必要とした. このように言葉で指示された改善ポイン対して, さらに各教員のコメントが付与されて, 最終的に冊子が作られた.

3 １４年度の分析結果

平成 13 年度前期のデータの分析の結果と反省をを踏まえ, 今回は, 平成 14 年度通年・後期科目のデータについての分析出力を行った. できあがった冊子のページ数は約 1,500 である.

3.1 質問項目の変更

今回の質問項目は以下の 14 項目である. ただし, はじめの 11 項目は授業についての, 後の 3 項目は学生の受講態度についての質問で, 自己申告による評定である.

①時間厳守 (0.19), ②位置ずけ (0.45), ③板書 (0.33), ④話方明瞭 (0.40), ⑤私語対応 (0.29), ⑥ポイント (0.45), ⑦発言促進 (0.32), ⑧授業計画 (0.33), ⑨理解配慮 (0.45), ⑩興味工夫 (0.54), ⑪**総合満足**, ⑫学習努力, ⑬集中受講, ⑭欠席回数.

また, 五段階評定は数字を用いずに, a, b, c, d, e で行った.

3.2 影響度

前章で示した「総合満足」への「影響度」（大学全体のデータから求めたもの）が, すぐ前出の ( ) の中に示してある.

例えば,「総合満足」への「理解配慮」の「影響度」は 0.45 だが, この値から, 回答者全体の評価の傾向を見ると,「理解配慮」に対する評定が高いほど,「総合満足」に対する評価も高くなっているということが, 逆に,「理解配慮」に対する評定が低いほど,「総合満足」に対する評価も低くなっていることが傾向的に言える.

3.3 項目別不満度

「不満度」の意味は, たとえば「質問や発言を適宜促した」という質問項目について, 学生が「そうは思いません」という気持ちの程度を数量化して表示したものとして理解できる. まず, 大学全体のデータを使って,「順位のあるカテゴリーの数量化」の方法に基づき, 回答の a, b, c, d, e に付与した数値は以下のとおりである.

$$a: 0.0,\ b: 0.30,\ c: 0.54,\ d: 0.77,\ e: 1.0 \qquad (2)$$

回答者が e にマーク, すなわち,「全くそう思わない」と回答したときに 1, 逆に全員が「強くそう思う」と回答したときに 0 の値になる. その意味は,「そう思わない学生は挙手願います」の問いに, 目いっぱい挙手するもの, 半分ぐらい手を上げるもの, 少しだけ手を上げるものなど、値が大きいほど不満の程度が高いと理解できる. これらの数値を「不満である」のメンバーシップグレードとして捉え直し、そのファジィ集合のシグマカウントを考える。各項目ごとに五段階の回答についてのヒストグラムが与えられており, 頻度（比率）を加重パラメータとして, これら五つの数値の加重平均をとれば当該項目のクラス全体の平均的不満度を数値として算出することができる.

表 1: 改善要求度の頻度分布の比較

改善要求度	頻度（13年度前期）	頻度（14年度後期・通年）	
	回答者全員	回答者全員	意欲的学生
=0	16 (0.1%)	28 (0.2%)	518 (3.5%)
0～ 10	1557 (8.5%)	2038 (13.9%)	2996 (20.3%)
10～ 20	4225 (23.1%)	3703 (25.3%)	4785 (32.8%)
20～ 30	5050 (27.6%)	4439 (30.3%)	3858 (26.4%)
30～ 40	3874 (21.2%)	2746 (18.7%)	1676 (11.5%)
40～ 55	2766 (15.1%)	1441 (9.8%)	705 (4.8%)
55～	815 (4.5%)	262 (1.8%)	87 (0.6%)
合 計	18,303	14,657	14,595

3.4 改善要求度について

各科目の前出の 10 項目について,「改善要求度」を次式で算出する.

$$\text{改善要求度} = \frac{\text{影響度} \times \text{不満度}}{(\text{影響度の最大値})} \times 100 \quad (3)$$

基本的には, 改善要求度は影響度と不満度の積であるが, 考えられる要求度の最大値が 100 に, また, 最小値が 0 になるように規格化することにより見やすくしている.

3.5 改善ポイント

上述した改善要求度のグラフには, 三つの線が描かれており, ここでは情報処理上クリスプに, 数値が 55 を超える項目については, その項目に関して「非常に強く改善が要求されています」という表現が, また,40 を超え,55 以下の場合には,「改善が望まれています」, さらに,30 を超え,40 以下の場合には「改善の余地があると思われます」という言語的指示が出力されるようになっている. もし, すべての項目について, 改善要求度が 30 以下の場合には「特に改善すべき点は見あたりません」の表現が付与される.

これらの線引きの数値の決め方について. 実は, 前回の 13 年度前期のアンケート結果の「改善要求度の度数分布」で, すでにこれらの値を決めてあり, 今回はそれらの数値を, 変化を読み取るため, そのまま使った.

3.6 前回との比較

まず, 改善要求度のクラス化に基づく頻度分布表を表 1 に示す. ここでの頻度は基本的に科目数と質問項目数の積が全頻度で, それらの分布であることに注意する.

前回の対象科目数は 1408, 今回は質問項目数の減少があり, 頻度合計は 14,647. 表の読み方 :「=0」については, 要求度がまさに 0 の（全員が a に回答）頻度が 16 件あることを, また,2 行目は,「改善要求度が 0 を超え 10 以下の頻度が 1,557」のように読む.

前回については,「30 を超え,40 以下」の割合は全体の 20.6 %,「40 を超え 55 以下」の割合は約 14.6 %, さらに「55 を超える」割合は,4.2 %であった. 言語での改善要求が指示される項目数は全体の約 4 割. これが多すぎるのか少なすぎるのかの判断は困難で, アンケート調査の目的が「授業改善に役立てること」であることを考慮すると, まあ妥当なところではないかと判断した.

さて, 今回の調査における頻度分布との比較であるが,「30 を超え,40 以下」の割合は全体の 17.4 %,「40 を超え 55 以下」の割合は約 9.1 %, さらに「55 を超える」割合は,1.4 %となる. 今回の言語で改善要求が指示される項目数は, 全体の 3 割弱に当たる.

以上のことから, 改善指示項目数が一割強減少したこと, とくに 55 を超える割合が,4.2 %から 1.4 %に激減したことが見られ, あくまで学生から見ての授業評価だが, 改善がなされたと言ってよいだろう.

さらに,14 年度に関して,「意欲的学生」[1]の場合についての結果をまとめると以下のようになる.

「30 を超え,40 以下」の割合は全体の 10.3 %,「40 を超え 55 以下」の割合は約 4.3 %, さらに「55 を超える」割合は,0.5 %. 今回の言語で改善要求が指示される項目数は, 全体の 1 割 5 分に当たる.

このことは,「意欲的学生」のみによる不満の度合は, 回答者全員のそれよりかなり低くなると言って差し支

[1] このような処理を導入した理由は,「不真面目な学生の授業評価は聞くに値しない」といった類の意見が少なからず開陳されたから. そこで参考データとして不真面目な学生を除いた学生の回答のみで処理するとどうなるか, について出力してみた. 今回は学生の受講態度について三つの質問をしており,「意欲的学生」を以下のように定義した.「欠席回数が 2 回（通年 4 回）以下」かつ「学習努力」と「集中受講」の両者の質問について「ややそう思う」以上に回答した学生.

えない.

日常用語で用いられる「意欲的学生」という言葉は本来的にファジィで,今回のように2回までの欠席なら「意欲的」,3回以上は「意欲的でない」などのようにクリスプな境界があるわけではない.ここでの意欲的学生は,まず先にクリスプな定義があり,単にそのラベルとして使っている.

4 今後の考慮事項

過去3度にわたる学生による授業評価の分析の試みで,「本大学方式」が定着しつつある.しかしながら,かなり本質的かつ重要な問題点が残されている.以下,箇条書きで指摘したい.

1. 「良い授業」と「学生の満足度が高い授業」との乖離: 例えば,学生に好きなものだけ食べさせているとやがて栄養不良になる.「良い授業」とは何だろう? 教職員が思う授業品質の内容と学生が思うそれとの乖離をどのようにして埋めていけばよいのか?
2. 事実認識と価値(評価)の関連と区別:「多人数による評価点の分布が正規分布する」の仮定の下で,カテゴリカルデータの数量化を行った.ここまではとくに問題ない.しかし,この数値は,単に正規分布の仮定に基づいての数量化でその結果は本質的に事実認識にかかわるもの.これをもって評価値とする場合には,「相対評価」の考え方を背景に仮定したことになる.今回はそれを行った.ほんとうに「相対評価」で良かったのか?
   得られた正規分布はかなり右に歪んでいる.「ややそう思う」と「あまりそう思わない」とでは,前者が大きく,結果的には平均が右シフトして,「やや良い」ケースが過少評価されることになった.相対評価は,全員がレベルアップしてもその結果が反映されない評価法である.全体のレベルが上がっているのに何パーセントかが必ず「改善指示が出る」という相対評価に対して,現場の直感に合わせるには,「絶対評価」が要求される.では,このビッグなプロジェクトでの「絶対評価」の方法は?
3. 少人数授業とそうでない授業との間の質的な差:総合満足指標の順位をみると,上位14科目は100人以下の授業である.しかも,100(満点)という指標の授業は6科目あり,すべて15名以下の授業である.明らかに少人数とそうでない授業の間には質的な有意の差がある.
4. 学生サイドの問題:どの比較にも増して,明確な差が見られるのは,「意欲的学生」と「非意欲的学生」との差(当日示す)である.表1では回答者全員との比較しか見えないが,その差もすでに見えている.このことは端的に「学習意欲のないところに学習は成立しない」を裏づけるものとなっている.質問項目の中にも「興味意欲」があるが,意欲のない学生に対する適切な対応とは何か,この問の答えは単純ではない.
5. 質問項目を減らす: 何度もやらなければならないアンケート調査での学生の負担感を減少させ,回答時の集中力を維持させることは大事な問題である.相関分析や関連度分析をしたのだから,それらの結果を利用して,質問項目をさらに減らすことを考えるべき.7万余のレコードからクラスタあるいは含意関係を掘り出すデータマイニングを目下研究中である.

参考文献

[1] 塚本弥八郎:ファジィCS分析,日本ファジィ学会評価問題研究会,第7回あいまいな気持ちに挑むワークショップ講演論文集,pp.71-74(2002)

[2] 大村哲,小原智孝:「大学における授業評価の現状と展望」ー企業における顧客満足度調査との比較からー,大学教育学会第4回大会講演論文集,宮城大学(2002)

[3] 松本幸正,塚本弥八郎:学生による授業評価アンケート結果の分析手法 -授業改善の定量的評価手法の確立を目指して-,名城大学理工学部研究紀要,43号,pp.80-87(2002)

[4] 松本幸正,塚本弥八郎:CS分析の考え方を導入した授業評価アンケートの分析,名城大学総合研究所紀要,No. 8 (2003)

[5] 林知己夫:行動計量学序説,朝倉書店(1993)

[6] 田中良久:尺度構成法,心理学研究法第16巻,東京大学出版会(1973)

連絡先:塚本弥八郎
〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501
名城大学理工学部情報科学科
Tel: 052-832-1151 Ex. 5025
Fax: 052-832-1169
Email: tukamoto@ccmfs.meijo-u.ac.jp

ファジィノードファジィグラフとT－ノルム

Fuzzy Node Fuzzy Graph and T-Norms

上江洲　弘明	山下　元	須田　宏	金川　秀也
Hiroaki UESU	Hajime YAMASHITA	Hiroshi SUDA	Shuya KANAKAWA
早稲田大学	早稲田大学	慶応義塾大学	武蔵工業大学
Waseda University	Waseda University	Keio University	Musashi Institute of Technology

***Abstract** : T-Norm is important set operation concerning the fuzzy theory. In various aspects of affairs, T-Norm has been applied. In this paper, we discuss the connective structure of T-Norm families and explain about a fuzzy node fuzzy graph and its application.*

1. はじめに

ファジィノードファジィグラフはノードのファジィネスだけでなく，アークもファジィネスをもつグラフである．ファジィノードファジィグラフをT－ノルムを用いて解析するとき，各T－ノルムの持つ特徴をつかむことが必要である．T-ノルムはファジィ理論において重要なファジィ集合演算である．個々に独立したT-ノルムだけではなく，パラメータを介して表されるT-ノルム（T-ノルム族）は特に興味深い．本稿ではT-ノルムとファジィノードファジィグラフへの応用について述べる．

2. T－ノルム

T－ノルムは集合の積演算を抽象化した二項演算であり，以下のように定義される．

定義１　T－ノルム（Triangular Norm）は

$$p,q \in [0,1] \to T(p,q) \in [0,1]$$

となる二項演算で，次の条件をみたす．

(1) 可換性：$T(p,q) = T(q,p)$

(2) 結合律：$T(p,T(q,r)) = T(T(p,q),r)$

(3) 単調性：$p \leqq q, r \leqq s \Rightarrow T(p,r) \leqq T(q,s)$

(4) 境界条件：$T(p,0) = 0, T(p,1) = p$

代表的なT－ノルムには次のものがある．

(1) 代数積：$T_A(p,q) = p \times q$

(2) 論理積：$T_L(p,q) = p \wedge q$

(3) 多値的論理積（ルカシュビッツ）：

$$T_M(p,q) = (p+q-1) \vee 0$$

(4) 激烈積：$T_D(p,q) = \begin{cases} 0 & , p \vee q < 1 \\ p \wedge q & , p \vee q = 1 \end{cases}$

上記のT－ノルムはいずれも個別のT－ノルムであるが，これら以外に，パラメータを用いて表されるT－ノルムの族がある．これらの族をT－ノルム族という．

定義２　任意の$\lambda \in [a,b]$に対して，T_λがT－ノルムであるとき，$\{T_\lambda\}$をT_a, T_bをつなぐT－ノルム族であるという．

T－ノルム族には以下のものがある．

(1) Dombi

$$T_\lambda(p,q) = \frac{1}{1+\sqrt[\lambda]{((1-p)/p)^\lambda + ((1-q)/q)^\lambda}}, \lambda > 0$$

(2) Weber

$$T_\lambda(p,q) = \max(0, (1+\lambda)(p+q-1) - \lambda pq), \lambda \geqq -1$$

(3) Yager

$$T_\lambda(p,q) = 1 - \min(1, \sqrt[\lambda]{(1-p)^\lambda + (1-q)^\lambda}, \lambda > 0$$

(4) Hamacher

$$T_\lambda(p,q) = \frac{pq}{\lambda + (1-\lambda)(p+q-pq)}, \lambda \in [0,1]$$

(5) Schweizer (i)

$$T_\lambda(p,q) = \sqrt[\lambda]{\max(0, p^\lambda + q^\lambda - 1)}, \lambda > 0$$

(6) Schweizer (ii)

$$T_\lambda(p,q)=\frac{1}{\sqrt[\lambda]{1/p^\lambda+1/q^\lambda-1}},\lambda>0$$

(7) Schweizer (iii)

$$T_\lambda(p,q)=1-\sqrt[\lambda]{(1-p)^\lambda+(1-q)^\lambda-(1-p)^\lambda(1-q)^\lambda},\lambda>0$$

(8) Dubois

$$T_\lambda(p,q)=\frac{pq}{\max(p,q,\lambda)},\lambda\in[0,1]$$

(9) Frank

$$T_\lambda(p,q)=\log_\lambda\left[1+\frac{(\lambda^p-1)(\lambda^q-1)}{\lambda-1}\right],\lambda>0,\lambda\neq1$$

(10) 準論理積

$$T_\lambda(p,q)=\begin{cases}0 & ,p\vee q<1-\lambda\\ p\wedge q,p\vee q & \geqq1-\lambda\end{cases},\lambda\in[0,1]$$

T－ノルム族の連続，単調を以下のように定義する．

定義３　T－ノルム族$\{T_\lambda\}$が連続であるとは，$\varepsilon>0$，$\lambda\in[0,1]$，$(p,q)\in[0,1]^2$を任意に与えたとき，ある正数δが存在して，

$$\forall\mu\in[0,1]:|\lambda-\mu|<\delta\Rightarrow|T_\lambda(p,q)-T_\mu(p,q)|<\varepsilon$$

が成立することをいう．

定義４　T－ノルム族$\{T_\lambda\}$が単調であるとは，$T_\lambda(p,q)$がλについて単調であることをいう．

$\lambda\in[a,b]$上のT－ノルム族の長さ$\|T_\lambda\|_a^b$を以下の式で定義する．

定義５　T－ノルム族 $\{T_\lambda\}$，$a\leqq\lambda\leqq b$において，$a=\lambda_0<\lambda_1<\cdots<\lambda_{n-1}<\lambda_n=b$であるとする．

$$s(p,q)=\sup\sum_{i=1}^{n}\{(\lambda_i-\lambda_{i-1})^2+(T_{\lambda i}(p,q)-T_{\lambda i-1}(p,q))^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\|T_\lambda\|_a^b=\sup_{p,q}\frac{s(p,q)}{\{(b-a)^2+(T_b(p,q)-T_a(p,q))^2\}^{\frac{1}{2}}}$$

任意のT－ノルム族 $\{T_\lambda\}$，$a\leqq\lambda\leqq b$に対して，$\|T_\lambda\|_a^b\geqq1$が成立する．

T－ノルム族と$\|T_\lambda\|_a^b$の値はそれぞれ表１のようになっている．

表１　T-ノルム族と$\|T_\lambda\|_b^a$の値

T-ノルム族	$\|T_\lambda\|_b^a$	区間
①準論理積	1.41	[0, 1]
②Dubois	1.05	[0, 1]
③Weber	1.02	[-1, 0]
④Yager	1.99	(0, 1]
Hamacher	1.00	[0, 1]

また，T-ノルム族がつなぐ個々のT-ノルムは図１のようなグラフで表せる．

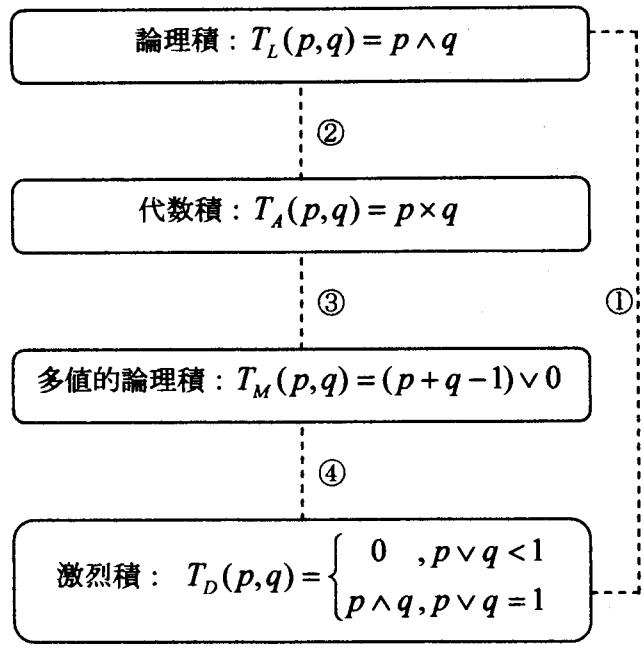


図１　T-ノルム族と個々のT-ノルムの関係

3. ソシオメトリー分析への応用

ソシオメトリー分析への応用として，高校生16人を対象に図２のアンケートを行なった．

次のそれぞれの場合に，同じグループになりたい人を順に書きなさい．

Q_1：グループ学習をするとき

Q_2：昼食を食べるとき

Q_3：スポーツをするとき

	1	2	3	…
Q_1				
Q_2				
Q_3				

図２　アンケート用紙

このアンケートの結果から，図3の応答行列ができる．

		1	2	3	4	5	合計
S1	Q1	4	2	3			8
	Q2	4	9				
	Q3	4	9	2			
S2	Q1	3	5	6	11		10
	Q2	5	6	9	11		
	Q3	5	4				
S3	Q1	8	7	9			11
	Q2	2	8	9	10		
	Q3	2	7	8	9		
S4	Q1	1	2	5	6		12
	Q2	1	2	5	6		
	Q3	1	2	5	6		
S5	Q1	4	2	11	6		9
	Q2	7	11	9			
	Q3	2	6				
S6	Q1	7	9	3			12
	Q2	3	4	9	11		
	Q3	4	5	2	11	7	
S7	Q1	8	3	9	10		7
	Q2	9					
	Q3	3	8				
S8	Q1	10	3	7			8
	Q2	10	3				
	Q3	10	3	9			
S9	Q1	3	10				6
	Q2	10					
	Q3	10	3	6			
S10	Q1	8	9				8
	Q2	9	8	7	3		
	Q3	8	9				
S11	Q1	3	2	5	7	6	14
	Q2	3	7	9	8		
	Q3	5	6	2	3	7	

図3　応答行列

この応答行列から図4のファジィ選好行列が計算できる．このファジィ選好行列がファジィグラフとなる．また，行列の右の数字はメンバーのファジィネスであり，メンバーのファジィネスはゲーム理論のシャプレイ値を応用して求めることができる．

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	1	0.33	0.11	1.00					0.44			0.52
2		1	0.33	0.22	0.89	0.33			0.11			0.85
3		0.67	1				0.44	0.67	0.22			1.00
4	1.00	0.67		1	0.33							0.87
5		0.56		0.33	1		0.33		0.11		0.33	0.73
6		0.11	0.44	0.56	0.22	1	0.33		0.33			0.17
7			0.56				1	0.56	0.44			0.35
8			0.67				0.11	1	0.11	1.00		0.93
9			0.56			0.11			1	0.89		0.68
10							0.11	0.89	0.78	1		0.92
11		0.33	0.67		0.44	0.22	0.22		0.11		1	0.20

図4　ファジィ選好行列

次にこれらから，ファジィノードファジィグラフを作る．ファジィノードファジィグラフは複雑なので，前述した方法でクリスプノードファジィグラフに変換する．その際，T－ノルム族にはDuboisのT－ノルム族を用い，$\lambda=0.7$とした．

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.52	0.25	0.08	0.52					0.33		
2		0.85	0.33	0.22	0.85	0.33			0.11		
3		0.67	1.00				0.44	0.67	0.22		
4	0.87	0.67		0.87	0.33						
5		0.56		0.33	0.73		0.33		0.11		0.33
6		0.03	0.11	0.14	0.06	0.17	0.08		0.08		
7			0.28				0.35	0.28	0.22		
8			0.67				0.11	0.93	0.11	0.93	
9			0.54			0.11			0.68	0.68	
10							0.11	0.89	0.78	0.92	
11		0.09	0.19		0.13	0.06	0.06		0.03		0.20

図5　クリスプノードファジィグラフ
(Dubois，$\lambda=0.7$)

さらにクリスプノードファジィグラフから図6の近似ファジィグラフが得られる．

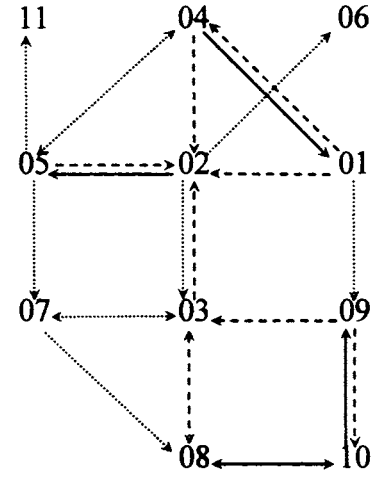


図6　近似ファジィグラフ

また，ファジィ選好行列から図7のファジィ友好行列が得られ，ファジィ友好行列から図8の分割樹形図Tが得られる．

近似ファジィグラフと分割樹形図Tから図9の近似ソシオグラムU^z（$z=0.67$，$\lambda=0.70$）が得られる．

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1			1.00							
2		1	0.44	0.33	0.68	0.17					
3		0.44	1				0.49	0.67	0.32		
4	1.00	0.33		1	0.33						
5		0.68		0.33	1						0.38
6		0.17				1			0.17		
7			0.49				1	0.19			
8			0.67				0.19	1		0.94	
9			0.32			0.17			1	0.83	
10								0.94	0.83	1	
11					0.38						1

図7　ファジィ友好行列

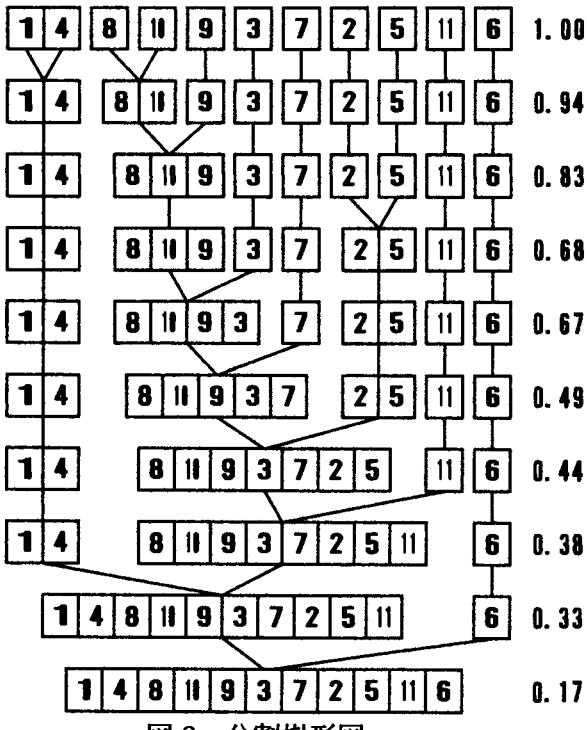


図8　分割樹形図

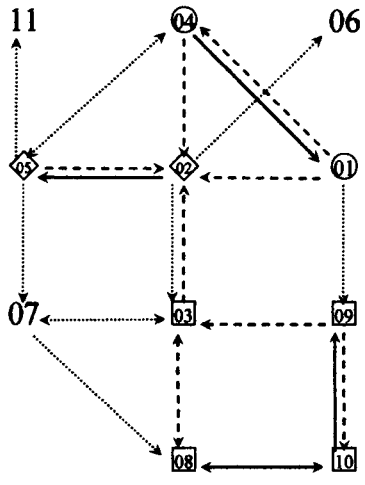


図9　近似ソシオグラム U^z

このソシオメトリー分析は，心理学観点，教育学観点から社会一般の集団構造等にも適用することができる．

今日，いじめや登校拒否などが深刻な教育問題となっているが，本分析法がその解決の一助となることを期待したい．

参考文献

[1] 西田，竹田：ファジィ集合とその応用，森北出版，1978.

[2] 山下，稲井田：ファジィ理論と応用，学文社，1997.

[3] Witold Pedrycz, Fernand Gomide : An Introduction to Fuzzy Sets, The MIT Press, 1998.

[4] 上江洲，山下，稲井田：T－ノルムを応用したファジィノードファジィグラフの解析I～II，日本数学会大会応用数学分科会，1999～2000.

[5] 上江洲，山下：Sociometry Analysis Applying Fuzzy Node Fuzzy Graph, Proceeding of Int'l Congress of Fuzzy Systems Association IX, FR1-64, pp.369-374, 2001.

[6] 上江洲：ファジィノードファジィグラフを応用したソシオメトリー分析，日本ファジィ学会誌，Vol.14 N0.3，2002.

[7] 上江洲：Connectivity Analysis of T-Norms and its Application, 22Q1-2, SCIS&ISIS, 2002.

[8] 上江洲：T-ノルム族の解析と応用，日本数学会大会応用数学分科会，pp.28-29，2003.

[問い合わせ先]

上江洲　弘明（うえす　ひろあき）

〒115-0043

東京都　北区　神谷　1-3-1-612

TEL　03-3911-8473

E-Mail : 700b5031@mn.waseda.ac.jp

描画基準上の矛盾を吸収するファジィグラフの描画

Fuzzy Graph Drawing Absorbing Physical Contradictions Caused by Drawing Constrains

梁田　大輔，植田 佳典，松本 政之，佐藤 章
Daisuke Yanada, Yoshinori Ueda, Masayuki Matsumoto, Akira Satoh
東洋大学工学部　Department of Engineering, Toyo University

Abstract: In generally fuzzy graph has constrains on graph elements more than crisp graph, and when a fuzzy graph is drawn, physical contradictions often occur. In this case, we need a drawing method to absorb the physical contradictions. We show the examples of fuzzy graph drawing for absorbing the physical contradictions of two types of graphs 1) the graph constrained edge length, 2) graph having relationship between edge and membership function. And we indicate that the fuzzy graph we proposed here keep good similarity with fuzzy matrix.

1．はじめに

例えば、人間関係や集団の構造をグラフとして表すことができれば、関係の視覚的な理解が可能である。ここでは、格子平面上にファジィグラフを描画する為の手法について考える。

ファジィグラフは、人間が感覚的に理解し易いが、要求される制約を満たすグラフを描画することが困難である。

本論文では描画上の矛盾を吸収するいくつかの方法を提案し、その有効性を確認する。

ここでは、ある集団に属する児童の友好関係を例にとって説明する。

2．ファジィグラフの特徴

一般のグラフが頂点と辺に関係が存在するか否かを規定するのに対し、ファジイグラフの最大の特徴は、辺と頂点にファジィ理論を適用する点にある。このようなグラフは、ややもすると、辺の長さが長くなる傾向を持つので、辺の交差が生じ易い。

このため、グラフの了解性を維持した描画が困難となる。また頂点間の複雑な関係を表示することが多いので、グラフの構造が複雑になり易く、描画規則を満たすグラフを描くことが困難な場合が多い。このためグラフを簡単化する方法が求められている。

しかし一方では、頂点間の関係の強さと距離との間に一定のファジィ関係を与えるので、直感的で理解が容易なグラフを描くことができる。

3．辺の種類を制限したファジィグラフ

グラフを用いてファジィ関係を表す手法は少なくないが、ここでは 1）辺の種類を制限したファジィグラフと 2）メンバーシップ関数の値の大きさと辺の長さを対応づけたファジィグラフの２つを対象として、描画上の矛盾点と問題点を取り上げ、これらを吸収する描画方法について示す。

グラフの辺の長さの種類を制限してファジィ関係を表す場合、長さが一種類の辺では描くことが困難な事がある。このような場合は、グラフのサイズを大きくし、辺の種類を複数にすることにより解決する。

図１は 0.3 以上の関係を１枚のグラフに表示した例である。この例は全ての頂点を隙間なく詰めると描画上の矛盾が多くなり、描画規則を満足することが困難となる。このような場合は、グラフのサイズを適当な大きさに調整して、空白を作ることによって頂点配置の自由度を上げる。こうすることによって描画規則[1]上の矛盾を吸収することが可能となる。

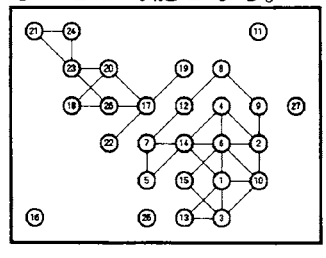


図１　ファジィグラフの例($\mu_{ij} \geqq 0.3$)

図２は、0.2 以上の関係を表示している。ここでは、任意の頂点の周囲８近傍上の頂点との間の距離を長さ１とした。また、頂点間の辺の長さを１に設定するのが困難な場合には長さを２とすることを許す。

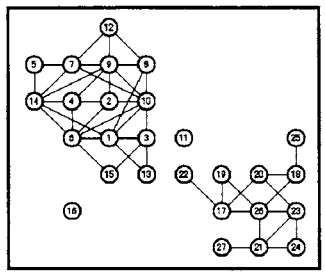


図２　ファジィグラフの例($\mu_{ij} \geqq 0.2$)

４．辺の長さをメンバーシップ関数の大きさに対応付けたファジィグラフ

辺をメンバーシップ関数に対応付けて描く場合、頂点の配置が困難な場合がある。この場合は、関係の強さをいくつかの種類に集約して辺の種類を減らすことにより解決する。

距離は近傍距離を基本とし、頂点の位置関係が斜めの場合には近傍距離に距離１だけ延長を許容する基準を用いる。表１はメンバーシップ関数と辺の長さの種類の対応を示す。図３は表１の分類に従って描画した例である。

表１　ファジィ関係の種類と辺の長さ

メンバーシップ関数の値	辺の長さ
$1.0 \geqq \mu \geqq 0.7$	1
$0.7 > \mu \geqq 0.5$	2
$0.5 > \mu \geqq 0.3$	3

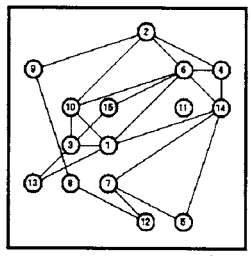


図３　ファジィグラフの例

［グラフの表示精度の評価］

ここで、図３のグラフのファジィマトリクスとの類似度を相対ハミング距離を用いて評価する。この時、辺の長さ１を値μ_{ij}＝１、２をμ_{ij}＝0.5、３をμ_{ij}＝0.3とみなして計算をすると、相対ハミング距離は0.053となる。これは「強類似」[2]に分類され、グラフの精度は高いといえる。

５．考察

図１は頂点19と８、17と12、22と７の間を境に男子と女子の２つのグループの存在を示している。

図２では図１と同様に男女２つのグループの存在が明確に表示されている。また、男子のグループの方が女子のグループに比べて頂点の次数が高いことが分かる。これは女子に比べ男子の方が付き合いが広いことを表している。

図３では関係の強さが辺の長さによって表されているので、関係のおおまかな大きさが視覚的に理解できる。また、頂点11は他のどの頂点とも関係のないことが示されており、クラス運営に応用できることを示唆している。

さらに、関係の強いグループは中央に、弱いグループは外に配置されており、我々が日常的に経験する事実とよく合致する。

これらのことから、このような表示方法が有効であるということが分かる。

６．結言

描画上の矛盾を吸収するファジィグラフの描画方法を示し、１）～４）に示した解決方法を採用することによって有効なファジィグラフが描画できることを示した。

１）グラフのサイズを適当に与えると、集団の構造が分離できる。

２）頂点間の辺の長さを１に設定することが困難な場合には長さを２として描くことは、次数の高い頂点の表示に効果的である。しかもこのことによってグラフの表示の精度が大きく劣化することもない。

３）近傍距離を取り入れることによってグラフ表示に柔軟性を持たせることができた。

４）関係の強さをいくつかの種類に集約して辺の種類を減らすことは直感的で理解が容易な関係表示が可能となる。また、このことによってグラフの類似性も大きく損なわれることはない。

参考文献

[1]杉山公造：「グラフ自動描画法とその応用－ビジュアルヒューマンインターフェース－」、コロナ社(1993)

[2]山下元、須田宏：「ファジィ数学入門＜ソフトサイエンスの基礎と応用＞」、森北出版(株)(1997)

連絡先：梁田　大輔　box_house@yahoo.co.jp

直交描画するファジィグラフの描画上の問題

Drawing Problems of a Fuzzy Graph Drawn on a Rectangular Grid Plain

植田佳典、　松本政之、佐藤章、*山下　元
Yoshinori Ueda, Masayuki Matsumoto, Akira Satoh, Hajime Yamashita
東洋大学　*早稲田大学
Toyo Univ.　*Waseda Univ.

Abstract　**In generally fuzzy graph is more complexity than crisp graph, and when we draw a fuzzy graph, it is too difficult to accept all restrictions for drawing. In this paper we discuss the method to improve the following problems 1)avoidance of superimposing a edge on a node, 2)to keep a high continuity of recognition, 3)correspondence between length of a edge and membership function.**

1．　まえがき

集合X，Yの直積X×Yはグラフを用いて視覚化すると好都合である場合があるが、そこでは、了解性の高いグラフを描画することが非常に重要となる。グラフ描画の一般的な枠組み［1］に従うと、与えられた描画規約の下で可能な限り描画規則を満足するように描画を行うことになる。すなわち、描画目的に合致するように頂点の配置方法と辺の表示方法の大枠を定め、その後頂点と辺の関係が適当となるように努力を行うことになる。

ファジィグラフを描画する場合、クリスプグラフと違って、頂点や辺にファジィ関係を与えるので、小規模のグラフでも組み合わせの爆発が起こり易く、さらに、描画規則は画素に対して相反する要求を行うことが多い。

ここでは、ファジィグラフの了解性を可能な限り維持しながらしかも互いに矛盾する要求を吸収するファジィグラフの描画方法についての検討を行う。

2．　グラフ描画の枠組み

ここでは杉山[1]の示したグラフ自動描画法の枠組みを簡単に分類しておきたい。グラフの描画過程は一般に次のような手順に従う。

1）描画対象の設定
　描画の対象を決める
2）描画規約の選定
　頂点の配置と辺の配線に枠を与える。
3）描画規則の適用
　グラフが持つ意味上の解釈や構造上の制約に従って、頂点相互の関係を満足する頂点配置の決定および辺の相互関係や長さを設定する。

グラフの自動描画問題は描画規則をいかに実現するかと言うことに帰着される。

3．　ファジィグラフの特徴

一般のグラフは頂点と辺に関係が存在するか否かを規定するのに対し、ファジイグラフの最大の特徴は、辺と頂点にファジィ理論を適用する点にある。すなわち、ファジィグラフは要素間の関係の強さあるいは大きさを辺の長さに対応させる。さらに頂点は要素に与えられたグレードに対応させた表示を行う場合がある。このような表示は、人間の感性に訴えることができるので直感的で理解し易く優れた特徴を持つが、一方では、クリスプグラフに比較すると頂点や辺など図素の組み合わせが爆発的に増加するので了解性の高い、いわゆる良いグラフを描画するための適当な図素の組み合わせを発見することが困難となる。

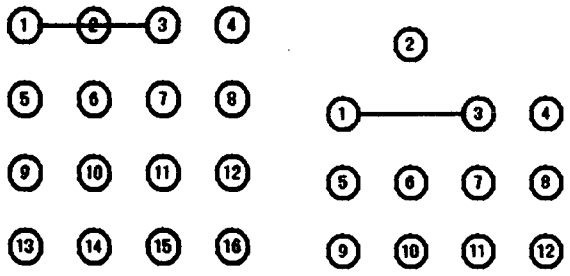
4．　描画上の問題

「2．グラフ描画の枠組み」で要約した描画規則を満足することは、了解性の高いグラフを描画するためには重要であるが、ファジィグラフは、ややもするとこれらの描画規則を実現することが物理的に困難となる場合が少なくない。

以下、ファジィグラフを描画するために解決しなければならない描画上の矛盾を吸収する方法について考察する。

4.1　辺と頂点の重畳の禁止

グラフの大きさを固定すると、辺が頂点と重畳することを避けることが非常に困難な場合が生じる。このような場合はグラフの大きさを変え、さらに重畳が解消するように頂点を移動することが有効な手段となる。図1(a), (b)は辺と頂点の重畳の例と、グラフの大きさを変えて重畳を排除する例である。



（a）重畳　　（b）重畳の回避

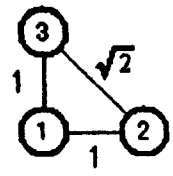
4.2　認知の連続性の確保

辺の長さが1のクリスプグラフを組み合わせてファジィ関係を表す場合、認知の連続性を確保することが重要となる。分割表示するすべてのグラフの頂点の座標上の位置が同じであることは認知の連続性を確保するために有効と考えられる。

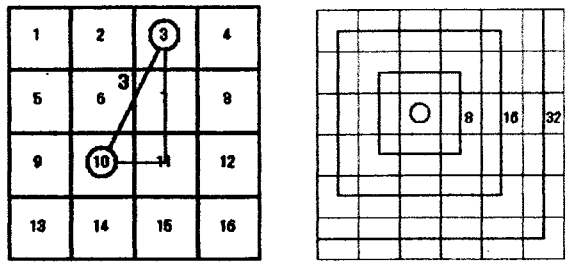
4.3　メンバーシップ関数の値と辺の長さとの対応

辺の長さをユークリット幾何学に基づいて与えると、頂点配置の自由度が大きく低下するきらいがある。これを避けるために、マンハッタン距離や近傍距離を用いることは有効である。ここで言う近傍距離とは注目する頂点とその頂点の周囲8、16、32近傍のスポットに存在する頂点間の距離をそれぞれ1、2，3などとする計測体系でのことである。図2(a),(b),(c)はそれぞれユークリット幾何学に基づく距離、マンハッタン距離、近傍距離に基づいた距離計測を示している。

格子平面上にファジィグラフを描画する場合、例えば、格子のスポットに配置された頂点①と②、①と③の関係が1でしかも②と③の関係が3以上のときは、正しく表示できない。このような場合は近似的に表示することになる。近似表示しなければならない場合は、関係を表示するマトリクスとの近似の程度を評価する必要がある。



(a) ユークリット幾何学距離



（b）マンハッタン　　（c）近傍

図2　ユークリット幾何学距離、マンハッタン距離、近傍距離の定義

5.　結言

格子面上にファジィグラフを描画するときに直面する主な問題点について以下の解決方法を提案した。

1）辺と頂点の重畳は優先して回避すべき課題のひとつである。これを回避するためにはグラフのサイズを変更することが有効である。

2）グラフを分割表示することはグラフの煩雑さを避ける有力な手法であるが、新たに認知の連続性の問題が発生するので、描画にGAを用いる場合は適当なGAパラメータを設定する必要がある。

3）グラフを格子上に描画する場合、頂点間の距離をユークリット幾何学的に与えると描画の自由度が小さい。これを回避するためにはマンハッタン距離や近傍距離体系が有効である。

謝辞　本文に関連する実験の一部については、本学秋山勝久さんの貢献が大である。深謝の意を表したい。

文献

[1]杉山公造：グラフ自動描画法とその応用，コロナ社，1993

連絡　ueda@toyonet.toyo.ac.jp

認知の連続性に配慮したファジィグラフの直交描画について

Fuzzy Graph Drawing on Grid Plain with High Continuity of Recognition

今泉 一郎、植田 佳典、佐藤 章
Ichiro Imaizumi, Yoshinori Ueda, Akira Satoh
東洋大学工学部情報工学科
Department of Computer Science, Toyo University

Abstract : Fuzzy graph often cause physical contradictions of drawing. In this case, it is useful way to combine a few crisp graph. When we display fuzzy relationships using a few crisp graph, considering to keep high continuity of recognition is very important. In this paper, we show the way to keep high continuity of recognition by fixing nodes in crisp graphs to the point of grid.

1．まえがき

ソシオグラムにはファジィグラフ[1]が有効であるが、グラフの了解性が解析結果の良否をも左右することがある。

ここでは遺伝的アルゴリズム[2]を用いて、グラフ描画上の矛盾を吸収し、しかも認知の連続性を重視したファジィグラフを自動描画する方法について考える。

2．ファジィグラフ

一般のグラフが頂点間の辺の有無によって描画対象を表現するのに対し、ファジィグラフは頂点間の関係をファジィ関係で表す。

2.1 ファジィグラフの表示

図１は、辺の長さをメンバーシップ関数の値と関連付けたファジィグラフの例である。

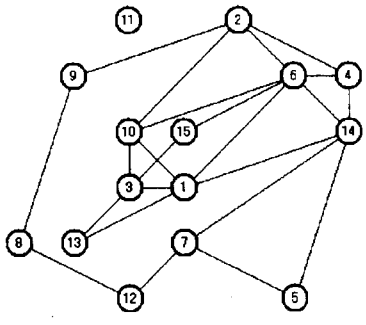


図１　ファジィグラフの例

このような描画法は描画上の物理的矛盾が生じ易い。さらに、メンバーシップ関数と辺の長さを対応させると、辺同士の交差が多くなる傾向にあり、了解性の高いグラフを描画することが難しくなりやすい。

図２は描画上の物理的矛盾の例を示す。例えば、①と②，および②と③の距離が１で、①と③の距離が２より大きい場合は頂点①②③のユークリッド幾何学的配置は不可能である。

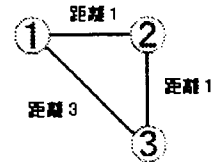


図２　ファジィグラフ描画の物理的矛盾の例

2.2 クリスプグラフを用いた表示

図３は辺の長さが１になるように頂点配置を工夫したクリスプグラフの例である。

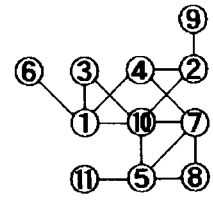


図３　クリスプグラフの例

クリスプグラフは、本来いわゆる曖昧な関係を表示することはできないが、辺が短いので見た目にすっきりした、了解性の高いグラフを描くことができる。

一方、関係が複雑になると１）辺と頂点が重畳し易い、２）辺の交差数が増加し了解性が低下するなどの問題点は残る。

しかしこれらの問題点を最小限にくい止めることができれば、図３に示したクリスプグラフを組み合わせてファジィ関係を描画することは有効であると考えられる。以下に、クリスプグラフを用いてファジィグラフを表すことを考える。

３．ファジィグラフの分割表示

3.1 クリスプグラフ

クリスプグラフは関係の特定の大きさを表示するので、頂点の次数が大幅に減少する。このことはグラフが大きく単純化できることを示唆している。

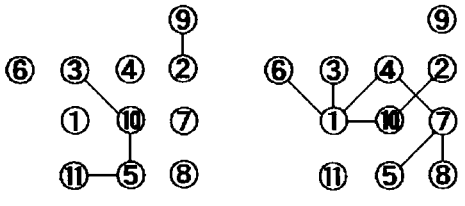
ファジィ関係を表示するためには、このようなクリスプグラフを複数枚用いる。しかし、一つの対象物を複数のクリスプグラフで表すと認知の連続性が失われやすくなるので、新たにこれを確保する努力が必要となる。

各頂点を統一し、認知の連続性を保ちながら、関係を正しく表示するために、ここでは遺伝的アルゴリズム（ＧＡ）を用いる。ここでは、以下の 1)～4) をＧＡの評価関数とする。

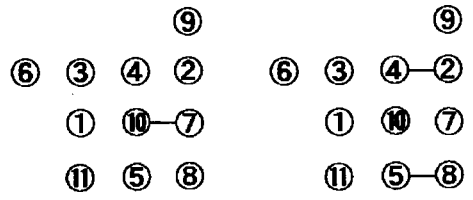
1) 辺の交差数を少なくする
2) 頂点は可能な限り均一に配置する
3) 辺と頂点が重畳しない
4) 近傍距離を採用する

また、交叉は一本の染色体の特定の遺伝子座上に位置する２つの遺伝子を交換する形式の逆位交叉を採用した。

3.2 分割表示例



(a) $0.2 \leqq \mu < 0.3$　　(b) $0.3 \leqq \mu < 0.5$

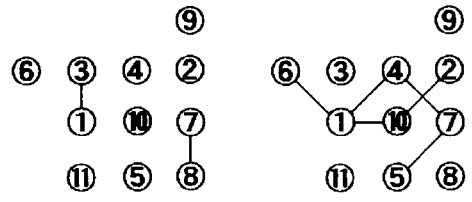


(c) $0.5 \leqq \mu < 0.7$　　(d) $0.7 \leqq \mu \leqq 1.0$

図４　関係の大きさによる表示

図４はメンバーシップ関数の値を、一定の範囲に水準分けして表示したグラフの例である。

この表示方法は、メンバーシップ関数の分割を変えることによって、柔軟なグラフ表示が可能となる。図５は、図４（ｂ）をさらに分割表示した例である。すべてのグラフを通して、頂点の位置が同じであることに注目されたい。



(a) $0.3 \leqq \mu < 0.4$　　(b) $0.4 \leqq \mu < 0.5$

図５　図４(b)の再分割

５．まとめ

ファジィグラフの描画上の問題点を明らかにし、複数のクリスプグラフを連続表示することによってこれらの矛盾点を吸収して表示する方法を示した。

その際、各グラフの頂点座標を固定し、認知の連続性を重視したグラフ表示が重要であることを指摘した。

参考文献

[1] A.Satoh,H.Yamashita,et al,"Fuzzy Graph Modeling and its Analysis System,"Proc.of 13th MODSIM'97,pp907-912, 1997.12

[2] Marks,A., "Experiment with Genetic Algorithms for Displaying Graphs,"Proceedings of 1991 IEEE Workshop on Visual Languages,IEEE Computer Society,pp.62-67,1991

連絡先：今泉　一郎　mail:ti990173@cc.eng.toyo.ac.jp

地理情報システム（GIS）による社会統計データベースの情報検索

Information Retieval of The Social Statistics Database by The Geographic Information System(GIS)

沈　海農
Hainong Shen
名古屋市立大学
Nagoya City University

磯本　征雄
Yukuo ISOMTO
岐阜聖徳学園大学
Gifu Shoutoku Gakuen University

Abstract : In GIS, the Internet eases restrictions of time and space and multimedia technology enables offer of various map data for high quality. Furthermore, GIS makes it possible to perform administration and to offer public service support of government and municipal offices, a public institution, etc. for a map as a database system of a base, and attracts attention from every direction. We are the personal computer bases according possible GIS to Windows in a large-sized general-purpose system, and were able to carry out unitary management with the exact population data created with the social statistics enterprise until now. Therefore, the information retrieval display to demographic-statistics data from map information was realized freely.

1．はじめに

およそ 40 年前、政府の土地管理業務を合理化するシステムとしてカナダで出発した GIS（Geographic Information System 地理情報システム）は、1990 年代になると日本でも急速に普及し、日常業務に広く活用されるようになってきた。

GIS は地表面の状態を記述・分析する基本的な情報技術として、欧米等先進諸国を中心に、情報技術・空間データ分析・ニュービジネス・地理科学の四つの分野で発展し続けている。

GIS は従来の紙の地図と比べて、表示、加工、データ解析、検索などあらゆる面で格段に“使える”地図に進化している。まさに、いまの GIS は施設管理やマーケティング支援、カーナビゲーション等の公共部門に定着することでなく、あらゆる領域に及ぼうとしている。さらに、GIS は報化社会にふさわしい新しい行政支援システムとして注目を集めている。

GIS は空間的なデータを扱うシステムである。この内、建築物・道路・地形等に関するデータは、測

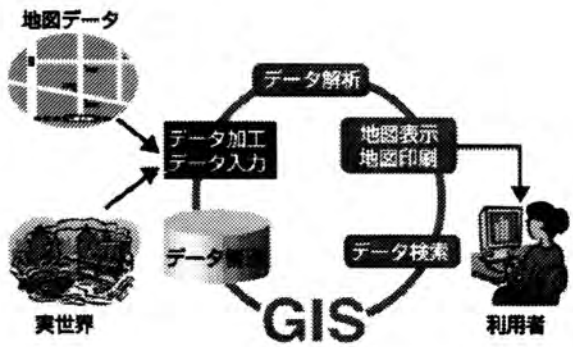
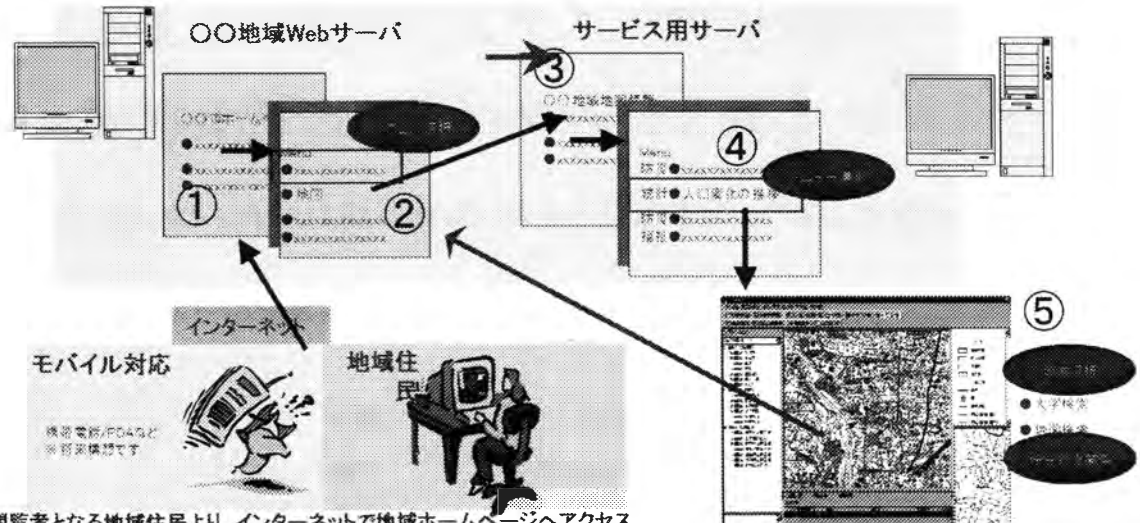


図 1　GIS の概念図

量技術や航空写真技術の進展によって比較的容易に処理可能になった。このため、社会統計のデータは一般に地域全体の集計値として与えられているものが多く GIS での利用は難くになる。

しかし、都市計画基礎調査（人口・市街地面積・土地利用・交通量等）等の調査結果を GIS システムで管理し、これを都市分析や都市計画に応用しようとする自治体が増えている。政令指定都市のほとんどで都市計画基礎調査の結果のデータ化が実施



① 閲覧者となる地域住民より、インターネットで地域ホームページへアクセス
② ホームページメニューより「地図」を選択
③ サービス用サーバで管理される「地域地図1情報」のページが表示される
④ メニューから「人口変化の推移」を選択
⑤ 大字検索・地図検索によって閲覧者の見たい地域を絞り込む→閲覧者は、拡大、縮小、スクロールなどで任意に操作閲覧

図2　地図情報システム（GIS）による社会統計データベースのイメージ図

されているほか、多くの都道府県及び市町村ですでに実施されたり実施が具体的に検討されたりしている。

GISが普及する以前においても、地域メッシュ統計や細密数値情報等を用いて人口分布を空間的かつ定量的に分析する試みが行われていた。私たちも、小規模で汎用性の高い効率的なGIS開発手法と使い易い社会統計データベース・システムを研究開発中である。私たちの観点は、共同作業が容易で情報技術に関わる負担の少ない開発の方策を講じ、利用者にとって便利なWebページにすることである。

私たちは、インターネットを介したGISフリーソースを利用し、一般的に使われている汎用の応用ソフトウェア（Excel、等）を使った配信用のデータベース・システム作成を試みている。また、社会統計支援システム専用のWebページを開設し、個々の利用者が容易にニーズ応じる仕組みの編成を考案している。

以下、本文では、私たちがGISを援用した社会統計分析（人口分析）の動向を、その応用的研究領域まで視野に入れて整理する。

2．GISによる社会統計データベースの設計思想

コンピュータの発達は，GISシステムは我々が地図の上に描いて表したい情報また知りたい情報をデータ・ファイルとして蓄えることを可能にした。かなり前から“コンピュータ・マッピング”とか“地図作製の自動化(automated mapping)”というような名の下にコンピュータは地図と係わってきたが、このような“紙地図を作るための手段としてのコンピュータの利用”ではなく“地図に盛り込みたい情報そのものをコンピュータの中に蓄える”ということが今や可能になっている。日本国内でGISシステムが社会的に大きく注目されるようになったのは、阪神・淡路大震災以降である。阪神・淡路大震災では、被災地のがれきの山などを撤去するために、国内で初めての防災GISが実施された。GISシステムは、現代社会問題の解決に大きな役割を果たすものである。近年における情報技術の急速な進歩に歩調を合わせるようにGISの重要性も高まっており、とくに行政・ビジネス・環境保護などの分野で顕著である。学術分野においても、自然科学を中心にGISの応用領域が広がりつつあり、社会統計の研究も例外ではないである。

社会統計（人口分析）に限らず、GISを用いて空間分析をおこなう際には、空間データ整備の問題が重要である。現在では官学の各方面で、空間データの共用による利用の効率化が進められている。

GISが提供する空間データの効率的な入力・蓄

積・検索・分析機能は、社会分析に関する新たな情報を抽出することを可能にした。

GISによる社会支援システムは2つの作用があると考える。まず、GIS によって多量の社会統計データの処理が可能になったので、様々な空間的・時間的スケールにおける社会統計分析が行われるようになった。例えば：正確な位置情報を伴って、ミクロなスケールで詳細な人口分布を把握できる。第二に、分析結果の表示が容易になったので、条件を変えながら試行錯誤的に結果の評価を繰り返す探索的分析が可能となった。例えば：死亡率や出生率・人口移動の地域的パターンを見出す際には、GIS による迅速な図化が大きな役割を果たしている。

以上の観点から、私たちは本研究について以下のことを留意した。

① 基本的な考え方

a.多様化する市民ニーズに対応する行政サービスの提供、

b. 情報通信基盤の整備による社会・経済活動の活性化。

② 地方自治体における今後の課題と基本的方向を踏まえ

a. ネットワークを活用した行政の簡素・効率化及び住民の利便性の向上、

b. 多様化する住民ニーズへの対応、

c. 地域における情報基盤の整備。

③ 統合型の地理情報システムの整備。

④ コンピュータ・セキュリティ及び個人情報保護。

社会統計データ・地理情報や、その分析結果、さらには地理的計画・政策案などは多くの人に伝え共用する必要がある。

3．システムの作成と構成

私たちは名古屋市を対象とする。まず、インターネットで公開しているフリー地図資料（名古屋市における全区域の地図）を使用する。次に、名古屋市に関係する社会統計データ（主に人口の統計調査資料・データ）を収集する→人口情報のデータベース化する。さらに、地理情報データベースと人口情報データベースを統一化する。

地図情報システム（GIS）による社会統計データベースは以下の特徴を持つ：

(1)地図を表示する機能

GIS には、地図を表示する機能が含まれている。紙の地図と比べて、拡大・縮小が自由に行います。また、スクロール機能によって連続的に表示範囲を移動できるといった特徴がある。

(2)地図を入力・加工する機能

地図データには大きく分けて、「ベクトルデータ」と、「ラスタデータ」がある。用途によっては使いやすい形や大きさに加工しなければならない。GIS は必要に応じて自分で加工できる。適切なデジタルデータがない場合には、自分で入力することもある。

(3)地図からデータを検索する機能

紙に書かれた地図から特定の文字列を見つけ出すのは非常に難しい。GIS では、地図上の道路や建物をデータベース化して管理しているため、高速で検索することができる。

(4)場所の属性を管理する機能

道路や電柱、建物等をデータベース化して管理するのは、単に検索を高速化するためだけではなく、それぞれの地物に付属する情報を地図上で管理するためである。

紙の地図には紙面の大きさの限界があり、すべての属性情報を書きつくすことができない。場所の属性を管理する機能は、コンピュータを利用した GIS のみならの特徴である。

(5) 多量の社会統計データの処理が可能になったので、様々な空間的・時間的スケールにおける社会統計分析が行われるようになった。例えば：正確な位置情報を伴って、ミクロなスケールで詳細な人口分布を把握できる。

(6) 分析結果の表示が容易になったので、条件を変えながら試行錯誤的に結果の評価を繰り返す探索的分析が可能となった。例えば：死亡率や出生率・人口移動の地域的パターンを見出す際には、GIS による迅速な図化が大きな役割を果たしている。

(7) 地図をきれいに印刷する機能

4．まとめ

私たちは、GISは次世代の日本における社会情報基盤だと考えている。だから、国としてしっかりと整備する必要がある。そこに民間企業がパートナーシップを組んで協力し、官民挙げて実現すべきであると主張する。それによって、GISを活用した効率的で質の高い行政サービスを実現できるだけでなく、新たなビジネスモデルが生まれ活性化すると考えられる。

これまで見えないところで支援システムとして利用されていたGISだが、ナビゲーションシステムや自治体での利用など、ユーザーが直接利用する場面が今後ますます増えることは間違いない。特に個人や中小企業が日常生活やビジネスの支援ツールとして気軽に利用できるようになれば、インターネットの普及にも匹敵する大きな変革につながると考えたからである。

参考文献：

・高阪　宏行/岡部　篤行　編　「GISソースブック」
・桜井　博行　著　「GIS電子地図革命」
・秋山　実　著　「地理情報の処理」
・国土情報化研究会　編著　「国土情報化新時代―情報化による国土マネジメント」
・高山　勉、等　著　「GISデータマイニング」
・野上　道男、等著　「地理情報学入門」

・http://www.misoc.com/contens/hello_gis/page10.htm
・http://210.169.200.25/
http://premium.nikkeibp.co.jp/gis/case1_1.shtml

連絡先：
〒467-8501
名古屋市瑞穂区瑞穂町字山の畑1
名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科
沈　海農
電話：052-872-5034
FAX：052-872-3075
Email：h.shen@nsc.nagoya-cu.ac.jp

学習意欲に基づく情報教育支援に関する研究

A study on Supporting Informatics Education based on Motivation for Learning

栗山 裕[1)]　市村 匠[2)]　山下 利之[3)]
Yutaka KURIYAMA　Takumi ICHIMURA　Toshiyuki YAMASHITA

1)桐蔭横浜大学工学部
Faculty of Engineering, Toin University of Yokohama
2)広島市立大学情報科学部
Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University
3)東京都立科学技術大学工学研究科
Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan Institute of Technology

Abstract: We have constructed the computer assisted instruction system for informatics education, which can deal with only the knowledge about informatics. However, it is very important for each student to have a motive and good feelings for informatics education. In order to monitor students' feelings and to improve the instruction to them, we constructed a fuzzy reasoning model which can predict their acquisition of computer skills from their feelings, that is, unpleasure-pleasure, tension-relaxation, and distraction-concentration. The effectiveness of our model was discussed by the experimental data from informatics education at university.

1．はじめに

大学における情報教育は，社会のニーズに即したカリキュラムやコンピュータ利用環境等が整備され，学習環境は飛躍的に改善されつつある．しかし，情報教育の教育現場からは，学生の情報処理活用能力（情報リテラシー）や学習内容の理解度の格差が生まれつつあると指摘がある[4]．そこで筆者らは，学生の情報に関する概念・知識の学習を支援するための様々なシステムを構築した[1],[2],[3],[4]．しかし，学期末等に実施された学生からの“授業アンケート”の内容には，「･･･よかった，･･･楽しかった，･･･面白くなかった」等という具体性に欠ける感想が寄せられることがある．このことより，学生が授業によってどのような感情を抱き，授業の結果，どのような達成感を得たかに関する，感情的側面を知ることも，学習を効果的に進める上で重要なことであろう．すなわち，学習者は，学習過程の変化に対応し，学習目標に向かい，知識・技術を修得する努力をしており，その努力に見合った知識・技術が獲得できた時，達成感が生まれ，自発的に学習意欲が沸いてくると考えられるからである．

著者らは，情報教育（コンピュータ操作を伴う場合）の現場において，ネットワークを介して学習者の感情状態を知ることができると考え，情報教育支援システムへ組み込むことを目的として，授業中に感じた感情から授業後に得られる達成感を予測する手法を提唱した[5]．しかし，学生の感情状態を推測するために，比較的単純なモデルを用いているが，より正確な感情状態を測定することができれば，情報教育支援をより有効に発展されることができると思われる．

そこで，本研究においては，実習後に授業中に感じた感情，及び授業後に得られた達成感に関する質問紙調査を行った．そして，その調査結果をもとに，授業中に感じた感情から授業によって得られる達成感を予測するファジィ推論とニューラルネットワークによりモデル化を行った．さらに授業形態が異なる，“講義形式”と“実習形式”の授業でモデル化を試み，２つのモデルを比較考察するとともに，今後の教育支援システムへの応用の可能性を論じる．

2．実 験

2.1 対象学生と教育内容

実験は授業形態の異なる，“実習形式”と“講義形式”の２つで行った．

実習形式の授業

被験者は私立大学工学部 3 年生の学部生計 26 名（全て男性）であった．被験者はすべて，“マイクロコンピュータ応用”の履修学生であった．“マイクロコンピュータ応用”は，コンピュータ操作を伴う情報教育の応用科目として位置付けられている．この授業では，Lego 社の RCX(ここでは，この装置で作られた物を“ロボット”という)のワンボードマイコンを使用して，マイコン応用（プログラミング，設計・組立作業，調査）に必要な基礎技術を学習する．さらに課題に沿ったロボット製作があり，達成すべき明確な課題が存在する．

講義形式の授業

被験者は私立大学法学部2，3年生の学部生計 22名（男性19名，女性3名）であり，被験者はすべて，“法情報学Ⅰ”の履修学生であった．この授業は，達成すべき明確な課題が存在しない講義形式の授業形態である．

この授業の目的として，1）法情報学；情報機器・情報ネットワークを利用した法情報の検索・収集方法に習熟すること，2）情報法学；“法とコンピュータ”のサブテーマで，広く“情報化社会と法制度”について考えること，の2つである．また，授業を進める上での履修条件は，授業科目“情報処理”を履修済みか，あるいはこれと同等以上のコンピュータ及びネットワークに関する知識があることである．

授業の進め方は，講義内容に沿った情報（教材）をインターネットで検索し，その結果をプロジェクターで提示する．さらに，法律に関する最新の情報をインターネットより収集し，学生に興味と関心を持つような授業を展開する．

2.2 質問紙

質問紙調査によって，授業における教師による解説，及びそれに続く実習または講義遂行中（ほぼ中間時点）に感じた感情について，SD法による評定を行った．

すなわち，

不快 — 快
緊張 — リラックス
散漫 — 集中

を両極する9件法によるSD法によって評定を求めた．

“達成感”については，“まったくない”を“1”，“大いにある”を“9”とする9件法によるSD法によって評定を求めた．授業終了後に，“達成感”に関する評定を行った．

3．結果及び考察

3.1 ファジィ推論モデルの構築

表1・2に感情と“達成感”のSD評定の集計結果を示す．“不快”（“緊張”，“散漫”）の感情を強く持った場合を“1”，“快”（“リラックス”，“集中”）の感情を強く持った場合を“9”，どちらとも言えない場合を“5”とする9件法のSD評定を用いたので，評定を3段階に分け，1～3を“快”（“リラックス”，“集中”）の低い程度（以下，“低”と略記する），4～6を“快”（“リラックス”，“集中”）の中程度（以下，“中”），7～9を“快”（“リラックス”，“集中”）の高い程度（以下“高”）として，全被験者を集計した．

表1　実習形式の評定結果

		不快---快			緊張---リラックス			散漫---集中		
	評定値	1,2,3	4,5,6	7,8,9	1,2,3	4,5,6	7,8,9	1,2,3	4,5,6	7,8,9
達成感	1,2,3	3	1	0	1	1	2	3	1	0
	4,5,6	2	6	1	0	6	3	2	7	0
	7,8,9	0	5	8	4	3	6	0	8	5

表2　講義形式の評定結果

		不快---快			緊張---リラックス			散漫---集中		
	評定値	1,2,3	4,5,6	7,8,9	1,2,3	4,5,6	7,8,9	1,2,3	4,5,6	7,8,9
達成感	1,2,3	1	4	0	1	2	2	3	2	0
	4,5,6	2	7	4	2	6	5	5	6	2
	7,8,9	0	0	8	1	1	6	1	2	5

ファジィ推論モデルへ入力する値は，各被験者の各感情，達成感に関する SD 評定値を用いた．推論の方法としては，Mamdani の方法を用いた．

実習形式の場合

表１より，“達成感”が“低”評定である被験者の場合，“快”に関しての評定が“低”評定と“集中”に関しての評定が“低”評定である被験者が最も多いことがわかる．

同様に，“達成感”が“中”評定である被験者の場合，“快”に関しては評定が“中”評定である被験者が最も多く，“リラックス”に関しては“中”評定である被験者が最も多く，“集中”に関しては“中”評定である被験者が最も多いことがわかる．また，“達成感”が“高”評定である被験者の場合，“快”，に関しての評定が“高”評定で多く，“リラックス”に関しての評定が“高”評定が多く，“集中”に関しては“中”評定である被験者が多いことがわかる．

以上の集計結果をもとにして，図１に示すファジィ推論モデルを仮定した．前件部における横軸は各感情の強さの程度であり，具体的には 1～9 の評定値に対応している．各感情が“低い”場合には左端に頂点を持つ三角形，“中程度”である場合には中央に頂点を持つ三角形，“高い”場合には右端に頂点を持つ三角形のメンバーシップ関数を仮定した．

従って，例えば規則１は，“快の感情が低く，かつリラックスの程度が中程度で，かつ集中の程度が低い”者は，授業において“達成感をあまり感じない”ということを表している．

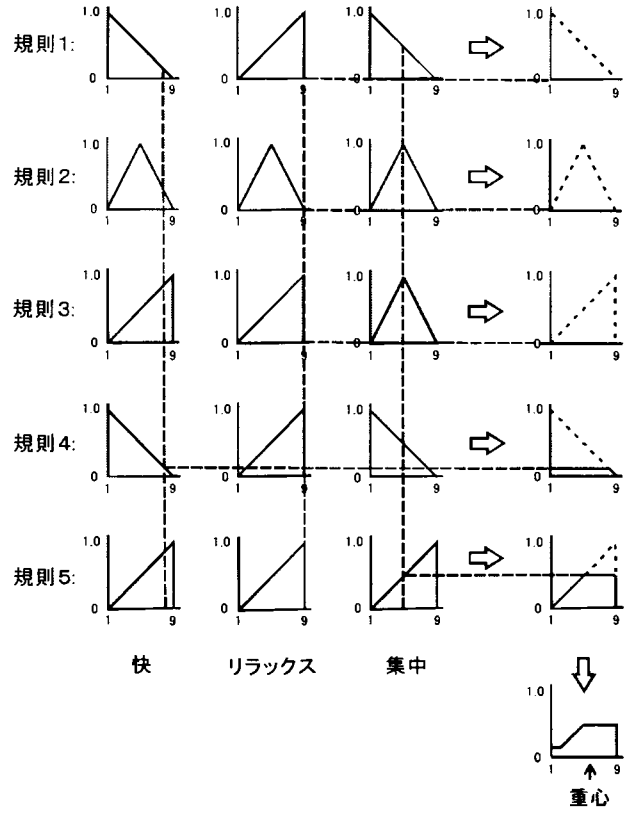


図１　実習形式におけるファジイ推論モデル

講義形式の場合

実習形式と同様に集計結果をもとにして，図２に示すファジイ推論モデルおよびメンバーシップ関数を仮定した．

“規則１”と“規則３”は，実習形式と異なったメンバーシップ関数が仮定されている．例えば規則１は，“快の感情が中程度，かつリラックスの程度が高く，かつ集中の程度が低程度である”者は，授業において“達成感をあまり感じない”ということを表している．

規則４・規則５について

規則１・２・３は，被験者より集計した評定結果から仮定できるだろう．規則４・５は，教師が教育現場で感じていることに基づいて仮定したものである．例えば規則４は，“快の感情が低く，かつリラックスの程度が高く，かつ集中の程度が低程度である”者は，授業において“達成感をあまり感じない”ということを表している．例えば，“授業（先生の話し，課題作業など）に集中せず，面白くなく，授業とは別な作業（お喋りなど）をしている”，このような学生を想像することができよう．

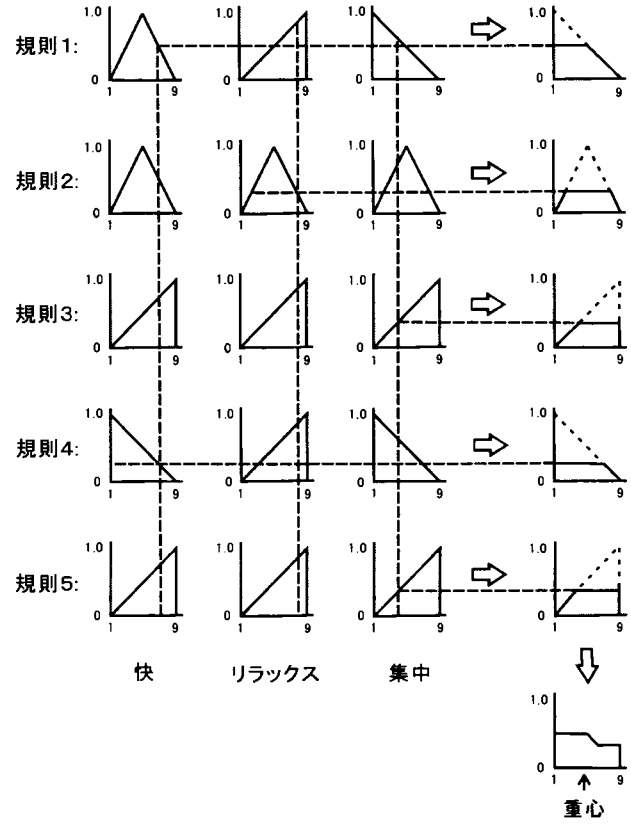


図２　講義形式におけるファジイ推論モデル

3.2 授業形態によりメンバーシップ関数の差異

規則1において，被験者の“快”程度による“達成感”について，実習形式は，学生が能動的に授業に参加するので快適さが達成感に影響すると考えられよう．しかし，講義形式は，教師の話を一方的に聞くだけの受動的な授業参加であろう．

一方，規則3において，被験者の“集中”の程度による“達成感”について，講義形式は，教師の話を集中して聞く必要があるだろう．しかし，実習形式は，作業が伴うのでそれほど“集中”の程度は影響しないことが推測される．

3.3 モデルの当てはめ

実習形式および講義形式のそれぞれのファジィ推論の当てはまりを検討するために，質問紙調査に対する回答者（実習形式：26名、講義形式：26名）について，ファジィ推論により推測された“達成感”の“低”，“中”，“高”と，実際の“達成感”の評定結果の比較を行った．その結果を表2・3に示す．

実習形式の場合

全26名中18名（69.2%）が実際の評定とファジィ推論による予測が一致した．“達成感”の“低”，“中”，“高”ごとにみると，“達成感”が“低い”と評定した4名中の2名（50%）が予測と一致し，“達成感”が“中程度”と評定した9名中の9名（100%）が予測と一致し，“達成感”が“高い”と評定した13名中の7名（53%）が予測と一致した．

表3　実習形式のモデルによる予測と直接評定

		直接評定		
		低	中	高
予測評定	低	**2**	0	0
	中	2	**9**	6
	高	0	0	**7**
		4	9	13

表4　講義形式のモデルによる予測と直接評定

		直接評定		
		低	中	高
予測評定	低	**2**	0	1
	中	3	**13**	3
	高	0	0	**4**
		5	13	8

講義形式の場合

全26名中19名（73.0%）が実際の評定とファジィ推論による予測が一致した．“達成感”の“低”，“中”，“高”ごとにみると，“達成感”が“低い”と評定した5名中の2名（40%）が予測と一致し，“達成感”が“中程度”と評定した13名中の13名（100%）が予測と一致し，“達成感”が“高い”と評定した8名中の4名（50%）が予測と一致した．

4．おわりに

本研究において，授業における学生が感じた感情に関する評定から，学生の学習の“達成感”を予測するファジィ推論モデルを構築した．“達成感”に関する実際の評定結果とモデルによる予測を比較した結果，比較的高い予測が得られ，また，授業形態が異なる実習形式と講義形式においても，それぞれに構築したモデルに有効性が示された．さらに，ニューラルネットワークによるモデル化も同様に有効性が示された．今後は，本システムを用いて，授業で感じた感情に関する評定から，学生が授業においてどの程度の“達成感”を感じているかに関する基礎資料を得て，授業や教育環境の改善に役立てる予定である．

参考文献

[1]Ichimura,T., Kuriyama,Y., & Yamashita,T.: Analyses of college students' concept by Fuzzy Structural Modeling(FSM) method with planar lattice neural network, *Proceedings of International Conference on IEEE Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.3,pp.298-303(1999)

[2]市村匠，栗山裕，山下利之：ニューラルネットワークによる学生の知識構造分析に基づいたWWW上の教育支援システム,第15回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.155-158(1999)

[3]栗山裕，市村匠，山下利之：ニューラルネットワークによる情報教育TAのスキル向上支援システムの設計,第15回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.131-134(2000)

[4]栗山裕，市村匠，山下利之，高橋宗雄：大学生の知識構造の分析に基づく情報リテラシー教育支援システムの構築,桐蔭論叢,14, pp.48-60(2001)

[5]栗山裕，市村匠，山下利之：学習意欲の分析結果に基づく情報教育支援システム，日本教育工学誌,Vol.26,Suppl. ,pp.133-138(2002)

連絡先

〒225-8502
横浜市青葉区鉄町1614
桐蔭横浜大学 工学部 電子情報工学科
栗山　裕
電話: 045-972-5881
E-mail: kuri@cc.toin.ac.jp

障害に関する認知とファジイ集合について
A Study of Self-Estimation about Handicaps

奥田裕紀
Hiroki Okuda
金城大学
Kinjo University

Abstract A total of 118 subjects were asked to draw positions of their own present and the future with circles on a white paper (210×297mm). A circle which means the whole handicapped person (the Venn diagram) was printed in the center of the paper. They were also asked to evaluate what degree they are regarded as a handicapped person in present and the future. In the evaluation, subjects were ordered to answer with the numbers from 0 to 100. Coefficent correlation between evaluation value and distance from the center of the handicapped-person-circle to the edge of subject-circle was -0.4 and significant ($p<0.01$). Application possibilities and problems of spatial expression of fuzzy sets are discussed.

1 はじめに

クリスプ集合では、ある要素が、特定の集合に含まれるか否かについては、あいまい性はない。また、クリスプ集合を視覚的に表現するために、一般に用いられるベン図では、集合は円（または、共通集合のように複数の円弧で囲まれるた領域、あるいは和集合のように複数の円の複合領域等）で示される。そして、当該の集合に含まれる要素は、その集合を示す領域の中に表示され、当該の集合に含まれない要素は、その領域の外に表示される。この場合、重要な点は、集合を示す領域に含まるか、含まれないかということであり、領域の中外の平面上における相対的位置には特別な意味はない（等質である）。

つまり、図１の例のように、クリスプ集合を示すベン図では、当該の集合を表す領域の中にあれば、それが空間的にどの位置であっても（A1でも、A2でも）完全にその集合の要素であることを示している。また、当該の集合を示す領域の外であれば、空間的にはどの位置であっても（B1でもB2でもB3でも）、完全にその集合には含まれていないことを示すだけである。もっとも、クリスプ集合では、それ以上のことを示す必要性は認められないであろう。

では、ある要素が、特定の集合に属しているか否についてあいまい性を持つファジイ集合の場合はどうであろうか。クリスプ集合とは異なり、ファジイ集合では、ある要素が当該の集合に含まれている程度（メンバーシップ値）を示すことが求められる。ある集合を示す領域に対する、特定要素の相対的な位置関係が、その要素が、当該の集合に属す程度（メンバーシップ値）と何らかの関連をもつ表現を提案することも可能であろう。ただし、そのような表現が、一般的に理解され易いものであるか否かについては検討が必要となるであろう。

そこで本研究では、これらの問題を検討することとした。まず、ファジイ集合に関して、特に学習したことがない被験者において、被験者自身が、特定の集合に属する程度の評定を求めた。次に、当該の（クリスプ）集合をベン図で表示した用紙上に、被験者自身の位置を描くように求め、評定と被験者の位置との関連を調べることとした。

本研究では、被験者自身が、その集合に属する程度を評定し、被験者自身の相対的な位置を描くことを求める集合として、障害を持つ人全体の集合を選択した。

このような集合を選択した理由の一つは、被験者自身が当該集合に属する程度が、評定の時点（現在と将来）で、大きく変わる可能性が考えられたことであった。さらに、被験者群における障害に関する認知を検討する等の目的もあった（奥田, 2001）。

2 方 法

(1) 被験者

被験者は、大学生118名であった。

(2) 手続き

①初めに、自分が“現在”障害を持つと思う程度について、0～100までの数値を用いて評定することを求めた。自分が全く障害を持っていないと思う場合を0、自分が完全に障害を持っていると思う場合を100として、評定するよう教示した。評定に用いる数字には、特に制限をつけなかった（ただし、結果として回答は全て整数であった）。1～100の数字を用いたのは、通常ファジイ集合のメンバーシップ値として用いられている0～1の数値（少数）で評定するより、評定し易いと思われたためであった。

また、無段階スケール、ポイントスケールなどは、平面上の位置関係の差異を連想させる可能性があるため、これらの使用を避けた。

②次に、ベン図を用いて、障害を持つ人全体の集合（半径25mmの円）を表示してある白色の用紙上に、“現在”の自分の位置を円で描くことを求めた。用紙はA4サイズで、障害を持つ人全体を示す円は、用紙の中央に表示されていた。

③自分が“将来”障害を持つようになると思う程度について、0～100までの数値を用いて、評定を求めた。

④障害を持つ人全体の集合（半径25mmの円）が表示してある白色の用紙上（“現在”の自分を描いたものと同一の用紙）に、“将来”の自分の位置を円で描くことを求めた。

⑤その他、生活のために他者の援助を必要とする程度の評定等、若干の事項についても解答を求めたが、それらに関しては別に報告するのでここでは省略する。また、回答は全て無記名で行った。

⑥障害を持つ（ようになる）と思う程度については、評定値の1/100を、メンバーシップ値（0～1）とし、被験者群全体の平均値を求めた。

3 結果と考察

(1) “現在”および“将来”の障害認知

図2に示したように、被験者の評定に基づく“現在”障害を持つファジイ集合のメンバーシップ値の平均は低く、被験者の多くは“現在”は、ほとんど障害を持っていないと思っていることが示された。一方、“将来”障害を持つ（ようになる）ファジイ集合のメンバーシップ値の平均は0.5を超えていた。これは、「障害を持つ」「障害を持たない」のどちらとも言えないよりは、「障害を持つ」程度が、若干高いことを示している。

また、多くの被験者は、“現在”障害を持つ程度の評定値よりも、“将来”障害を持つようになる程度の評定値の方が高かった（図4）。このことは、多くの被験者が、“現在”よりも“将来”の方が、障害を持つ（ようになる）程度が高まると予想していることを示していると考えられよう。

(2)“現在”および“将来”の被験者の位置

図3に示したように、障害を持つ人全体の集合が円（半径25mm）で、中央に表示された用紙上に描かれた“現在”の被験者（自分自身）の円は、障害者を持つ人全体の集合の円の中心から、平均40mm以上離れていた（障害者の円の中心から、被験者の円の縁までの距離）。なお、自分自身を示す円の中心ではなく、縁までの距離を基準としたのは、各円は手書きで描かれたため、大きさに差異があったためである。

一方、“将来”の被験者の円については、障害を持つ人全体の円の中心からの距離は、平均25mm以下であった（同じく、障害者の円の中心から、被験者の円の縁までの距離）。また、多くの被験者は、“現在”よりも“将来”の自分を、障害を持つ人全体の集合（の中心）に近い位置に描いた(図3)。これらのことから、被験者は、“現在”の自分の位置より“将来”の自分の位置の方が、障害を持つ人の集合（の中心）に近づくと認知していることが示唆される。

(3) 障害を持つ程度と位置との関連

各被験者が評定した“現在”および“将来”自分が障害を持つ（ようになる）程度と、障害を持つ人全体の集合の円（の中心）から“現在”および“将来”の自分の位置（円の縁）までの距離との相関をみると、相関係数は-0.4で有意であった（$p<0.01$）。

また、“現在”よりも“将来”の方が障害を持つ（ようになる）程度が高いと評定し、かつ“現在”よりも“将来”の自分の方を、障害を持つ人全体の集合（の中心）に近い位置に描いた被験者の割合もかなり高かった（図4）。

これらのことから、被験者が障害を持つ（ようになる）程度の評定と、障害を持つ人全体の集合に対する自分自身の位置の認知には、関連があり、障害を持つ（ようになる）程度が高いと認知するほど、自分自身の位置を障害者を持つ人全体の集合（の中心）に描く傾向があることが示唆された。

(4) ファジイ集合に関する視覚的表現

本研究の結果、ファジイ集合に関して特別な教育を受けていない被験者であっても、ある集合に含まれるか否かあいまい性がある場合、当該集合に含まれる程度の評定（認知）と、当該集合を表示する領域との相対的な位置関係について、ある種の関連を想定していることが示唆された。

このことは、ファジイ集合については、特定の集合を示す領域からの相対的な位置関係が、当該の集合に属している程度を示すという表現が、ファジイ集合に関して特別の知識をもたない人達にも、自然に受け入れ易い（理解されやすい）という可能性を示している。ただし、被験者が当該集合に含まれる程度の評定と、当該当該を示す領域（円）に対する自己の相対的な位置関係との関連は、必ずしも論理的なものではないことに、注意する必要があろう。

図5は、ファジイ集合の視覚的（模式的）表現の1例を示しているが、この表現以外にも様々な表現が考えられる。どのような表現（表示）が最も理解され易いかについては、さらに検討の必要があろう。ファジイ集合に関する、適切な視覚的表現は、ファジイ集合自体の理解や、ファジイ集合を応用した各種のサポートシステムの利便性を高めたり、システムを利用可能な年齢を拡大するため等にも応用可能であろう。

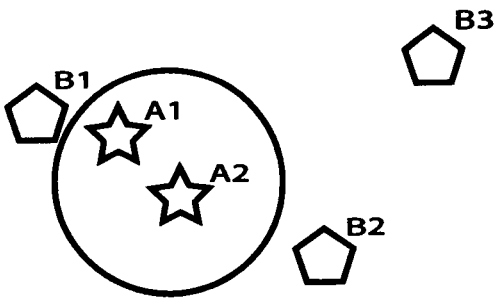


図１　ベン図で示されたクリスプ集合と各要素の空間的位置

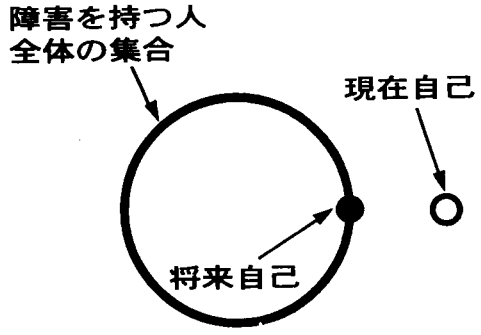


図3 障害を持つ人の全体集合に対する現在および将来の自己の位置

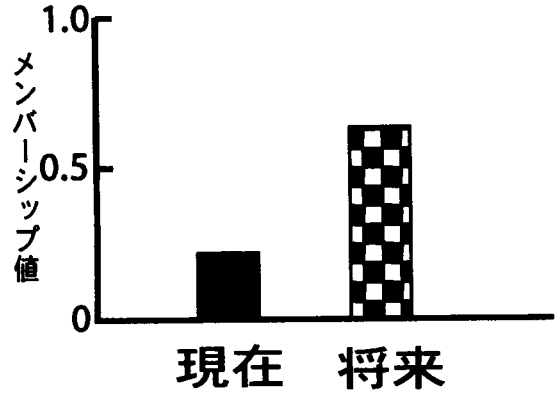


図2 現在および将来障害を持つ（ようになる）者のファジイ集合のメンバーシップ値

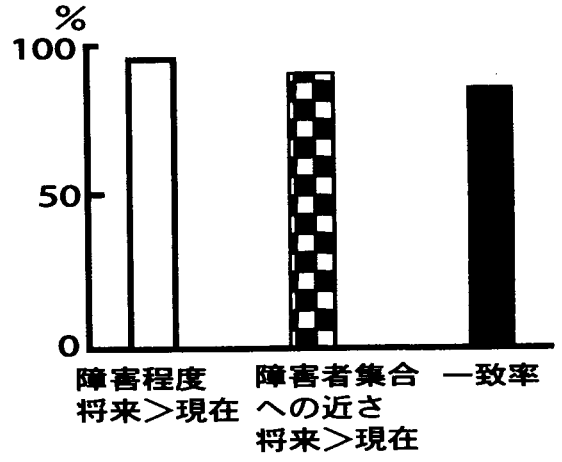


図４ 将来の方が障害を持つ程度が高い比率・将来の方が障害集合との距離が近い比率・認知が一致した比率

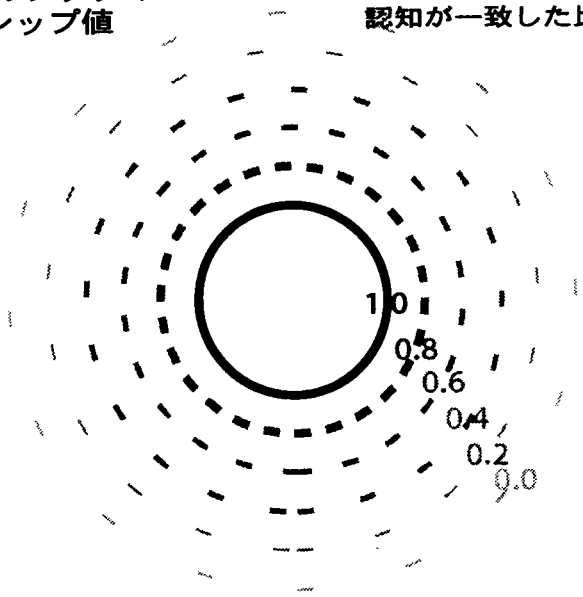


図5　ファジイ集合の視覚的表現の例

引　用　文　献

［1］奥田裕紀　青年期・成人期の発達と障害　新・障害者の心理 みらい 47-62，2001

［連絡先］
〒924-8511　石川県松任市笠間町1200
金城大学　奥田裕紀
TEL 076-276-4400，E-mail: okuda@kinjo.ac.jp

キーワードに重み付けをしたファジィ情報検索

A Method of Information Retrieval by using Fuzzy Graph

新井 衆一郎　佐藤 章　土田 賢省　植田 佳典
Arai Shuichirou　Satou Akira　Tsuchida Kensei　Ueda Yoshinori

東洋大学
Toyo University

<Abstract>
Information retrieval by keywords is effective to search such information as papers and news. But we cannot use this method for information retrieval by inexact keywords. We propose a new method to search the information by inexact keywords. This method is based on fuzzy graph model.

1 背景

インターネット上にはメーリングリスト、掲示板を使った相談所やQ&Aが多数存在する。このようなシステムのほとんどが過去にあった質問・回答を検索できるようになっている。

しかし、相談をする人の多くは問題の解決方法がわからず、自分の置かれている状況について明確に表現できない。つまり、そのような場合、十分で適切な索引語を入力することは難しい。

情報検索モデルにおけるクラスタモデルには、このような問題を改善できる可能性がある。

2. クラスタモデル

クラスタモデル以外の情報検索は、検索質問と検索対象となる事例を１対１に比較し、最適な検索結果を提示するものである。

クラスタモデルにおいては、検索対象となる事例をあらかじめ類似度に応じてグループ分けしておき、これらのグループと検索質問の適合度を計算することによって、計算量を削減し、またユーザの入力した索引語が十分でなかった場合でも検索対象との不一致の可能性を下げることが期待できる。

3 文書間の類似度

クラスタモデルではあらかじめ文書集合をグループ化する必要があるが、この処理は一般にクラスタリングと呼ばれる。

グループ分けの際には文書間の類似度が必要となるが、一般に類似度の計算方法はベクトル空間モデルや確率モデルなどの検索モデルを利用することが多い。

これら検索モデルは検索対象となる文書をどのように表現するかという問題があり、その文書表現が他のすべての要素に影響を与えているといえる。そして、多くの場合、文書表現とは文書からどのように適切な索引語を抜き出すかという問題になっている。その問題とはつまりユーザの入力する検索質問に対して適切な検索結果を返すための索引語を選ぶ方法である。

つまり、索引語の集合と文書を比較する場合、文書自身を索引語の集合として表現するのがもっとも効率がいいのは明らかである。このことから、一般に検索対象となる文書を索引語の集合で表現しているのは、検索質問が索引語の集合で表現されていることが大きな理由となっている。しかし、クラスタモデルのグループ分けなど文書どうしの類似度を求めるのであれば、文章を索引語の集合として表現する必要はなく、より文章の特性を表現しうるモデルが必要となる。

4 ファジィグラフによる文章表現

一般に文章は、「単語」の集合としての「文」、「文」の集合としての「段落」から構成されている。一つの文章に、一つの文章作成者の意見や考えがあるとするならば、単語一つでは曖昧であったものが、文、段落、文章となるに従って明確なものになっていく。つまり、単語は他の単語によって、文は他の文によって、段落は他の段落によって意味が明確になり、最終的に一つの意味としての文

章が確定する。

このような、文章の特性を表現したモデルとしてファジィグラフモデルを提案する。

5 ファジィグラフモデル

文章のファジィグラフ化には、文章に含まれる単語をノードに、単語間の関連をファジィ関係としてアークで表す。

具体的には、まず文章に対して形態素解析を行い、必要な形態素のみをノードの候補とする。「名詞」と「動詞」を候補として文章間の類似性を特定すれば有効なグラフが作成できる。

次に、ノード間の関連を設定する。単語間の関連をある単語が別の単語の意味を明確にするものであると考え、同じ文章よりも、同じ段落、同じ文、さらに距離が近い場所に存在するほうが単語同士の関連が高いと仮定する。

よって、ノード候補となった単語のうちで同一文内に隣接して存在するものに関連を与えノードとアークを作成する。

作成されたノードとアークによってグラフを作成し、ノードが共通しているアークの場合はその重みを合計する。ただ、段落をグラフ化した段階では段落に含まれる文の総数でアークの重みを割り、文章をグラフ化した段階では含まれる段落の総数でアークの重みを割り、ファジィ関係とする。

6 類似度の測定方法

ファジィグラフモデル間の類似度の計算には、ファジィグラフの類似度の計算方法がそのまま使用できる。

ファジィグラフ$F=(f_{ij}), f_{ij}=1, 1\geq i, j\leq n$と、ファジィグラフ$Z=(z_{ij}), z_{ij}=1, 1\geq i, j\leq n$が類似する程度は、

$$d=d(F,Z)=\frac{\sum_{i,j}\left|f_{ij}-z_{ij}\right|}{n^2-n}\in[0,1]$$

を用いて調べることができる。

7 評価

インターネット上のサイト、パソコン初心者相談所では１３００以上の文書が閲覧可能になっている。これらの文書から、ある文書と他のすべての文書を比較する形で、本検索方式の評価を行った。

以前の検索方式では、いくつかの文書は内容的に似ていても類似度が低いことがあったが、このような文書の類似度が相対的に上がる結果となった。

8 終わりに

本論文はクラスタモデルにおいての文書どうしの類似度の計算について、文書をファジィグラフとして表現するモデルを提案した。また、検索質問と文書についても類似度を計算することができる。

参考文献

[1]徳永健伸:言語と計算5　情報検索と言語処理、東京大学出版会、1999

[2]洲之内治男、山下元：ファジィ情報分析－人間科学へのアプローチ、共立出版、１９９５

[3] 社団法人パーソナルコンピュータ利用技術協会：パソコン初心者相談所
URL:http://www/pcua.or.jp/

[4]宮本、三宅：ファジィ情報検索について、日本ファジィ学会誌、Vol.3、No.1、pp15-26、1991

連絡先：

〒350-8585
川越市鯨井2100
東洋大学　工学部　情報工学科
新井衆一郎
TEL0492-39-1440
E-mail:aria@eng.toyo.ac.jp

臨床検査の標準化と個人値とのゆらぎについて

On Standardization of Cliniacl Inspection and Reference Interval

宮武直樹・松田修三（法政大学）　但馬文昭（横浜国立大学）
佐藤秀昭（杏林大学）　松田充夫（大島商船高等専門学校）
Naoki Miyatak, Syuzo Matsuda(Hosei Univ.) Fumiaki Tajima(Yokohama Nat. Univ.)
Hideaki Sato(Kyorin Univ.), Nobuo Matsuda(Oshima Nat. Coll.)

We analyzed data of the clinical inspection in Tachikawa hospital. These data were processed in the statistics target, and the reference interval of these data was calculated. These reference interval are used for the sick judgment. In this papar,We tried the standardization of these data.

1．はじめに

東京、立川病院での健康診断受診者 2603 名のデータを分析し、健康であるかどうかを評価する(health-associated)基準としての基準範囲におけるこれらの測定値群の振る舞いを調べた。

基準範囲は、「正常である」、「病気である」などを決定するものではなく、他の医療情報とあわせて総合的に判断されるべきもので、この考え方は国際的にも認知されてきている。

西東京地区の特徴を抽出すると共に、健康管理の立場からこれらの医療データについて解説したい。

2．正常値と基準範囲

いま、健康への関心が非常に高まっており、様々な年齢層で健康診断が受診されている。これらの健康診断は、一般の診療と異なり、訴えを持たない健康な人々が自主的に受検している。そのため診察所見もほとんどなく、必然的に「臨床検査所見」が重視されることになる。

異常が発見されたときは、医師から臨床検査結果について説明、指導がなされ問題はないのですが、異常がない場合は、医師から説明がありません。健康診断を受けた当人が、結果通知書の正常値を「物さし」に自分で判断することになる。ところが、一般的に結果通知書に記載されている正常値は、「正常な人の95%が含まれる範囲」と考えられる集団正常値なので、かなり幅がある。検査項目によっては個人差が極めて大きいものもあり、判定には慎重でなくてはなりません。(例、標準偏差値が小さい検査項目)

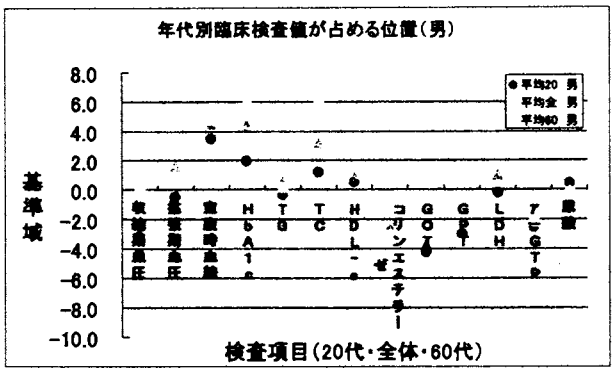
もともとどんな検査にも個人差があり、その個人差のある検査所見を集めて、集団としての傾向から正常範囲を求めているわけですから、それがある個人としての健常値にそぐわない場合があるわけで、ここのところが問題なのである。

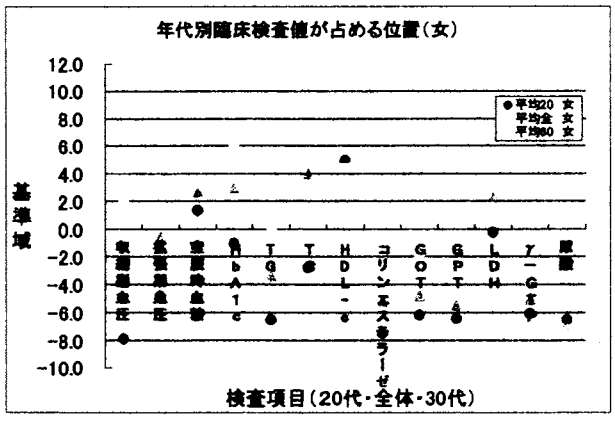
	収縮期血圧	拡張期血圧	空腹時血糖	HbA1c	TG	TC	HDL-c	コリンエステラ	GOT	GPT	LDH	γ-GTP	尿酸
範囲（下限）	101	61	60	4	32	130	30	100	10	4	200	0.0	3.5
範囲（上限）	139	89	110	6	153	219	85	240	40	50	400	80.0	7.9
範囲	38	28	50	2	121	89	55	140	30	46	200	80.0	4.4
平均20 男	112	74	94	5.2	91	180	59	150	19	20	298	29.7	5.8
標準偏差	11.2	7.7	8.2	0.4	45.3	29.5	13.1	32.2	5.0	10.8	51.5	12.8	1.1
平均全 男	115	77	96	5.4	96	189	60	151	19	19	311	30.7	5.8
標準偏差	14	8	9	0.4	40	28	20	33	6	9	50	13.7	1.1
平均60 男	120	79	97	5.5	93	201	65	149	21	19	332	31.6	5.6
標準偏差	14	8	9	0.4	40	28	20	33	6	9	50	13.7	1.1
平均20 女	105	68	88	5.0	53	162	71	117	16	12	298	15.7	4.3
標準偏差	11.3	7.7	7.5	0.3	18.6	14.3	0.4	21.5	3.2	4.6	48.8	5.5	0.63
平均全 女	113	74	92	5.3	72	192	70	134	18	14	323	19.8	4.2
標準偏差	13.5	8.7	8.6	33.8	33.1	15.6	0.8	30.4	5.3	6.8	56.1	10.3	0.9
平均60 女	123	79	93	5.5	91	216	70	146	22	16	372	24.0	4.7
標準偏差	15.2	9.1	9.6	0.3	38.8	26.0	17.8	30.3	7.0	8.3	62.5	14.5	0.9
平均男女	114	76	94	5.3	86	190	64	144	19	17	316	26.1	5.1
標準偏差	13	9	9	0.4	41	32	16	33	5	9	54	13.2	1.2

<図　1>　臨床検査の検査項目とその計測値(男 1,495 名　女 1,108 名　合計 2,603 名

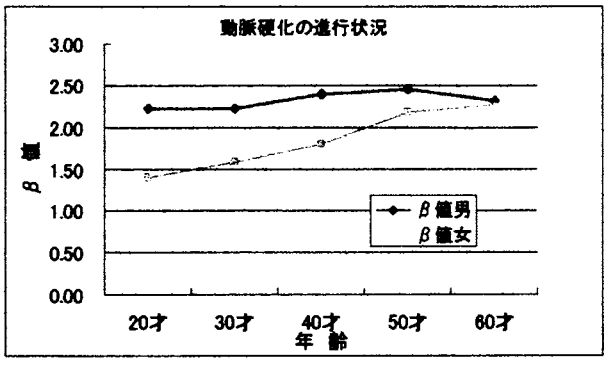
図１は、臨床検査項目とその年齢別平均値と標準偏差値を男女別に示してある。検診者は、2,603 名（男 1,495、女 1108 名）である。多くの項目で加齢に伴い基準値が大きくなっているのが分かる。

臨床検査項目の測定単位の違いや大きさ違うので、見やすくするために、基準範囲の中心からの偏差を求め、２分の１範囲を基準とした割合を求めて、１０倍したものを項目の基準域とてグラフに表したものが図２、３である。加齢と共に基準値が上限値にシフトしていく様子が読める。





<図　2(上), 3(下)>　臨床検査値が年齢により基準域内をどのように変わっていくかを示す



<図　4>　年齢による動脈硬化の進行状況

３．加速度脈波と血管壁硬化度の指標β値

われわれは、すでに指先に光を照射し毛細血管の血流の変化(容積脈波)を透過光量より検出する脈波計を用いて加速度脈波の波形解析を行い、図５に示す加齢にともなう波形の変化を指摘し、現在健康診断にこれを取り入れている。

また、超音波診断装置を用いて血管壁硬化度の指標である Stiffness－parameter　β（以下β値とする）を検診項目に取り入れている。β値は以下の式によって求められる。

β値は動脈血管の硬さの指標として広く用いられているが、加齢にしたがって増加する事が推測されているがいまだ確かなデータを目にしたことがない。今回、図４に示すようにその確証を得ることができた。

β値は特に血管拍動幅△D に依存し△D の値が小さくなる事によりβ値の値が大きくなるので血管が硬くなるとβ値が増加することが推測されている。

$$\beta = (\ln P_s/P_d) \cdot (D_{min}/\triangle D)$$

Ps：最大血圧、Pd：最小血圧、

D_{min}：最小血管径、△D：血管拍動幅

この D_{min}、△D は左右頚動脈部をＢモード断層像として捉え拍動中の血管径、血管拍動幅を測定する。

４．おわりに

臨床検査では検査結果を判定するための基準値は、一般的には健常者の 95%が示す平均的な測定値の変動範囲を基準範囲（従来、正常範囲、集団正常値などと呼ばれている）としている。従って、この基準範囲は、健康時に実施する定期健康診断や人間ドック、成人病健診などで、常に自分の基準範囲を求めておく必要があるが、各自が検査結果を判断するためには統計処理の考え方を知らなければならないということになる。従って、誰もが簡便に読める「診断結果の表示方法」が求められてきている。今後の研究課題としたい。

＜連絡先＞　　宮武　直樹

相模原市大野台 3-728-17　miyatake@mt.tama.hosei.ac.jp　TEL & FAX 042-755-6541

ウェーブレット変換による劣化関数の画像への影響に関する一検討

A study on the influence of blurred function to original image

松田　充夫
Nobuo MATSUDA
大島商船高専
Oshima National College of Maritime Technology

但馬　文昭
Fumiaki TAJIMA
横浜国大教
Yokohama National University

宮武　直樹
Naoki MIYATAKE
法政大学
Hosei University

Abstruct: There are many researches of original image restoration as much exactly as possible from a blurred and noisy image. However, it is not established that the common principle is such as the image compression or the detection of similarity for correlation. In this paper, when the function of blurred process is assumed to be a Gaussian function, the relation between the blurred amount and wavelet coefficients was investigated using 2-dimensional discrete wavelet transform of a blurred image.

Key Words: Blurred Image, Multiresolution Analysis, 2-dimensional Discrete Wavelet Transform

1．はじめに

ぼけ、焦点ずれやノイズにより劣化した画像からできるだけ元画像に近い画像を求めようとする画像復元の研究は数多くある。画像復元には、一枚の劣化画像から画像復元する場合と複数の画像から合成して復元する場合とがある。

前者には、劣化関数の逆関数を用いるウィナーフィルタや最大エントロピーによる復元手法、また逆関数を必要としない遺伝的アルゴリズムによる復元手法[1]などがある。

しかし、逆関数を用いた場合には逆関数が存在しない場合やノイズが増幅される、などの問題を残している。

また遺伝的アルゴリズムを用いる復元手法では、2値画像であっても膨大な解空間を探索する必要があり、多値画像になるとやはり手に負えない。

後者には、特開平3-80676や特開2001-298657のように複数の画像から、区分した領域の高周波成分を利用して元の画像を推定し合成するものである。しかしながらノイズがまったくない場合はともかくノイズがある場合は難しい。さらに劣化画像をウェーブレット変換によって復元する研究はいくつかあるが、まだデータ圧縮や相似相関の検出のように共通する基本原理が確立されているとはいえない[2]。

本論文では、焦点ずれやぼけの劣化過程をガウス型関数で仮定した場合のぼけ量とウェーブレット展開係数の相関を劣化画像の2次元ウェーブレット解析から検討した。

2．画像劣化のモデル

ぼけやノイズによって画像が劣化する過程は、次式でモデル化することができる。

$$g(x,y)=\iint h(x,y,x',y')f(x',y')dx'dy'+n(x,y) \qquad \text{(Eq.1)}$$

劣化関数に場所依存性がない場合は、畳み込み積分（＊）で表すことができる。

$$g(x,y)=h*f+n \qquad \text{(Eq.2)}$$

ここでgは劣化画像、hは劣化関数（点拡がり関数PSF）、hは元画像、nはランダムノイズである。

3．ウェーブレット変換と多重解像度解析

ウェーブレット変換とは、実数$a,b\in\mathbf{R}$に対すアナライジング（マザー）ウェーブレットψと関数$f(t)$との積分

$$(W_\psi f)(b,a)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{\mathbf{R}} f(t)\overline{\psi(\frac{t-b}{a})}dt \qquad \text{(Eq.3)}$$

をいう。ただし$\overline{\ }$は複素共役を表す。また以下の条件を満たす$L^2(\mathbf{R})$の閉部分空間の列$\{V_j\}_{j\in Z}$を多重解像度解析と呼ぶ。

①$\cdots\subset V_{j-1}\subset V_j\subset V_{j+1}\subset\cdots$（$\{V_j\}_{j\in Z}$は増大列）

②$\cap_{j\in Z}V_j=\{0\}$

③$\overline{\cup_{j\in Z}V_j}=L^2(\mathbf{R})$

④$f(x)\in V_j\Leftrightarrow f(2x)\in V_{j+1}$

ある関数$\varphi(x)\in V_0$が存在して、$\{\varphi(x-k)\}_{k\in Z}$は$V_0$の正規直交基底となる。ここで整数$J$はスケールであり、関数$\varphi$はスケーリング関数である。

4．解析結果とまとめ

多重度解析には、基底関数してDaubechiesのウェーブレット[3]を用いた。ぼけ画像は、標準画像（MADRIL）

をPhotoshop Ver.6.0のガウス型ぼかしのフィルタ処理により作成した。

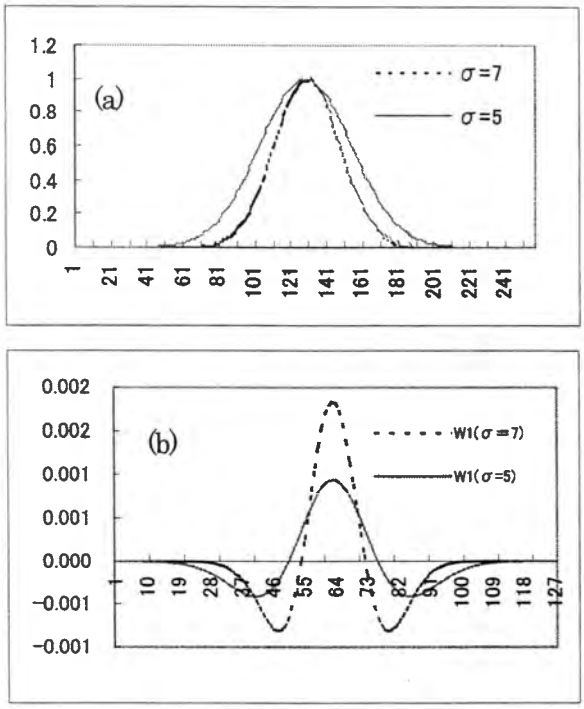


Fig.1 Two blurred functions (a) and the wavelet coefficients(b)

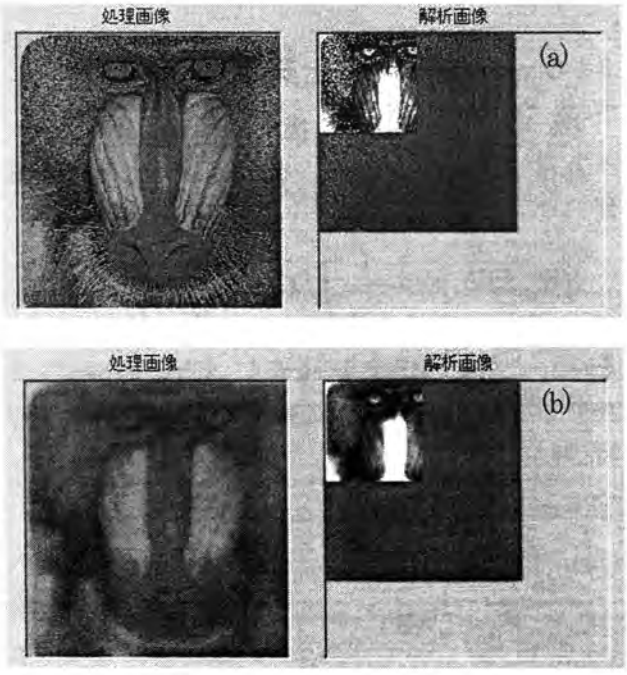


Fig.2 The results computed using Multiresolution signal decomposition (Daubechies N=2)

Fig.1は、異なる分散を持つ一次元ガウス関数から計算したウェーブレット展開係数である。このウェーブレット展開係数の結果から、分散が大きくなると周波数は両側に拡がることがわかる。

Fig.2はぼけ量の異なる2つの画像を多重度解析して比較したものである。ぼけ量の少ない画像ほどサブバンドHL、LH成分値が高くなるのがわかる。

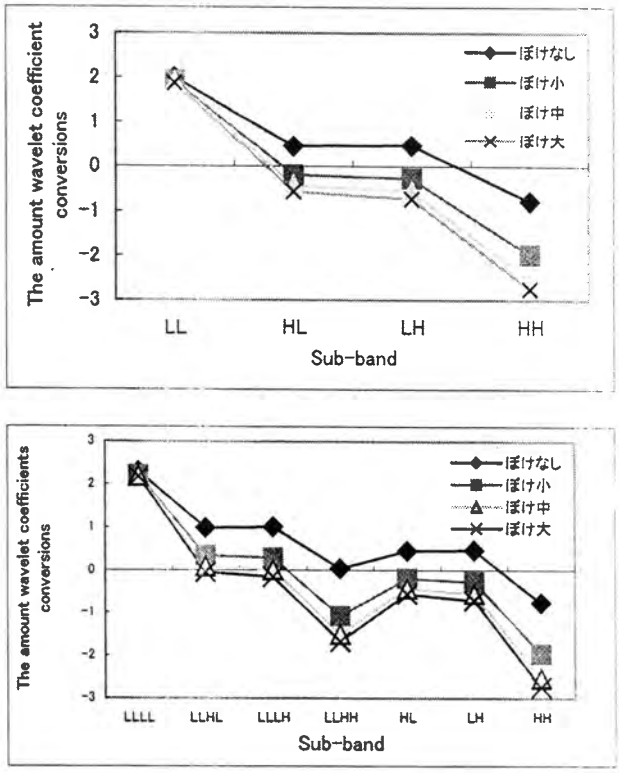


Fig.3 The amount computed from sub-bank absolute wavelet coefficients (Daubechies N=2)

Fig.3は2つのレベルについて、サブバンドLL、LH、LH、HHとLLLL、LLLH、LLHL、LLHH、LH、HL、HHの領域ごとに、ウェーブレット展開係数の絶対値の総和を領域面積で換算したものをプロットした。この図からサブバンドのウェーブレット展開係数総和の減少率は、ぼけの量に依存することがわかる。この性質を利用すればぼけ画像（部分）と鮮明な画像（部分）との判別をノイズある場合でも可能にする。

参考文献

[1] 高津ら：計測自動制御学会合同シンポジウム講演論文集,pp.111-118,1992.9.

[2]中野ら：ウェーブレットによる信号処理と画像処理, 共立出版, pp.15-159, 2000.

[3] Daubechies : Comm. Pure and Appl. Math 41.pp. 909- 996,1988.

連絡先

〒742-2193 山口県大島郡大島町小松 1091-1
大島商船高等専門学校　情報工学科
TEL 0820-74-5581
e-mail:matsuda@oshima-k.ac.jp

散乱光強度パターンによるクモの糸の太さと屈折率の測定

Diameter and Refractive Index of a Spider Silk Determined by Light Scattering

但馬　文昭	松田　充夫	宮武　直樹	松田　修三
Fumiaki TAJIMA	Nobuo MATSUDA	Naoki MIYATAKE	Syuzo MATSUDA
横国大	大島商船高専	法政大	法政大
Yokohama Nat. Univ.	Oshima Nat. Coll.	Hosei Univ.	Hosei Univ.

Abstract——Electromagnetic wave analysis of laser light scattered by a cylindrical filament enables us to determine its diameter D and refractive index n. An automatic measurement system for such a scattering intensity pattern has been developed. Using the system, the scattering patterns were experimentally measured about sample filaments such as spider silks for $D<4\lambda$ (wavelength). Then an error between a measured pattern and a theoretical one was evaluated by the Least Square Method. Consequently, the two patterns had good correspondence to each other at a minimum error point.

Key Words——Scattering Intensity Pattern, Refractive Index, Birefringence

1. まえがき

透明な誘電体あるいは伝導性のある金属の円柱状フィラメントのサンプルにレーザ光を照射するとその光が散乱される．その散乱強度パターンを測定し，解析することにより，サンプルの太さと屈折率を決定することができる[1].

最近，波動論に基づいて，透明サンプルの太さが光の波長の１０倍以下でも太さ（直径）と屈折率を高精度で同時に決定できる方法が提案され，光波長と同程度までの太さのサンプルについて計算値と測定値がよく一致することが報告された[2].

本論文では，この方法に基づいて測定を自動化し，さらに細い，光波長の 1／2 以下の太さのサンプルについて測定実験を行った．その結果，太さと屈折率について計算値と測定値が良好な一致をみた．

2. 測定原理と測定システム

2.1 測定原理

円柱状サンプルの中心軸を円筒座標系におけるｚ軸と一致させ，ｚ軸に垂直にレーザ光の平面波が進入すると考える．すなわち，電磁場$\boldsymbol{E},\boldsymbol{H}$のｚ軸方向成分は$\partial_z \equiv 0$とする．また，サンプルは，透明で複屈折性を有する（単軸結晶）と仮定すれば，サンプルの誘電率εは

$$\varepsilon=\varepsilon_0\varepsilon_r=\begin{pmatrix}\varepsilon_\perp & 0 & 0\\ 0 & \varepsilon_\perp & 0\\ 0 & 0 & \varepsilon_\parallel\end{pmatrix}=\varepsilon_0\begin{pmatrix}n_\perp^2 & 0 & 0\\ 0 & n_\perp^2 & 0\\ 0 & 0 & n_\parallel^2\end{pmatrix}$$

のテンソルで表される．式中，ε_0は真空中の誘電率，$n_\parallel$と$n_\perp$はそれぞれ円柱サンプルに対して平行，垂直方向の屈折率である．以上から Maxwell の方程式は真空中の透磁率をμ_0として次式で表される．

$$\nabla\times\boldsymbol{H}=\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\boldsymbol{E}),$$

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=-\mu_0\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{H},$$

$$\nabla\cdot\varepsilon\boldsymbol{E}=0,$$

$$\nabla\cdot\mu_0\boldsymbol{H}=0.$$

これらについて境界条件に基づいて解を求め，入射平面波に対する散乱波の各部分波の外向きエネルギー流束を求めると，平行偏光の場合は，散乱角θ_iを用いて

$$S_r^{\mathrm{out}}\approx\frac{2}{\omega\mu_0\pi r}\left|B_\parallel(0)+2\sum_{m=1}^{\infty}B_\parallel(m)\cos m\theta_i\right|^2$$

となる．ここで，

$$B_\parallel(m)=-\frac{J_m(n_\parallel kr_0)J'_m(kr_0)-n_\parallel J'_m(n_\parallel kr_0)J_m(kr_0)}{J_m(n_\parallel kr_0)H_m^{(1)\prime}(kr_0)-n_\parallel J'_m(n_\parallel kr_0)H_m^{(1)}(kr_0)}$$

であり，J_mは第１種 Bessel 関数，$H_m^{(1)}$は Hankel 関数，プライムは微分を表す．ただし，$r>>r_0$（r

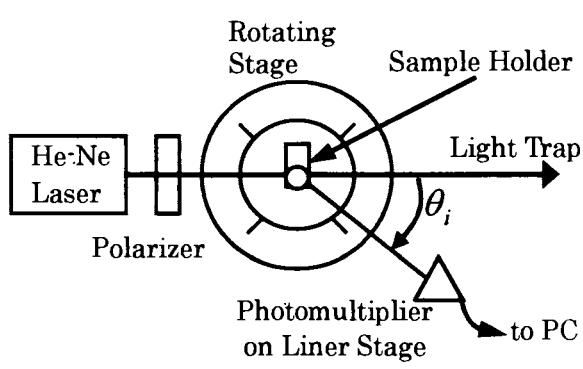


Fig.1. Overview of the experimental system.

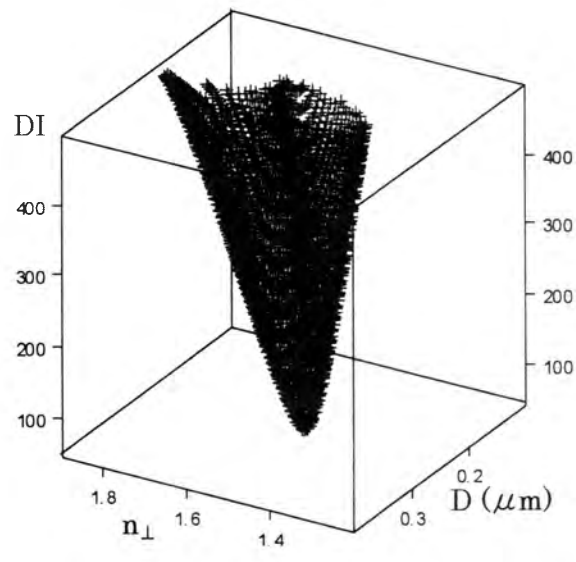


Fig.2 An example of Deviation Index(DI).

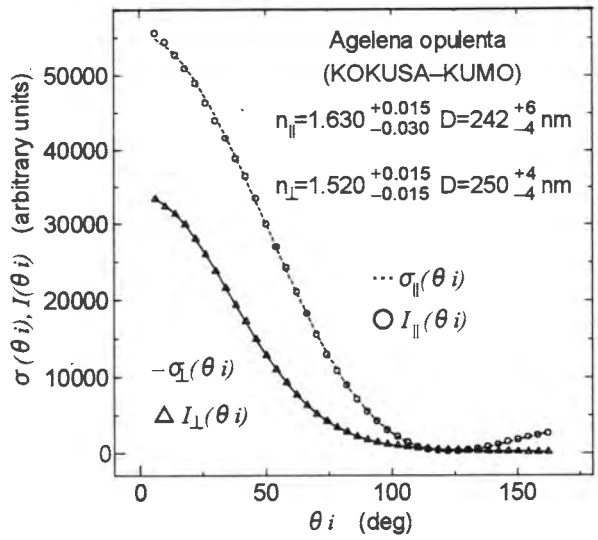


Fig.3 An example of analyzed data.

は中心軸からの動径方向の距離，r_0はサンプルの横断面の半径），$kr >> 1$（$k = \omega\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$）である．

したがって，散乱断面積は

$$\sigma_\parallel(\theta_i) = \frac{r S_r^{out}}{|S_x^{in}|} = \frac{2}{\pi k}\left| B_\parallel(0) + 2\sum_{m=1}^{\infty} B_\parallel(m)\cos m\theta_i \right|^2$$

となる．ここで，S_x^{in}は入射波の流束を表す．同様に，垂直偏光の場合は，

$$\sigma_\perp(\theta_i) = \frac{r S_r^{out}}{|S_x^{in}|} = \frac{2}{\pi k}\left| B_\perp(0) + 2\sum_{m=1}^{\infty} B_\perp(m)\cos m\theta_i \right|^2$$

が得られる．ただし，

$$B_\perp(m) = -\frac{n_\perp J_m(n_\perp kr_0) J'_m(kr_0) - J'_m(n_\perp kr_0) J_m(kr_0)}{n_\perp J_m(n_\perp kr_0) H_m^{(1)'}(kr_0) - J'_m(n_\perp kr_0) H_m^{(1)}(kr_0)}$$

である．

2.2. 測定システム

Fig.1 に測定システムの概要を示す．レーザー光の波長は$\lambda = 0.5435\ \mu$mである．円柱状サンプルは回転ステージの中央の回転しないサンプルホルダーに垂直に固定されている．回転ステージに取り付けられたアームの他方には垂直に移動するリニアステージが固定され，その上にフォトマルチプライヤーが取り付けられている．サンプルにより散乱された光の強度はθ_i毎に最強度値を探索しながら測定する．また，その測定値$I(\theta_i)$と計算値$\sigma(\theta_i)$とのフィッティングは最小２乗法により行い，サンプルの太さと屈折率を決定する．

3. 結果と考察

Fig.2 に測定結果の一例を示す．これは，サンプルとして直径が$D < \lambda/2$のクモの糸（牽引糸）の測定例である．図中の直径D及び屈折率nの誤差の上限・下限値は測定値と計算値の誤差の２乗和（偏差,Deviation Index;DI）が最小となる$D = D_0$，$n = n_0$を基準として，このときの偏差を超えない範囲でD，nを変化させたときのD，nの上限及び下限値を表す．このときの(D_0, n_0)周辺の誤差の分布の様子をFig.3 に示す．これより，偏差の極小点(D_0, n_0)が一点で決定されていると判断される．このようにして，それぞれの偏光の場合について(D_0, n_0)を求め，そのときの散乱光強度の様子をθ_iにたいしてプロットした結果をFig.3 に示す．測定値と計算値が相当よく一致し，良好な結果が得られた．

4. まとめ

透明な誘電体の円柱サンプルとしてクモの糸を用いてその散乱光強度パターンから波動論に基づいてサンプルの太さと屈折率を決定した．今後は，さらに細いサンプルによる測定実験により，本測定法の限界について検討する．また，金属繊維の測定原理・実験等についても検討する．

謝辞

本研究を進めるに当たり，横浜国立大学西山善郎名誉教授から多くのご教授・ご協力を賜った．記して厚く謝意を表する．

参考文献

[1] M. Born and E. Wolf, Principle of optics, 7th ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2002.

[2] Y. Nishiyama, S. Kurita, I. Yamamoto, Y. Ishizuka, T. Watanabe, D. Kobayashi, K. Odanaka, and Y. Hyogo, Diameter and refractive index of a cylindrical thread determined by scattered light pattern, Optical Rev. vol.8, no.2, pp.90-94, 2001.

［連絡先］

但馬文昭：横浜国立大学教育人間科学部

〒220-0046 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-2

TEL 045-339-3448

E-mail: tajima@ynu.ac.jp

検査システム向けファジィ判別知識の生成に関する考察

―― ファジィ決定木学習と遺伝的アルゴリズムの適用 ――

A Study of Fuzzy Classification Knowledge Acquisition for a Product Inspection System

― Application of Fuzzy Induction Tree and Genetic Algorithm ―

糀谷 和人　稲葉 広典　中嶋 宏

Kazuto Kojitani　Hironori Inaba　Hiroshi Nakajima

オムロン株式会社　コントロール研究所

Control Technology Laboratory, OMRON Corporation

Abstract: The aim of this study is to extract requirements for functionality of machine learning technique that can generate effective knowledge for a product inspection system. The problem of the product inspection is treated as classification. Integration of genetic algorithm and fuzzy ID3 has been employed as the machine learning technique. In this paper, two major problems related to the nature of the real-world inspection are discussed. The first one is that the number of sample data in each class is extremely different from each other. The second is that it is required to design the fitness function to minimize false positive error under the constraint of keeping false negative error zero. These problems have fatal influence to the ordinary machine learning algorithms.

1 はじめに

製品品質に対する要求が社会的に高まっている中で、最終検査工程において安定した全数検査を行うことができる自動検査システムの開発が進められている。たとえば、異音検査システム[1]では、検査対象に取り付けたマイクや加速度センサで取得した波形データから４０種類の特徴量を抽出し、これらの特徴量を入力とするファジィ推論によって正常異常の判断を行っている。

ファジィ推論を使うことで、本来数値で表現される音の大きさや高さを「大・中・小」「高・中・低」のように言語値として表現できるため、人にとってルールの可読性、推論結果の理解容易性、新規ルール追加などの保守性が高いというメリットがある。

一方で、ファジィ知識を人手で作成するには、４０種類の特徴量の中から判定に有効なものを見つけ出し、それらの組み合わせを考慮してルールを構成する必要がある。この作業は、経験豊富な知識エンジニアでないと十分な性能の知識を作成できない。また、「音量＝大」は何 dB 以上か、「周波数=低」は何 Hz 未満か、などの判断は人それぞれなので、メンバシップ関数を定義する人が異なれば同じルールであっても性能が異なることになる。

本稿では、まず、ファジィ決定木と遺伝的アルゴリズムを用いて判別ルールを自動生成する方法について説明する。次に、実際の検査システムの知識生成に適用する際の課題を整理し、これらを解決する手段について考察する。

2 ファジィ判別知識の生成

2.1 ファジィ判別知識生成手法

これまでにファジィ判別知識を生成するための手法はさまざまなものが提案されている[2] [3] [4]。石渕らは、図１のように入力空間を格子状に分割し、学習用データの各領域への適合度から直接ルールを生成し、CF の調整とメンバシップ関数の調整を行っている。

われわれの扱う入力空間は数十次元という高次元であるため、分割に有効な属性をより

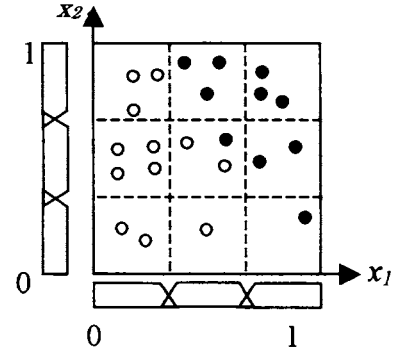


図 1　入力空間の分割

理解容易なルールを生成可能なファジィ決定木学習を用いる。

2.2 ファジィ決定木学習

決定木は、離散属性を入力とし、その属性を持つサンプルがどのクラスに属するかを判定する判別器である。根から各葉へのパスをたどれば、容易に等価な判別ルールの表現に変換できる。

ID3[5]は決定木を生成する学習アルゴリズムであり、クラスがあらかじめラベル付けされた教師つき学習用データを使って決定木を生成する。決定木生成のアルゴリズムは、以下のようなものである。

Step1: 学習用データ全体の情報量 *Info(T)* を計算する

Step2: 学習用データをある属性で仮に分割し、各サブセットの情報量の総和を計算する。

Step3: 分割後の情報量と分割前の情報量の差（利得）を計算する。

Step4: すべての属性に対して Step2,3 を行い、最も利得の大きかった属性を実際に分割する属性として選択する。

Step5: 分割後のノードについて Step2～4 を繰り返し、枝を展開していく。

馬野らは数値属性の入力を可能にするファジィ ID3[6]を提案している。ファジィ ID3 が生成するファジィ決定木はファジィ判別ルールに変換できる。ファジィ ID3 はメンバシップ関数を所与のものとして動作するので、メンバシップ関数の生成、調整には別途アルゴリズムを用意する必要がある。

2.3 遺伝的アルゴリズムによるメンバシップ関数の最適化

メンバシップ関数の最適化を行うために遺伝的アルゴリズムを使用する。

検査システムの入力空間は、多くの場合「異常－正常」または「正常－異常」の 2 つの領域に分割されるが、まれに「異常－正常－異常」のような３つの領域に分割されることもある。そこで、メンバシップ関数は３つに固定した。さらに、メンバシップ関数に次のような制約をかけることで、効率的な探索を行う [7][8]。

(1) 隣接するメンバシップ関数はメンバシップ値=0.5 で交わる。

(2) 定義域の両端でメンバシップ値＝１となるように固定する。

上記の制約に基づき、図 2 に示す（b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4}）の 4 座標を入力数分結合したものを 1 個体にコーディングする。

最適化のアルゴリズムは次のようなものである。

Step1: 初期個体集団を生成する

Step2: 各個体ごとに決定木を生成する。

Step3: サンプルデータを決定木に適用し、正常異常の判定を行い、評価値を算出する

Step4: 算出した評価値を集計し、終了条件を満たしていなければ、個体集団に遺伝操作を行い Step2～４を繰り返す。終了条件を満たしていれば、終了し、集団で最も評価値の高かった決定木を出力する

Step３で評価値を算出する方法については、3.1 で説明する。

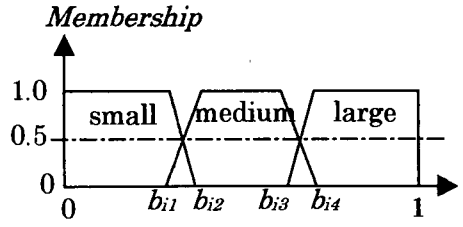


図 2 メンバシップ関数の定義

3 課題と考察

3.1 過検出と見逃しを用いた判別性能評価

一般の判別問題では判別性能の評価指標として誤判別率(error rate)用いることが多いので、遺伝的アルゴリズムの個体選択に用いる評価値としては正解率（=1－誤判別率）を使用すればよい。

製品検査システムの検査性能は、異常品を正常と誤判定する「見逃し率(FNR : false negative rate)」正常品を異常と誤判定する「過検出率(FPR : false positive rate)」の２種類を区別し、両方の要求を満たす必要がある。

見逃し率：

$$FNR = \frac{\text{正常と誤判定された異常品の数}}{\text{全異常品の数}} \cdots (1)$$

過検出率：

$$FPR = \frac{\text{異常と誤判定された正常品の数}}{\text{全正常品の数}} \cdots (2)$$

製品検査では、見逃しが最終検査工程で発生すると、異常品を市場出すこととなるため、通常FNRはゼロにすることが求められる。一方、過検出が多くなると、製品の再検査や廃棄にかかるコストの増加を招くため、FPRは最小限に抑えたいという要求がある。

これらの要求を満たすため、式(3)の評価式を個体選択のための評価関数とした。

$$E = \frac{1+\beta^2}{\frac{1}{(1-FNR)} + \frac{\beta^2}{(1-FPR)}} \cdots\cdots (3)$$

重みβを十分小さく設定することによって、FNRの最小化を優先し、個体間でFNRの優劣がないときにのみFPRが考慮されるので、上記の要求を見たす解の方向に最適化が進むことが期待できる。

3.2 データ分布の偏りが属性選択基準に与える影響

製品検査では、正常品の割合は「歩留まり率」と呼ばれる。現実の製造ラインは100%に近い歩留まり率で稼動しているのが通常である。通常の学習アルゴリズムは、データの分布にこのような極端な偏りがないことを前提にしているため、そのまま適用するだけでは期待する動作ができない。

図3に示すような正常サンプルと異常サンプルの数に偏りのあるデータ（正常：990, 異常：10）から決定木を生成する際に、どのような属性選択ヶ行われるかを考える。x_1は見逃しが1件ある（FNR=10%, FPR=0%）が、ID3が属性選択基準に用いているゲインは0.07と大きくなる。逆にx_2で分割する場合は、見逃しがない（FNR=0%, FPR=10%）にもかかわらずゲインは0.03と低くなる。このため、見逃しが0になる属性が選ばれなくなる。

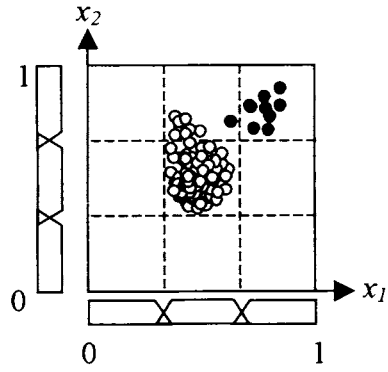


図 3 正常サンプルと異常サンプルの数に偏りのあるデータ

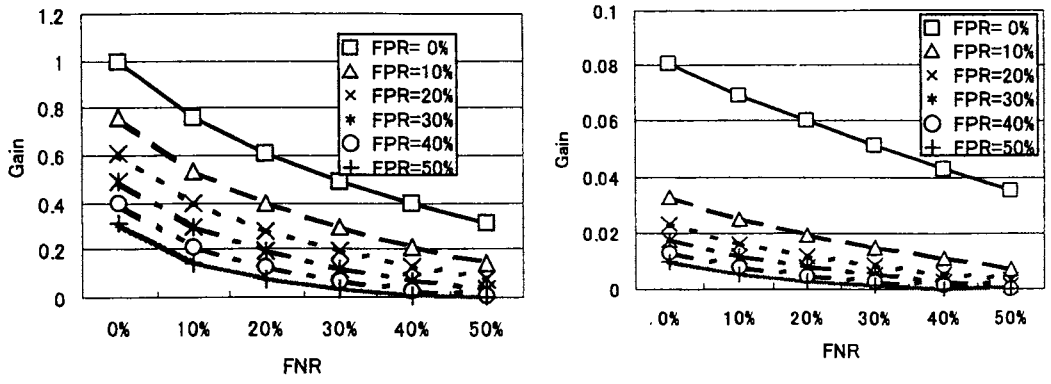
```
If x1=middle Then Class = good with CF = 0.999
If x1=middle Then Class = defect with CF = 0.001
If x1=large Then Class = defect with CF = 1.000
```

図 4 利得基準で選ばれた属性で作られたルール

図5は、利得が過検出率や見逃し率によってどのように変化するかを示したものである。図5(a)は正常サンプルと異常サンプルの割合が1：1の場合の関係を表しており、図5(b)は99：1の場合(歩留まり99%の場合)の関係を表している。図5(a)ではゲインはFNRとFPRに関して対称の関係にあるが、図5(b)ではFPR=0%のときにゲインが大きくなり、それ以外のときはFNRの変化に対してゲインがあまり変化しない。

このことから、現状の決定木生成の分割属性選択基準である利得基準は、良品と不良品が完全に分離されるデータ(FNR=FPR=0%という解が存在する場合)には良好に働くが、良品と不良品の分布にある程度の重なりがあるようなデータではうまく機能しないことがあることがわかる。FNR=0%が要求される検査システム向けの知識生成に適用するには新たな基準の設定が必要である。

また、選択基準を適切に設定して分割属性が適切に選択されたとしても、同じ領域内の正常品の割合が異常品の割合がより多い場合は、ルールのCFが正常品より小さ



(a) 正常:異常=1:1 の場合　　(b)正常:異常=99:1 の場合

図 5　見逃し率(FNR)と過検出率(FPR)とゲインの関係

くなるため、異常品と判定されず、見逃しが発生することになる。後件部や CF の設定方法に関しても何らかの改良が必要である。

4　まとめ

製品検査向けの知識の自動生成に、遺伝的アルゴリズムとファジィ ID3 による学習を適用する際に課題となる項目として、(1) 過検出と見逃しの両方を考慮した評価基準、(2) データ分布の偏りが決定木生成に与える影響の 2 点を取り上げ、考察を行った。(1)については、重みつき調和平均を評価基準として提案し、重みを十分大きく設定することで見逃しをゼロとするような最適化が期待できる。(2)について ID3 の属性選択基準が検査システムにはそのまま適用できないことを示した。今後の課題として、(1)の検証と(2)を解決するための属性選択基準とルールの生成方法の検討を行っていきたい。

【参考文献】

[1] 入江, 古田: 「異音検査システムならびに波形解析診断ソリューションサービス」, 第19回ファジィシステムシンポジウム講演論文集(2003)

[2] 石渕, 村田:「遺伝的アルゴリズムによるファジィ識別ルールの学習」, 電子情報通信学会論文誌, A, Vol.J79-A, No.7, pp1289-1297, 1996

[3] 石渕, 森澤: "ファジィ識別システムにおけるメンバシップ関数の調整", システム制御情報学会論文誌, Vol. 10, No. 5, pp. 223-235

[4] 前田, 古橋, 玉置, 高木, 石渕": 特集：進化的アルゴリズムとファジィ理論", 日本ファジィ学会誌, Vol. 10, No. 4, 1998.8, pp. 582-625

[5] J.R.Quinlan: "Induction of Decision Trees", Machine Learning, Vol.1, pp.81-106

[6] 馬野, 「ID3 に基づくファジィ・ルールの抽出とその推論法」, 第 9 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 pp.857-860

[7] Cezary Z. Janikow: "A Genetic Algorithm for Optimizing Fuzzy Decision Trees"
Larry J. Eshelman (Ed.): Proceedings of the 6th International Conference on Genetic Algorithms, Pittsburgh, PA, USA, July 15-19, 1995. Morgan Kaufmann 1995, pp. 421-428

[8] Cezary Z. Janikow:"A Genetic Algorithm Method for Optimizing Fuzzy Decision Trees", Information Sciences, Volume 89, Numbers 3 and 4, 1996, pp. 275-296

【連絡先】
〒619-0283　京都府相楽郡木津町木津川台 9 丁目 1 番
オムロン(株)　コントロール研究所　糀谷和人
Tel: 0774-74-2018 FAX: 0774-74-2004
Email: kazuto_kojitani@omron.co.jp

パターン認識手法を用いた床版のひびわれ形状の抽出と分類に関する研究

Classification of cracks in concrete slabs using pattern recognition methods

楠瀬　芳之
Yoshiyuki Kusunose
関西大学大学院
Kansai University Graduate School

広兼　道幸
Michiyuki Hirokane
関西大学
Kansai University

古田　均
Hitoshi Furuta
関西大学
Kansai University

Abstract: At present day, public infrastructures such as bridges and roads can be seen all around. The continuous construction of such infrastructures is posing an important problem of how to maintain and efficiently manage an existing structure. In this paper, the characteristics such as the projection histograms and the feature points are extracted. Moreover, the digital images of cracks are classified into different damage levels based on the extracted characteristics through the LVQ system and the SVM system.

1　はじめに

近年は，橋梁や道路等に代表される社会資本の整備が充実し，現状ではこれら既設の土木構造物の維持管理をいかに効率的かつ確実に行うかが新しい課題となってきている．しかし，これまでの構造物の維持管理における健全性の評価は，経験豊富な専門家の直感や工学的判断に頼らざるを得ない状況にある．既設の構造物の老朽化や災害などによるダメージによって，維持補修の必要性が高まる一方，専門家の数は不足しているのが現状である．

本研究は，このような現状を踏まえ，橋梁の床版におけるひびわれを対象に，特徴抽出と分類方法を提案し，効率的な維持管理方法の開発を目的とする．橋梁の床版を撮影したディジタル画像に対して，ひびわれを線パターンとして抽出し，文字認識などの分野で利用さていれる周辺分布ヒストグラム，特徴点の出現度数による特徴抽出を行う．最後にこれらの特徴量を用いて損傷度に基づくひびわれの分類を行い，その有効性を検証する．分類の手法としてLVQ[1]とSVM[2]を適用し，分類結果についてそれぞれの手法の比較を行う．

2　入力データ

本研究では，市販のディジタルカメラによって橋梁の床版部分を撮影した，床版部分にひびわれによる損傷のみを含む画像47枚を使用した．画像の取り込み解像度は水平方向，垂直方向ともに360dpiである．これらの画像に対して 760×480pixel に正規化を行い，グレースケール画像に変換したものを用いる．また，それぞれの画像は床版ひびわれの各点検項目における判定基準に基づき，専門家によって床版の損傷度のより大きなものから，A，B，C の3段階の評価付けが行われている．本研究に使用した画像は観測時において，ホワイトチョークによるひびわれのトレースが行われている．

3　画像処理によるひびわれの抽出

ディジタル画像からのひびわれの検出を図 1 の手順で行う[3]．床版を撮影した画像に対し座標変換を行い，ひびわれ領域を含む床版部分を矩形として抽出する．画像中におけるひびわれ領域の面積は小さく，照明むらにより明るさが一様でないので，画像をブロックに分割し，ブロック単位に判別分析法を適用して 2 値化処理のしきい値を設定する．さらに，個々のブロックをいくつかの小領域に分割し，ひびわれを含む小領域に対して，ブロック単位に設定されたしきい値による 2 値化処理を行う．この 2 値画像に対してカウントフィルタ，4-連結細線化処理および，近接する特徴点間の距離に基づく修正を行った画像をひびわれパターンとして特徴抽出に用いる．

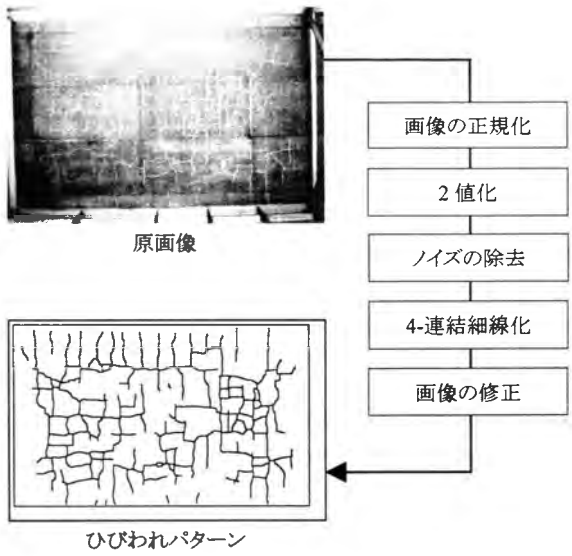


図 1　画像処理によるひびわれの抽出

4　特徴の抽出

実際の専門家によるひびわれの評価においては，ひびわれの連続性，ひびわれの集中性，ひびわれの方向(1 方向性，2 方向性の種別)，亀甲状ひびわれ，または線状ひびわれの種別，の 4 つの基準に基づいて判定がなされている．そこで本研究では，これらの情報を反映する特徴量として周辺分布ヒストグラム，特徴点の出現度数を特徴量として用いた．

4.1　周辺分布ヒストグラム

細線で表現されたひびわれパターンは，文字パターンと同様に方向を持った線素の集合によって構成されていると考えることができ，周辺分布ヒストグラムによる特徴抽出は有効であると考える．周辺分布特徴はパターンの位置情報，量的情報を反映しているので，ひびわれの連続性，およびひびわれの集中性を表現する特徴量として分類に利用することができる．図 2 に示すようにひびわれパターンから水平方向，垂直方向の直交軸上へ射影したヒストグラムを，特徴ベクトルの次元数に応じて量子化し特徴量として用いる．

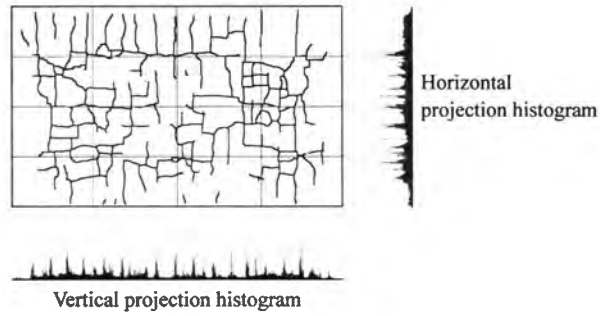


図 2　周辺分布ヒストグラム

4.2　特徴点の出現度数

次に，図 3 に示すように特徴点の出現度数による特徴抽出を行う．細線化された図形における特徴点はパターンの構造的な特徴を表しており，特徴点の出現度数による特徴抽出は有効であると考えられる．ひびわれパターンから交差点，分岐点，端点，および曲率が一定値以上である点を折点として抽出する．特徴点はひびわれパターンの形状情報を反映しているのので，ひびわれの方向(1 方向性，2 方向性の種別)，亀甲状ひびわれ，または線状ひびわれの種別を表現する特徴量として分類に利用することができる．特徴ベクトルの次元数に応じて，ひびわれパターンを複数のブロックに分割し，個々のブロック内における 4 種類の特徴点の出現度数を特徴量として用いる．

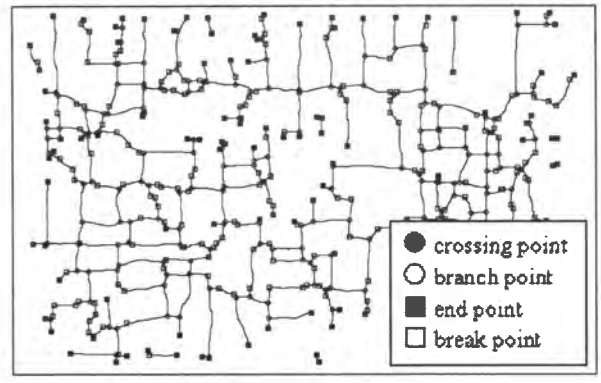


図 3　特徴点の抽出

5 実験結果

本研究では，橋梁の床版を撮影したディジタル画像 47 枚を対象とし，前節の手順で抽出をした特徴量を用いてひびわれ画像の分類を行う．分類の手法として LVQ と SVM を適用し，それぞれの識別精度について比較を行う．LVQ の学習アルゴリズムには OLVQ1 を使用し，テストケースごとに 150 回の学習を行う．学習段階においては，それぞれの画像に対して専門家が行った 3 段階の床版損傷度による評価を教師信号として用いる．テストにおける識別精度の評価は LOO(Leave One Out)で行う．

5.1 周辺分布ヒストグラム

まず、周辺分布ヒストグラムの特徴量を用いてひびわれ画像の分類を行う．作成する特徴ベクトルの次元数はそれぞれ 4 次元，8 次元，16 次元，32 次元である．それぞれの手法における識別結果を表 1，表 2 に示す．

LVQ の識別結果おける最大識別率は特徴次元数 8，および 16 において 80.9%となり，また SVM の識別結果おける最大識別率は特徴次元数 32 において 80.9%となった．これらの結果からひびわれの分類において周辺分布ヒストグラムによる特徴量が有効であると言える．周辺分布ヒストグラムにおける分類では，LVQ ではクラス A の識別率がクラス B の識別率に比べて全体的に高いのに対し，SVM ではクラス A の識別率が LVQ の場合ほど高くないことが確認できる．

表 1　LVQ 識別結果（周辺分布ヒストグラム）

次元数	識別精度(%)			
	A(10)	B(13)	C(24)	TOTAL
4	50	46.2	87.5	68.1
8	80	61.5	91.7	80.9
16	80	61.5	91.7	80.9
32	70	61.5	91.7	78.7

表 2　SVM 識別結果（周辺分布ヒストグラム）

次元数	識別精度(%)			
	A(10)	B(13)	C(24)	TOTAL
4	50	69.2	91.7	76.6
8	60	69.2	91.7	78.7
16	60	61.5	91.7	76.6
32	70	69.2	91.7	80.9

5.2 特徴点の出現度数

次に，特徴点の出現度数による特徴量を用いてひびわれ画像の分類を行う．周辺ヒストグラムの場合と同様に，作成する特徴ベクトルの次元数はそれぞれ 4 次元，8 次元，16 次元，32 次元である．それぞれの手法における識別結果を表 3，表 4 に示す．

LVQ の識別結果おける最大識別率は特徴次元数 4，および 16 において 80.9%となり，また，SVM の識別結果おける最大識別率は特徴次元数 16 において 83.0%となり，特徴点の出現度数における画像の分類では，SVM を用いた場合により良い結果が得ることができた．これらの結果からひびわれの分類において特徴点の出現度数による特徴量は有効であると言える．

表 3　LVQ 識別結果（特徴点の出現度数）

次元数	識別精度(%)			
	A(10)	B(13)	C(24)	TOTAL
4	60	76.9	91.7	80.9
8	60	61.5	91.7	76.6
16	60	61.5	91.7	76.6
32	60	61.5	91.7	76.6

表 4　SVM 識別結果（特徴点の出現度数）

次元数	識別精度(%)			
	A(10)	B(13)	C(24)	TOTAL
4	50	84.6	91.7	80.9
8	60	76.9	91.7	80.9
16	60	84.6	91.7	83.0
32	50	84.6	91.7	80.9

5.3 特徴量の組み合わせ

各特徴量を単独で用いた場合でも 80%を超える識別率を得ることができた．しかし，それぞれの特徴量において各クラスの識別結果の被覆が異なることから，これら 2 つの特徴量をうまく組み合わせることにより，より高い識別率が得られると考えられる．そこで，16 次元の特徴点の出現度数特徴量と 4 次元,8 次元,16 次元，32 次元の周辺分布ヒストグラム特徴量を組み合わせて，LVQ と SVM による学習識別を行った．それぞれの手法における識別結果を表 5，表 6 に示す．

LVQ の識別結果おける最大識別率は特徴次元数 20 において 80.9%となり，各特徴量単体で用いた場合と同様の識別率であり，特徴量を組み合わせて用いることにより識別率を改善することはできなかった．一方，SVM の識別結果おける最大識別率は特徴次元数 24，および 32 において 85.1%となり，特徴量を組み合わせて用いることにより識別率が改善されることを確認できた．

表 5　LVQ 識別結果（特徴量の組み合わせ）

次元数	識別精度(%)			
	A(10)	B(13)	C(24)	TOTAL
20(4+16)	50	61.5	87.5	72.3
24(8+16)	60	61.5	91.7	76.6
32(16+16)	60	69.2	91.7	78.7
48(32+16)	60	76.9	91.7	80.9

表 6　SVM 識別結果（特徴量の組み合わせ）

次元数	識別精度(%)			
	A(10)	B(13)	C(24)	TOTAL
20(4+16)	50	84.6	91.7	80.9
24(8+16)	70	84.6	91.7	85.1
32(16+16)	70	84.6	91.7	85.1
48(32+16)	70	61.5	91.7	78.7

6　おわりに

本研究では，橋梁の床版におけるひびわれを対象に，線パターンとして形状を抽出し，周辺分布ヒストグラム，および特徴点の出現度数による特徴量を用いて損傷度に基づくひびわれの分類を行い，その有効性の検証を行った．分類の手法としてLVQとSVMを適用し，分類結果についてそれぞれの手法の比較を行った．その結果，それぞれの特徴量において80%を超える高い識別率が得られ，提案した特徴抽出手法が有効であることを確認できた．また，LVQ と SVM のそれぞれの手法における分類結果を比較した結果，SVM を用いた場合に，より良い結果を得ることができることを確認した．今後の課題として，複数の専門家による床版損傷度の評価を考慮に入れ，より信頼度の高い分類を行う方法，また，ひびわれ以外の要素も考慮した総合的な床版の診断方法を検討することが必要である．

参考文献

[1] T.コホネン ： 自己組織化マップ，シュプリンガー・フェアラーク東京， pp.227-246(2000)

[2] T.Joachims ： LEARNING TO CLASSIFY SUPPORT VECTOR MACHINES， Kluwer Academic Publishers， 2002

[3] 酒井幸市 ： デジタル画像処理入門， CQ出版社， 2002

連絡先:

〒569-1095

大阪府高槻市霊仙寺町2－1－1

関西大学 総合情報学部 総合情報学科

広兼 道幸

電話: 072-690-2402

FAX: 072-690-2402

Email: hirokane@res.kutc.kansai-u.ac.jp

異常検出のための TCP シーケンスモデル

TCP Sequence Model for Anomaly Detection

安井 浩之
Hiroyuki YASUI
武蔵工業大学
Musashi Institute of Technology

Anomaly Detection is a kind of Intrusion detection system (IDS), which detects intrusions from anomaly in network traffics or computer actions. To detect of the anomaly in network use, it is necessary to define the characteristic of normal traffics of target network, which is called network profile. In this report, TCP sequence model as network profile is proposed. TCP sequence model is made from the time series of TCP packet quantized by SOM.

1. はじめに

侵入検出システム(IDS)は、外部ネットワーク(インターネット)に接続された LAN 内のコンピュータやネットワーク機器に対する侵入行為を検出して、LAN 管理者に警報を発するシステムである．通常は IDS と Firewall を併用するなどの多重システムで LAN のセキュリティを高める．

IDS には、不正検出(Misuse Detection)型と異常検出(Anomaly Detection)型がある．前者は既知のセキュリティホール等への攻撃などを検出するもので、シグネチャと呼ばれる侵入パターンとのマッチングにより検出する．侵入検出精度が高いため、実運用されている多くの IDS がこの手法を採用しているが、シグネチャに含まれない未知の攻撃には対応できない．一方、後者はプロファイルと呼ばれる平常時の特徴量を自動的に生成し、監視時の特徴量との差異から異常を検出する．そのため、未知の攻撃の検出が可能となることが期待されている．

本研究では、TCP セッションにおけるパケットの時系列をモデル化したものをプロファイルとする異常検出型 IDS の構築を目的としており、いままで[1-5]のようなモデルを提案してきた．

今回の報告では、SOM を用いて量子化した TCP パケットの時系列データをマルコフ連鎖・ファジィマルコフ連鎖でモデル化した TCP シーケンスモデルを提案し、それぞれのモデルの有効性を検証した結果を述べる．

2. 異常検出型 IDS

異常検出型 IDS は、コンピュータの動作やネットワークトラフィックなどの多くのパラメータから経験的・統計的に抽出した平常時の特徴（プロファイル）と監視時の特徴量を比較することで異常を検出する．そのため、不正検出型では検出できない未知の侵入に対する有効性が期待されている．一方、通常の通信が異常であると誤検出する場合や既知の侵入に対しての検出漏れも発生する可能性があるため、現段階では実用システムにはほとんど採用されていないのが現状である．

3. ファジィマルコフ連鎖

マルコフ連鎖は確率的に状態を遷移する非決定性状態遷移モデルである．状態が q_0 から q_n までの n+1 あるとき、ある時刻 t において状態 q_i である確率を $P^t(q_i)$、状態 q_i から q_j への遷移確率を $P(q_j \mid q_i)$ とすると、時刻$(t+1)$に状態 q_j である確率は、

$$P^{(t+1)}(q_j)=\sum_{i=0}^{n} P(q_j \mid q_i)P^t(q_i) \qquad (1)$$

となる．ファジィマルコフ連鎖[6]は、状態遷移をファジィルールと見なした非決定性状態遷移モデルで、ある時刻 t において状態 q_i である度合を $\mu^t(q_i)$、状態 q_i から q_j への遷移の度合を $R(q_i,q_j)$ とすると、時刻$(t+1)$に状態 q_j である度合は、

$$\mu^{(t+1)}(q_j)=\bigcup_{i=0}^{n} R(q_i,q_j)\wedge \mu^t(q_i) \qquad (2)$$

となる．

4. TCP シーケンスモデル

TCP はパケット通信方式であり、通信相手とのコネクション(通信路)を確立してから開始され、終了するまで同一コネクション上で情報のやり取りを行う．この開始から終了までの通信を TCP セッションと呼ぶ．またセッション開始時には、3 ウェイハンド

シェイクと呼ばれる定型の開始手順を持っており、TCPセッション中の通信は、要求パケットに対して応答パケットを返送するというスタイルを取る.
これらのことから、TCPのパケットの順序には何らかの秩序が存在していると予想できる.
この予想に基づき、TCPセッションにおけるパケットの時系列をモデル化することで、TCPセッションのプロファイルを定義できると考えた. このモデルをTCPシーケンスモデルと名付ける.
TCPシーケンスモデルは、HTTPやSMTPのようなサービスポートごとに異なると仮定した. これは、サービスごとに通信される情報の形式（アプリケーションプロトコル）が異なるためである.
時系列の個々のデータには、TCPパケットの持つコードビット（通信制御用のデータ）とデータ長、セッション開始要求を出した送信元からの通信の向きを採用した. 他にもシーケンス番号（セッション開始からのデータの位置）やIPパケットのヘッダ情報なども利用可能であるが、モデルをできるだけ単純にするために採用しなかった.
時系列モデルとしては、マルコフ連鎖とファジィマルコフ連鎖を用いる. これは、TCPの要求パケットに対する応答パケットは決定論的ではなく、むしろ確率論的に決まるであろうと予測されるためである. また、観測データから容易にモデルを生成できるため、常に最新のモデルに自動更新しつづけることが可能であり、異常検出のためのプロファイル生成に向いているといえる.
各モデルの持つ状態には、個々の時系列データを用いるが、そのままではパケット長やコードビットの組合わせ分の状態数が必要となるため、類似する状態をまとめることで状態数を減らす（量子化する）ことにした. ここではSOMを用いてパケットを分類し、各パケットに対応するマップの位置で状態を表すことにした.
既にSOM[6]やマルコフ連鎖[7]を用いた異常検出手法がいくつか提案されているが、全体としての利用傾向から異常を検出するようなものであるため、異常の原因となったTCPセッションを特定することができない. そのため、異常への対応を的確に行うことが難しく、システム管理者への負担も大きくなってしまう. 一方、提案する本モデルの場合は、1つ1つのTCPセッションに対しての監視を行うため、原因の特定や対処を迅速に行うことができるという利点を持っている.

5. SOMの学習

SOMには、SOM_PAKv3.1[8]を用い、12×12、12×24のhexagon、rectangle（それぞれHEX12、HEX24、REC12、REC24とする）で、全て1次学習（1000回、α=0.05、近傍半径10）、2次学習（10000回、α=0.02、近傍半径3）とした. 初期値は同一の乱数seedより生成して、10回の試行でもっとも誤差の少ないものを採用している.
学習には、テスト時に用いない65563パケットのデータ（1日分の測定データ1490セッション分）を用いる. また、このデータには観測された全てのTCPセッションが含まれており、さまざまなサービスポートのセッションや不完全なセッションなども含まれている. こうすることで、SOM上にこれらのパケットに対応する領野も生成されることになり、監視対象とするサービスポート上では現れないようなパケットを、正規のパケットと同じ領野に分類してしまう誤分類を低減することが期待できる.

6. プロファイル作成

プロファイルは学習したSOMにプロファイル作成用データをサービスポートごとに適用し作成する.
まず、セッションの始まりから終わりまでのパケットからSOMへの入力ベクトルを順次取り出し、ニューロン毎に発火した度数と次に発火するニューロンの度数を求める. これを全てのセッションに対して求めることで、初期状態の確率、状態遷移確率がそれぞれ求められる. これがTCPシーケンスモデル（マルコフ連鎖、ファジィマルコフ連鎖）となる.
ファジィマルコフ連鎖モデルの場合、各確率を各度合とみなすこととする.
異常の判断は、観測されたTCPセッションが各モデルに受理されるかどうかで行う. 通常は式(1)、(2)が0となる場合を非受理とするが、これでは両モデルで同じ結果しか得られない. そこで閾値未満の場合を異常とすることとした. 但し、マルコフ連鎖モデルの場合は時系列が長いほど確率が小さくなってしまうので、式(1)で求めた確率ではなく、平均遷移確率（時系列長Nの場合はN乗根）を用いている.

7. モデルの評価

今回は、http、https、smtp、ftp、sshについてモデルを作成したが、httpを除く4つのサービスポートに関しては、充分な数のデータが得られなかったため、http（7560セッション分）についてのみモデルの評価を行った. 残る4つのモデルについては、今

後さらに時間をかけて作成していく予定である．
異常検出手法の評価は、誤検出率と実際の侵入検出能力により行うのが一般的である．特に「異常イコール侵入」ではないことから、誤検出率を低く抑えることができないと誤警報が頻発してしまい、本物の侵入に対しての警報が埋もれてしまうことになるため、誤検出率を低く抑えることが重要となってくる．一方、TCP シーケンスモデルは 1 つ 1 つの TCP セッションでのパケットの傾向を対象とすることから、サービスポートの本来の使い方を逸脱したような利用、例えば、ファイアウォールで開けてあるサービスポートと使って、別のサービスポート用の通信を行うような不正利用を検出するのに向いていると考えられる．

誤検出率

8 日分のデータを用いてプロファイル作成をし、テスト用のデータ（1 日分）に適用した結果を示す．グラフは、1 日分、2 日分、…とプロファイル作成に用いたデータを増やしていくことで、誤検出率がどのように低下していくかの様子を示している．
なお、勾配が一様でないのは 1 日あたりのデータ数がそれぞれ異なるためである．(表 1 参照)
マルコフ連鎖(図 1)とファジィマルコフ連鎖(図 2)のいずれも同じような傾向を示しており、両者の差はほとんど無い．また、マップサイズが小さい方（HEX12、REC12）が誤検出率も低くなっているが、これは小さいマップのほうが状態数も少なくなるので当然の結果かもしれない．
誤検出率は 1%未満程度が望ましいので、もう少し多くのデータが必要である．

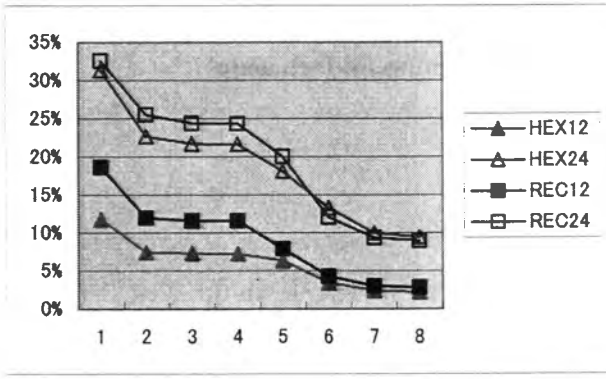


図 1 マルコフ連鎖モデルの誤差率

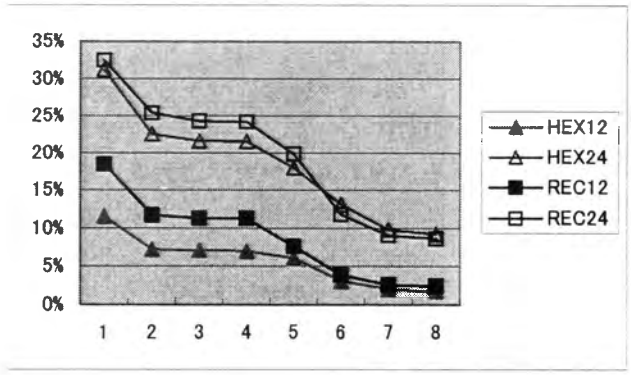


図 2 ファジィマルコフ連鎖モデルの誤差率

表 1 累計セッション数

	1	2	3	4	5	6	7	8
数	3789	7105	7597	7732	10246	15676	21077	22837

異常検出テスト

誤検出と同様に 8 日分のデータを用いてプロファイル作成をし、8 日目のプロファイルに対して、他のサービスポート用のテストデータ（1 日分）に適用した結果を示す．結果はサービスポートごとの検出率（パーセント）であり、左の値がマルコフ連鎖モデル、右の値がファジィマルコフ連鎖モデルである．
（ポート名の横はテストに用いたセッション数）

表 2 異常検出テスト

MC/FMC(%)		HEX12	HEX24	REC12	REC24
https	96	95.8/95.8	99.5/99.0	92.7/92.7	97.9/92.7
smtp	43	100/100	100/100	100/100	100/100
ftp	1	100/100	100/100	100/100	100/100
ssh	2	100/100	100/100	100/100	100/100

ftp と ssh はデータ数が極端に少ないため、あまり意味は無いが、smtp とともに 100%検出に成功している．https（SSL で暗号化された http セッション）は、若干低い値となっているが、https 自体が http を暗号化した通信であることを考えると検出できないパターンがあるのは仕方が無いだろう．また、ここでは示していないが、プロファイル生成に用いたデータが増えるに従い、検出率が悪くなることが判明した．これは、プロファイルである TCP シーケンスモデルが受理するパターンが増えていくことに原因があると考えられる．
一方、マルコフ連鎖とファジィマルコフ連鎖での差はほとんど無いことが判った．

考察

以上の結果から、マルコフ連鎖、ファジィマルコフ連鎖で作られた TCP シーケンスモデルをプロファイルとして用いることの有効性が示された．また、両者の性能にはほとんど差が無いことから、演算が簡単なファジィマルコフ連鎖を採用することで、異常検出型 IDS の負荷低減が期待される．

9. まとめ

本報告では、SOM を用いた TCP シーケンスモデルを提案し、その誤検出率と異常検出テストについて述べた．その結果、充分なプロファイル生成データが用意できれば、誤検出率を充分下げることができること、他のサービスポートの通信をほぼ 100%検出できることが明らかになった．また、マルコフ連鎖とファジィマルコフ連鎖の TCP シーケンスモデルにはほとんど差が無いため、生成に負荷の少ない Min、Max 演算を用いるファジィマルコフ連鎖を用いることで、IDS の負荷低減が期待できることも判った．

今後は、既存の攻撃手法を試行した場合にどの程度の認識ができるかの実験を行う必要がある．

参考文献

[1]川島清幸，安井浩之，松山実：ネットワークプロファイリングによる異常検出手法の提案，情報処理学会第 63 回全国大会講演論文集 3, pp.487-488

[2]川島清幸，安井浩之，松山実：ネットワークプロファイリングを用いた異常検出型 IDS の実装と運用，情報処理学会第 64 回全国大会講演論文集 3, pp.375-376

[3]松永武，安井浩之，松山実：パケットヘッダのパターン解析による未知の不正アクセスの検出，情報処理学会第 64 回全国大会講演論文集 3，pp.381-382

[4]松永武，安井浩之，松山実：パケットヘッダのパターン解析による未知の不正アクセスの検出~提案手法による結果と評価～，情報処理学会第 65 回全国大会講演論文集 3, pp.543-544

[5]安井浩之，川島清幸，松山実：SOM を用いた異常検出型侵入検知システム，第 18 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.95-96

[6]Avrachenkov, K. E., Sanchez, E. : Fuzzy Markov Chains and Decision-Making, Fuzzy Optimization and Decision Making, 1, pp.143-159

[7]Nguyen, B.V. : Self Prganizing Map(SOM) for Anomaly Detection, CS680 (Advanced Topics in Artificial Intelligence) report, Ohio University

[8]Ye, N. : A Markov Chain Model of Temporal Behavior for Anomaly Detection, Proc. of the 2000 IEEE Workshop on Information Assurance and Security, pp.171-174

[9]http://www.cis.hut.fi/~hynde/lvq/ : SOM_PAK, Neural Networks Research Centre

連絡先

〒158-8557

東京都世田谷区玉堤 1-28-1

武蔵工業大学　情報処理センター

安井浩之

yasui@ipc.musashi-tech.ac.jp

ファジィＩＤ３を用いた交通手段選択行動の分析
Analysis of Modal Choice Behaviour with Fuzzy ID3

奥嶋　政嗣
Masashi OKUSHIMA
岐阜大学
Gifu University

秋山　孝正
Takamasa AKIYAMA
岐阜大学
Gifu University

Abstract　The decision tree is regarded as an inductive technique of machine learning. The study aims at proposing the knowledge base estimation for travel behaviour analysis with learning process. The decision three algorithms such as ID3 and fuzzy ID3 are introduced to produce the rule bases to describe the knowledge in the decision of trip makers. The advantages of the decision tree algorithms can be summarized through the analysis of modal choice for commuters in urban area with empirical data.

１．はじめに

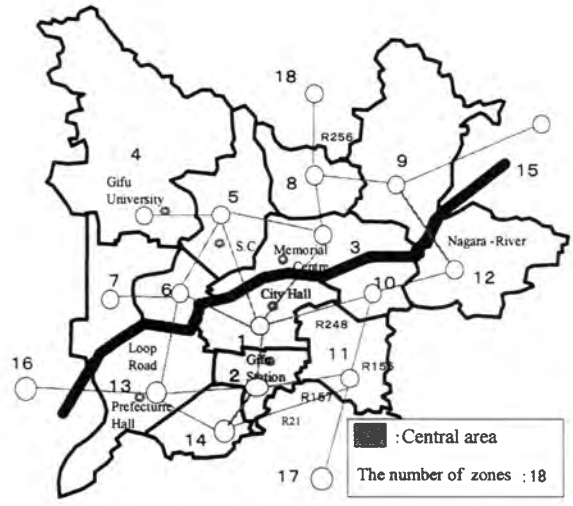
都市交通政策評価のための交通需要予測では、より高い推計精度をもった交通行動モデルの構築が重要な課題である。これまで，交通行動データの収集のため，各都市圏においてパーソントリップ調査が行われ，数多くの交通行動データが蓄積されてきている．これらの交通行動データから，交通行動における意思決定過程の帰納的な機械学習を本研究の目的とする．

本研究では決定木分析手法の１つであるファジィID3を用いて，交通行動における選択行動ルールの帰納的学習をおこなう[1)2)]．ここでは交通行動の意思決定過程における１プロセスである交通手段選択行動について具体的に分析する．交通手段選択行動における意思決定構造の階層性について分析し，ファジィID3による交通手段選択モデルの有効性を検証する．また，ID3およびファジィC4.5の決定木分析手法についても，導出された行動ルールの特徴について比較検討する[3),4)]．次に検証用データへの決定木形式の行動ルールの適用により，その有用性を確認する．最後に枝刈による交通行動ルールの明確化について検討を行う．

２．交通手段選択行動の分析方法

２．１　交通手段選択行動データ

本研究では，**図－１**に示す岐阜市都心部への出勤トリップを対象として，交通手段選択行動の特性を分析する．ここでは，出勤トリップであることから，出発地ゾーン（居住地）と目的地ゾーン（勤務地）が与えられたとして，その間の交通手段を①自動車利用，②公共交通機関利用，③その他（徒歩・二輪など）の３項から選択するモデルを作成する．これは所要時間や所要費用などの交通サービス水準に対する利用者個々の交通手段選択行動を分析することにより，都市交通政策が適用された場合の交通手段別トリップ数を的確に把握しようとするものである．



図－１　対象地域と都心部ゾーン

対象データとしては，第３回中京都市圏パーソントリップ調査データ（ＰＴデータ）を用いる．ＰＴデータには，中京都市圏全人口から3%の無作為抽出されたサンプルについて，個人属性データと平日１日の交通行動データが格納されている．このＰＴデータより，岐阜市内の居住地から岐阜市都心部の勤務地への出勤目的のトリップをおこなった 1183 サンプルを抽出して，分析対象データとした．

2．2　交通手段選択要因

ここでは出勤トリップにおける交通手段選択の要因となる項目について検討する．交通手段選択の要因として，サンプルの個人属性と出発時刻および各交通手段の所要時間，所要費用などが上げられる．

決定木分析手法を適用するにあたっては，交通手段選択要因となる数値データについても，カテゴリー変数として分類しておく必要がある．各選択要因のカテゴリーを**表—1**に示す．

3．交通手段選択行動モデル作成

3．1　帰納学習による決定木作成

ここでは，決定木分析手法による交通手段選択行動モデルを帰納的な機械学習により構成する．決定木による交通手段選択モデル作成のため，分析対象データにおける約20%にあたる215サンプルを抽出し，学習用データとした．学習用データを用いて，ID3およびファジィID3のアルゴリズムにより，交通手段選択行動の帰納的な機械学習をおこなった．構築された2種類のモデルの決定木の特徴をみていく．

ID3アルゴリズムによって，節点数：232，葉節点数(ルール数)：115の決定木が生成された．上位の3階層には，「免許」，「所要時間」，「世帯人数」の属性が分類基準として採択された．

次にファジィID3アルゴリズムによっては，節点数：350，葉節点数(ルール数)：168の決定木が生成された．上位の3階層には，「所要時間（自動車)」，「保有台数」，「免許」，「世帯人数」，「所要時間（自動車)」の5属性が分類基準として採択された．上位3層までの木構造を**図－2**に示す．「世帯人数」などカテゴリーの分類数が多い属性が，上位で採択され，比較的広い木である．

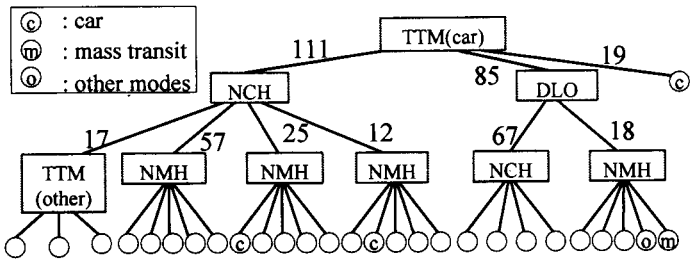
ここで比較対象となるロジットモデルについて説明する．ロジットモデルでは，各変数xにより式—1で規定される選択率を算定し，交通手段が決定される．

$$P_{in}=\frac{\exp(\sum\theta_{ink}\cdot x_{ink})}{\sum\exp(\sum\theta_{ink}\cdot x_{ink})} \qquad (式-1)$$

ロジットモデルは交通手段選択モデルとして，広く適用されている．学習データを用いて推定したロジットモデルにより示される要因の，順序関係をみておく．ロジットモデルでは，「免許」，「保有台数」，「性別」，

表－1　交通手段選択要因のカテゴリー

項目	変数名	カテゴリー				
世帯人数	NMH	1人世帯	2人世帯	3人世帯	4人世帯	大世帯
保有台数	NCH	1台	2台	3台	4台以上	—
性別	SEX	男	女	—	—	—
免許	DLO	有	無	—	—	—
年齢	AGE	青年層	中年層	老年層	—	—
出発時刻	DTM	ピーク時	ピーク後	朝以外	—	—
所要時間	TTM	小	中	大	—	—
所要費用	TCM	小	中	大	—	—



図－2　Fuzzy ID3による交通手段選択決定木の上位

「世帯人数」の順にt値が高くなっており，「所要時間」は比較的低い値が示されている．カテゴリカルデータとして扱ったID3では上位層の分類基準であることから，トリップメーカーは「所要時間」対して，線形的ではなく非線形的な判断を行っているといえる．

3．2　学習データによる推計精度の検証

構築した交通手段選択モデルについて，学習用データによる推計精度の検証をおこなう．学習データでの適合度を**表－3**に示す．ID3およびファジィID3ともに高い適合度を示しており，ロジットモデルで記述できていない意思決定構造を，決定木分析手法では帰納的な機械学習により表現可能としている．

表－3　学習データでの適合率

手法	適合数	適合率	誤分類数
ID3	206	95.81%	(9/215)
Fuzzy ID3	207	96.28%	(8/215)
Logit	139	64.65%	(76/215)

ファジィID3における誤分類となった8サンプルの属性について，**表－4**に示す．これらのうち6サンプルの属性は，世帯人数が多く，保有台数1台で免許保有者である．この場合，保有車両のメインユーザーで

表－4　Fuzzy ID3での誤分類サンプル

	実績手段	推計手段	出発時刻	所要時間			世帯人数	保有台数	性別	年齢
				Car	MT	Other				
1	Car	Other	8:35	15	21	12	4	1	2	40
2	Car	MT	8:00	15	21	12	4	3	2	28
3	MT	Car	7:50	13	40	12	4	1	1	39
4	Other	Car	7:15	13	30	10	5	1	1	49
5	Other	Car	7:00	20	30	5	4	1	1	41
6	MT	Car	8:50	30	40	23	2	1	1	58
7	MT	Car	8:08	17	22	18	4	1	2	31
8	Other	Car	8:15	21	33	15	5	1	1	44

あるか判断するのは困難であり，そのため誤分類となっている．これらはID3やロジットモデルなど他のモデルでも誤分類となっている．

それぞれの推計モデルによる交通手段選択比率を，図－3に示す．ID3・ファジィID3ともに実績値との乖離はほとんどなく，実績値で利用者数の多い交通手段の過大推計となっているロジットモデルよりも，推計精度としては十分であると考えられる．

ここではID3・ファジィID3での交通手段選択モデルについて学習データによる推計精度について検討した．また，C4.5およびファジィC4.5についても，決定木を作成し分析をおこなっている．C4.5およびファジィC4.5はともに，カテゴリー数の少ない属性を上位層で分類基準として採択する傾向があり，「性別」などが上位層で採択され，「世帯人数」，「保有台数」などは上位層での分類基準としては採択されなくなる．ファジィC4.5の3階層目の節点数は11であり，ファジィID3の27に比べ狭い木となっていることが確認できる．しかしながら，誤分類サンプルについては，ファジィID3とファジィC4.5では全く同一で，相違点は見られない．

4．交通手段選択への適用性の検証

ここでは交通手段行動決定木を，対象データすべてのサンプルに適用し，その有効性を確認する．また，例外的な交通行動をとったサンプルへの過度の適合による過学習を防止するために，ファジィID3決定木を対象に事後枝刈を行う．

4．1　交通手段選択行動決定木の適用

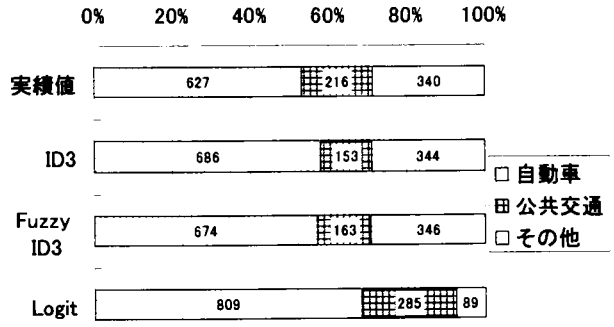
前章では対象データから学習用データを抽出して学習を行っている．ここでは機械学習によって構成された決定木を対象データ全体に適用し，調査データに対するモデルの有効性について検証する。

全サンプル（1183サンプル）への決定木の適用による適合率を**表－5**に示す．ID3では適合率が63%となるのに比べ，ファジィID3では77%と誤分類が少なくなっている．このことから，ファジィID3では，所要時間などのファジィ性を考慮しているため，ルールが柔軟な構造となっている．

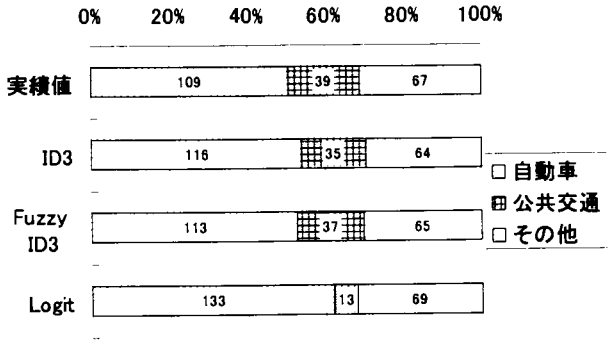
全対象データでの交通手段別トリップ数の比率を，**図－4**に示す．その他の割合については適合しているが，自動車利用の割合が多くなり，公共交通利用の割合が少なく推計されている．

表－5　全対象データでの適合率

手法	適合数	適合率	誤分類数
ID3	746	63.06%	(437/1183)
Fuzzy ID3	907	76.67%	(276/1183)
Logit	497	42.01%	(686/1183)



図－4　全対象データでの交通手段別トリップ数



図－3　交通手段別トリップ数推計結果

4．2　調整済み誤分類率による事後枝刈り

データマイニングの分野において，過学習防止のための方法として，決定木の事後枝刈がいくつかの方法により提案されている[5)6)]．これは調整済み誤分類率AEを，誤分類率Eとリーフ数LCにより，式−2のように定義して，AEを最小とするリーフ数LCを判定するものである．

$$AE = E + \alpha LC \qquad \text{(式−2)}$$

αの変化によるリーフ数と誤分類数の変化を**図－5**に示す．ここで，検証データにより各部分木の調整済み誤差分類率を算定し，最も調整済み誤差分類率の低い部分木を事後枝刈による決定木として採用する．

枝刈による各部分木のリーフ数と調整済み誤分類率の関係を**図－6**に示す．リーフ数の増加に伴い，学習データによる調整済み誤分類率とデータベースによる調整済み誤分類率の乖離が明確に見られる．このことから，枝刈前の決定木は過学習であると考えられる．

事後枝刈後の決定木として，ここでは検証データでの調整済み誤分類率が34.2%で最小となるリーフ数32の部分木について検討する．このとき，学習データの誤分類数は，66サンプル（30.7%）であり，枝刈前の決定木の誤分類数と比較して，大幅に増加する．しかしながら，検証データでの誤分類数は，405 サンプル（37.2%）であり，あまり誤分類数は増加していない．

ここでファジィ ID3 の枝刈後の誤分類数は，ID3 の枝刈なしの誤分類数（437 サンプル：36.94%）よりも少ない．このことより，ファジィ ID3 は，メンバシップ関数の導入により，頑健性が高いといえる．

事後枝刈による決定木の概形を図－7に示す．この決定木は，枝仮前の決定木の上位３層に３つの葉節点のみが付与されたシンプルな構造となっており，所要時間（自動車），保有台数，免許，世帯人数，出発時刻の５変数で，32 の行動ルールを構成している．ここでは「所要時間（自動車）が短時間であっても，世帯人数以上の保有台数があれば，自動車を利用する.」のようなルールが明確化されている．

5．おわりに

本研究では，交通行動モデルの意思決定過程を，帰納的な機械学習で構成することを目的とし，ファジィID3アルゴリズムを用いて交通手段選択行動決定木を作成した．本研究の成果は以下のように整理できる．

①ファジィID3により交通手段選択における意思決定過程を，交通行動データから帰納的に学習し，その推計精度について確認した．これより，ファジィID3での交通手段選択モデルの有効性を示した．

②検証データを用いて，交通手段選択モデルの推計精度を比較し，ファジィID3によるモデルの頑健性を示し，交通需要予測への適用性を検証した．これより，ファジィID3による交通手段選択モデルは十分に，実用的であることがわかった．

③ファジィID3決定木について，調整済み誤差分類率による事後枝刈をおこない，都心部への出勤時における交通手段選択行動規範として，32の明確な基本ルールを示した．これより，決定木の意味解釈が容易になり，意外な行動ルール発見の可能性を高めた．

今後の課題としては，学習データの抽出方法におけるモデル構造の相違の特性を把握することがあげられる．

最後に本研究は、平成 15 年度科学研究費補助金基盤研究(C)(2)14550528 の研究成果の一部であることを付記する。

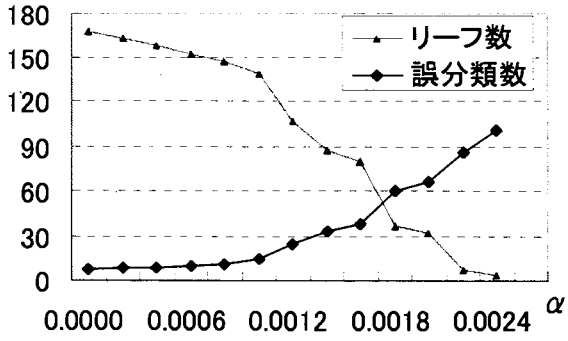


図 - 5　枝刈によるリーフ数と誤分類数の推移

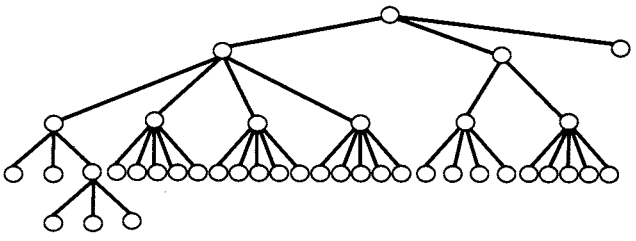


図 - 7　事後枝刈による決定木の概形

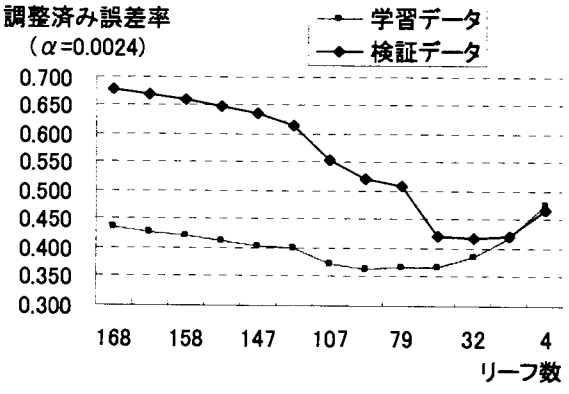


図 - 6　枝刈による調整済み誤分類率の推移

【参考文献】

1）馬野元秀，岡本宏隆，鳩野逸生，田村坦之ら：「ＩＤ３に基づくファジィルールの抽出とその推論方法」，第９回ファジィシステムシンポジュウム講演集，pp. 857-860, 1993.

2）馬野元秀，岡田貴祐，鳩野逸生，田村坦之：「データベースからのファジィ知識の発見」，第 23 回知能システムシンポジュウム講演集，pp. 13-18, 1996.

3）Quinlan, J. R.: C4.5: Programs for Machine Learning, Morgan Kaufmann Series in Machine Learning, 1993.

4）堀和憲，馬野元秀，瀬田和之，宇野裕之：「ファジィ決定木生成法　ファジィ C4.5 とその改良（その２）」，第 17 回ファジィシステムシンポジュウム講演集，pp. 739-742, 2001.

5）SAS インスティチュートジャパン，江原淳，佐藤栄作（共訳）：「データマイニング手法」，海文堂出版，1999

6）福田剛志，森本康彦，徳山豪：「データマイニング」，共立出版，2001

【問い合わせ先】
〒501-1193　岐阜県岐阜市柳戸 1-1
岐阜大学工学部社会基盤工学科　　奥嶋　政嗣
TEL　058-293-2446　　FAX　058-230-1528
E-mail：okushima@cc.gifu-u.ac.jp

認知所要時間のファジィ性を考慮したナビゲーション情報の影響分析

An Analysis of the Influences of Route Navigation Systems Considering the Fuzziness of Anticipated Travel Times of Drivers

小川　圭一
Keiichi OGAWA
立命館大学
Ritsumeikan University

Abstract: This research proposes a route choice behavioural model within the influences of route navigation systems. It is supposed that the drivers replace traffic situation of the route as a fuzzy anticipated travel time. Based on the proposed model, route choice behaviours of the drivers are analysed and the influences of traffic information and route navigation systems for the drivers are evaluated.

1．はじめに

現在、ITS の進展にともない、車載情報機器を通じたドライバーに対するリアルタイムの交通情報提供がおこなわれるようになってきている。

本研究では、このような車載機器に表示されるナビゲーション情報を想定し、交通情報が提供された場合におけるドライバーの経路選択行動の分析をおこなう。具体的には、アンケート調査における被験者の認知所要時間について分析し、ドライバーのもつ認知所要時間のあいまいさについて検討する。つぎに、それを踏まえて認知所要時間のファジィ性を考慮した経路選択行動のモデル化をおこなう。これにより、車載機器によるナビゲーション情報が提供された場合における、ドライバーの経路選択行動について分析をおこなう。

2．認知所要時間に関する分析

本章では、アンケート調査の回答における被験者の認知所要時間について分析し、ドライバーのもつ認知所要時間のあいまいさについて検討する。

本章で用いるデータは、2003 年 1 月に立命館大学理工学部学生を対象におこなったアンケート調査（調査 1）と、2000 年 12 月に岐阜大学工学部学生を対象におこなったアンケート調査（調査 2）にもとづくものである。これらはいずれも、何らかの仮想的な交通情報提供に対するドライバーの反応行動を分析するものであり、対象経路に対するドライバーの認知所要時間について質問をおこなっている。

図-1 は、各々の調査における認知所要時間の回答値について、交通情報の有無、および想定する交通情報の種類による違いをみたものである。これをみると、調査 2 で所要時間情報が提供された場合のみが 1 分単位で回答しているものが増加しているが、その他は提供情報の有無にかかわらず、5 分単位、もしくは 10 分単位での値による回答が多いことがわかる。

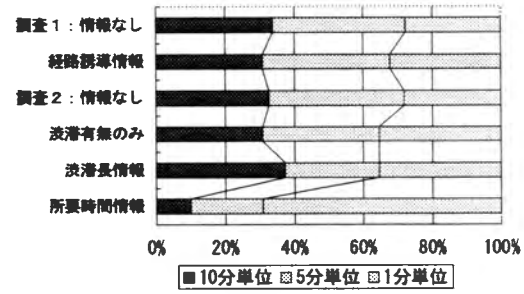


図-1　提供情報の種類による認知所要時間の比較

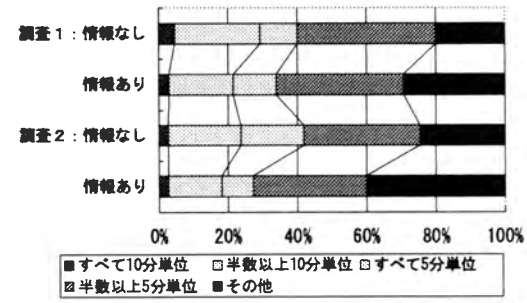


図-2　被験者ごとの認知所要時間の回答の傾向

つぎに、このような認知所要時間の回答値について、被験者ごとに傾向をみることにする。アンケート調査では 1 人の被験者に対し、複数の OD や経路の所要時間について同様の質問をおこなっている。そこで、各々の被験者について「すべての質問について 10 分単位の値で回答」「半数以上の質問について 10 分単位、その他は 5 分単位の値で回答」「すべての質問について 5 分単位の値で回答」「半数以上の質問につい

て5分単位の値で回答」「その他（半数以上の質問について1分単位の値で回答）」の5種に分類し、その比率をみることにする。この結果を図-2に示す。

これをみると、対象経路に交通情報がない場合での認知所要時間の値は、40%程度の被験者がすべて5分単位もしくは10分単位の値で回答していることがわかる。また半数以上の質問を5分単位の値で回答した被験者を加えると、70～80%程度となる。また何らかの交通情報がある場合の認知所要時間についても、30%程度の被験者がすべて5分単位もしくは10分単位の値で、60～70%程度の被験者が半数以上の質問を5分単位の値で回答していることがわかる。

これらにより、多くのドライバーは想定する状況の如何、また提供される交通情報の有無にかかわらず、5分ないしは10分程度の単位で所要時間を区分して認知しており、5分未満の所要時間の違いについてはあまり認知できていないことが推察される。

3．経路選択行動に関する分析

つぎに、ドライバーの経路選択行動のモデル化について考える。分析に用いるデータは、調査1でおこなった仮想的な経路選択行動に関するものである。

アンケート調査は、車載情報機器を想定したディスプレイ上にナビゲーション情報が提示されることを想定し、画面上の地図情報にもとづいた経路選択行動を問うものである。提示される情報は地図上の目的地に対する「平常時の最短経路（通常経路）」と、その時点での「リアルタイム情報にもとづく最短経路（迂回経路）」であり、被験者はこの両者からいずれか一方の経路を選択する。調査対象は立命館大学理工学部の学生であり、有効回答数は65票である。

このような経路選択行動におけるドライバーの認知所要時間のあいまいさを表現する方法としては、認知所要時間を確率分布およびファジィ数により表現するものが提案されている[1),2)]。ファジィ数により表現する場合、ドライバーのもつ認知所要時間の左右のスプレッドは、そのドライバーが区分して認知できる所要時間の最小値よりも小さいものと考えられる。そこで本研究では、半数以上の質問に10分単位で回答した被験者は左右のスプレッドを10分、その他の被験者は左右のスプレッドを5分として、個人ごとの認知所要時間のあいまいさを表現することとした。

経路選択モデルの推定結果を表-1に示す。ここで、経路表示のみが情報として提示された場合の推定結果をみると、ファジィ認知所要時間にもとづく2種の可能性指標について、いずれも有意なパラメータの推定値が得られていることがわかる。

また、提供される情報の種類によるモデルの比較をおこなうと、経路表示のみが提示される場合には右左折回数が、経路表示と距離差が提示される場合には走行距離が有意なパラメータとなっているが、所要時間差が提示されるものは認知所要時間にもとづく可能性指標のみが有意なパラメータとなっている。すなわちドライバーは、所要時間が明確な情報として提示されていない場合には認知所要時間以外の要因も考慮して経路選択行動をおこなっているが、所要時間情報が提示された場合には認知所要時間のみを考慮して経路選択行動をおこなっていることが推察される。

表-1　経路選択モデルの推定結果

	経路表示のみ	経路表示＋距離差	経路表示＋距離差＋所要時間差
可能性指標 Pos (R<=G)	12.32 (9.879)	14.75 (8.435)	15.93 (17.55)
可能性指標 Pos (R<G)	13.98 (10.35)	15.43 (9.867)	20.59 (24.65)
走行距離	-3.987 (-1.321)	-8.549 (-4.651)	—
右左折回数	-0.534 (-5.486)	—	-0.142 (-0.751)
尤度比	0.431	0.365	0.498
的中率	0.745	0.804	0.811
サンプル数	145	168	132

（括弧内：t値/—印：符号条件不適）

4．おわりに

本研究では、車載情報機器によるナビゲーション情報を想定したドライバーの経路選択行動について、ファジィ認知所要時間を用いた分析をおこなった。

今後の課題としては、情報入手前におけるドライバーの認知所要時間の形成過程について分析するとともに、ドライバーの経路選択行動の結果としての道路ネットワーク上の交通状況推計をおこない、交通管理方策としての適切なナビゲーション情報の提供方法について検討することが必要と考えられる。

参考文献

1) 田中俊祐，小川圭一，宮城俊彦：所要時間情報の不確実性による経路選択行動への影響に関する研究，土木計画学研究・論文集，No.17, pp.559-566, 2000.
2) 川原徹也，秋山孝正：可能性指標を用いた交通量配分モデルの提案，第13回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.221-222, 1997.

連絡先： 小川 圭一
立命館大学 理工学部環境システム工学科
〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1
Tel: 077-561-5033, Fax: 077-561-2667
E-mail: kogawa@se.ritsumei.ac.jp

将棋における局面の進行状況の分類

The classification of the stages in Shogi game

江崎　朋人　　橋山　智訓
Tomohito Esaki　　Tomonori Hashiyama
名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科
Grad. School of Natural Sciences, Nagoya City University

Abstract Computer Shogi programs are still in development to defeat the professional players. The problem exists in estimating the status of the game phases. It is said that there are three phases in the Shogi. They are called; opening, middle, and end game. The change of the importance on each piece during the game makes us select adequate strategies in every phase. At present, Computer Shogi programs are not good at estimating the phase, while professional Shogi players are. In this paper, we introduce the Dempster-Shafer theory to handle with the uncertainty in professional Shogi players. We also introduce three uncertain measures to estimate the phase of the game. Using the game record in 2001 & 2002, the measures are calculated. Half of the games are estimated using one of the measures.

1. はじめに

コンピュータチェスプログラムが人間のチャンピオンを破ったことは有名である。将棋においてもコンピュータプログラムは年々強くなっている。現在最も強いものはアマチュア4段程度といわれており、プロ棋士にはまだ及ばない。将棋は二人・零和・有限・確定・完全情報ゲームなので、最適化関数を適切に設定することができれば、全探索をすることにより、最適解を求めることができる。しかしながら、探索空間が膨大なため現実的な時間で解を得ることは不可能である。将棋はチェスに比べて場合の数の総数が大きく、チェスが 10^{120} に対して将棋は 10^{220} である [1]。現実的な時間で解を求めるには、探索空間を効果的に構成する必要がある。例えば何らかの条件の下、探索範囲を限定したり目的関数を工夫する必要がある。本研究では目的関数に着目し、適切な目的関数を設定する方法を構築したい。本稿ではその前段階として、将棋の戦況の分類について議論する。将棋においてはゲームの進行に応じて戦況が序盤・中盤・終盤に分けられることが知られており、その戦況に応じて目的関数が大きく異なると考えられるからである。具体的には

- 序盤：
  駒組みをして体制を整える。基本的に定跡に従う。
- 中盤：
  戦いが始まってから寄せにはいるまでとよく言われているが、はっきりとした定義はないのが現状である。寄せとは、相手の王を守っている駒を攻めてはがすこと。駒の損得と攻守のバランスが重要である。
- 終盤：
  寄せに入ってから最後まで。王及びその周りへの攻撃が中心になる。駒の損得よりも王を取るまでの手数が重要である。

と分けられ、コンピュータ将棋においては終盤が良く研究されている。

目的関数を学習により獲得する研究も行われており、ニューラルネットワークや強化学習の一手法である TD 学習法が適用されている [2][3]。文献 [2] では1局全部を単一の評価関数で扱っているため序盤・中盤・終盤における戦況の変化を表現できない。また、文献 [3] では中盤を扱っているが、どのように中盤を判断するかについては議論されておらず人間が適切に中盤を判断する必要がある。

本研究では、現実的な時間での解探索を実現するために戦況の分類が必要であると考え、そのために序盤・中盤・終盤を定量的に評価できる指標に関して議論する。プロ棋士は序盤・中盤・終盤を判断する上で盤上の駒の配置や持ち駒、現在までの手数を情報源としていると考えられる。この判断方法がプレーヤの強さにより異なると言われている。すなわち、そこには主観的な不確実さを持ち合わせていると考える。そこで本研究ではこの不確実さを証拠理論を用いて定量化することによって進行状況を分類してみた。

2. 証拠理論

証拠理論は、1976年に Shafer によって提案された理論で、Dempster の上下界確率を基にしてることから Dempster-Shafer Theory と呼ばれている。日本語では Shafer の著書 [9] の題名からとった「証拠理論」と呼ばれている。この理論は基本確率割当と呼ばれ

る集合関数を基に構成されている。具体的には、有限集合を X としたとき、式 (1) で表される集合関数によって基本確率割当 (Basic Probability Asignment :BPA) $m(\cdot)$ が与えられる。BPA は全体集合 X のべき集合に対して割り当てられる。$m(A)$ は、ある要素 $x \in X$ が集合 A に属するという主張に対する信頼の度合いを示す。$m(A) > 0$ を満たす $A \subset X$ を焦点要素とよび、焦点要素の集合を $\mathcal{F}$ で表す。焦点要素 $\mathcal{F}$ と m の組 $(\mathcal{F}, m)$ を証拠と呼ぶ。

$$m : 2^X \to [0,1], m(\emptyset) = 0$$
$$\sum_{A \subseteq X} m(A) = 1 \tag{1}$$

証拠理論により BPA が与えられたとき、その状態に対して 3 つの不確実さの指標が定義できることが [10] により議論されている。3 つの不確実さの指標は、不特定度 (N)、不一致度 (E)、混迷度 (C) と呼ばれる。これらは、式 (2)〜(5) で定義される。

$$N = \sum_{A_i \subseteq \mathcal{F}} m(A_i) \log_2 |A_i| \tag{2}$$

$$E = -\sum_{A_i \subseteq \mathcal{F}} m(A_i) \log_2 Pl(A_i) \tag{3}$$

$$C = -\sum_{A_i \subseteq \mathcal{F}} m(A_i) \log_2 \left(\frac{m(A_i)}{Pl(A_i)} \right) \tag{4}$$

$$Pl(A_i) = \sum_{B \cap A_i \neq \emptyset} m(B) \tag{5}$$

それぞれの指標は一般的に、次のように意味づけられる。

- 不特定度 N
  不特定度は、ある要素 x が集合 X の部分集合 A_i のどれに属するか特定ができない度合いを表す。
- 不一致度 E
  不一致度は、$x \in X$ が異なる部分集合 $A_i \subset X$ に属するという意見のばらつき具合を示す。つまり意見の不一致を示し、矛盾の度合いを表す。
- 混迷度 C
  混迷度は、証拠から要素 x の所属すべき集合 $A_i \subset X$ を選択するとき、どの集合 A_i に属する度合いも確からしく、どの意見を信用してよいのか分からないという混乱の度合いを表す。

すべての指標は、値が大きくなればなるほど不確かになる。逆に指標の値が減少しすべての不確かさがなくなるとき、証拠から要素 $x \in X$ が一意に決定づけられることとなる。

3. 不確実さの指標の将棋への適用

3.1. 将棋における不確実さ

将棋における不確実さと、前項の指標は以下のように対応づけられる。

- 不一致度：
  どこに注目するかを判断することに伴う不確実さ。
- 不特定度：
  どの駒を動かすかを判断することに伴う不確実さ。
- 混迷度：
  盤面の一部分における駒の重要度を考えるときの不確実さ。

本研究では不一致度 (E) の指標を用いて分類することを試みた。

3.2. 変数定義

指標を計算するにあたり以下の定義を導入する。将棋は 9×9 のマス目を持つ盤と歩香桂銀金角飛王の 8 種類 40 枚の駒を使う 2 人のプレーヤによる対戦ゲームである。初期状態 (図 1) から駒を交互に 1 つだけ動かしてゲームを進め、相手の王を取ると勝ちである。将棋を行うことを「将棋を指す」といい、駒を一回動かすことを「一手指す」という。最初に指す方を「先手」、次に指す方を「後手」と呼ぶ。先手を☗、後手を☖で表現する。図 1 において先手は下側、後手は上側で、「☗持 駒 なし」は先手の持駒がないことを表している。持駒とは相手から取った駒のことで、盤上に打つことで使うことができる。プレーヤは必ず駒を動かさなければならず、駒の動かし方は駒の種類によって決まっている。また禁じ手と呼ばれる指してはいけない手がある。

本研究では、盤の右から x 列目、上から y 行目のマスを xy と表現する。例えば図 1 において、先手の王のあるマスは 59 である。$X = \{xy | 1 \leq x, y \leq 9, x, y \in \mathbf{N}\}$, $A_{xy}(d) = \{x'y' | x \leq x' \leq x + d, y \leq y' \leq y + d\}$ とする。例えば $A_{33}(2) = \{33, 34, 43, 44\}$ である。ここで、マス xy に利いている駒全体の集合を S_{xy} と

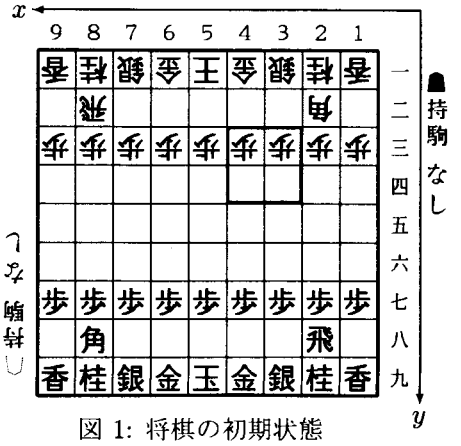


図 1: 将棋の初期状態

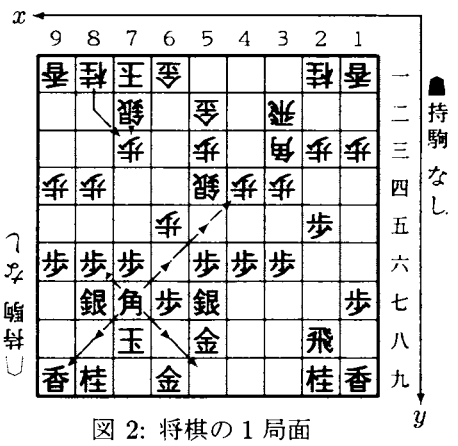


図 2: 将棋の 1 局面

する。マス xy に利いている駒とは、マス xy に駒がないとき、マス xy へ移動可能な駒、またはマス xy に駒があるときは、その駒が無い場合にマス xy へ移動可能な駒のことを表す。$|S_{xy}|$ を S_{xy} の要素の数とする。即ち $|S_{xy}|$ はマス xy に利いている駒の数である。また駒 a の利きとは、集合 $\{xy|a \in S_{xy}\}$ で表される。例えば図 2 において 77 のマスにある先手の角の利きは $\{44, 55, 66, 68, 59, 88, 86, 99\}$ である。また、73 には後手の場合、72 の銀と 81 の桂が利いているので、72 の利きの数 $|S_{72}| = 2$ である。

3.3. BPA の決定法

本研究では次のように BPA を定めることとした。

$$\mu(B) = \begin{cases} \sum_{j=y}^{y+d} \sum_{i=x}^{x+d} |S_{ij}| & \text{if } B = A_{xy}(d) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$m(A) = \frac{\mu(A)}{\sum_{B} \mu(B)} \quad (7)$$

図 2 の先手において $\mu(A_{66}(2)) = |S_{66}| + |S_{76}| + |S_{67}| + |S_{77}| = 8$ である。$d \geq 3$ に対して $m(A_{xy}(d)) = 0$ としたとき $N = 1.537, E = 2.836, C = 3.146$ となる。

4. 結果

プロ同士の対局を記録した棋譜データベースである将棋年鑑 2001, 2002 から戦形が偏らないように 20 の棋譜を選んで E を計測した。その一例を示す。本研究では

盤全体における利きの散らばり具合を表す。

と意味づけることができる。

図 3 は第 13 期竜王戦 1 組決勝、先手：中原永世十段、後手：羽生四冠の結果である。中原永世十段が勝った棋譜の結果で、横軸に手数、縦軸に E の値をとったものである。最初は利きが自陣付近に集中しており、ばらついていないので E の値は低い。局面が進むにつれて、利きの分布が敵陣の方へ広がり始め、E の値も増加する。これは盤全体における利きの散らばり具合を表していることに当てはまる。また、利きの分布に関する指標であることから、攻撃の指標になりうる。これをもとに序盤・中盤・終盤の分類を行った。ある程度利きが散らばったとき、即ち E の値がある程度の値まで増えたとき中盤と考えられる。そこで今回 E の値が 3 以上になった手数で序盤と中盤を分けた。但し定跡の中で 3 以上になった場合は除いた。また、ある程度手数が大きいときに E の値が大きく変化したとき、中盤と終盤に分けた。図 4 において 57 手での先手の E の値が 3.02 になるので 57 手で序盤と中盤に分かれる。また、83 手と 84 手での先手の E の値の差が大きく減少しているのでここで中盤と終盤に分かれる。55 手目の手で戦いが始まり、83 手目の手が角金交換で、このあたりから寄せが始まっているととれる。角や飛車を捨てて金銀を取る手は終盤によく見られる特徴であることから、83 手あたりから終盤と考えられる。

20 の棋譜に対しての結果を表にまとめた。5 手前後ずれることを許容すれば、不一致度 E により、半数程度の対局を分類することができる。

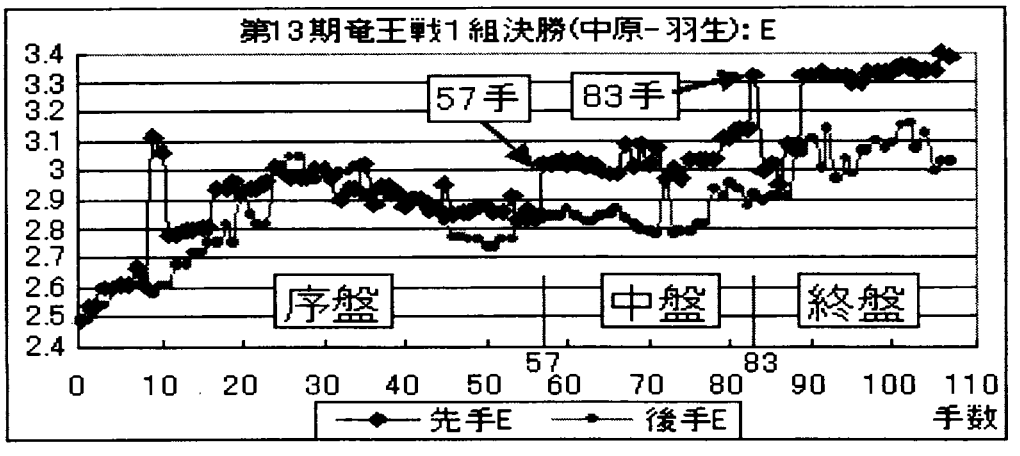


図 3: 不一致度 E のグラフ

表 1: 20 棋譜の結果

	序盤と中盤	中盤と終盤
分類できた棋譜の数	9	4
分類したが 5 手程度ずれた棋譜の数	4	3
分類したが 10 手以上ずれた棋譜の数	7	3
分類できなかった棋譜の数	0	10

5. まとめ

将棋の局面において、局面の進行状況を分類するためにプロ棋士の棋譜を用いて、利きの情報から BPA を決定し、E の値を測定した。E の値を用いて序盤・中盤・終盤の分類をした。証拠理論に基づいた不確実さの指標の一つである不一致度 E を用いて半数の対局において序盤・中盤・終盤を分けることができた。今回は利きの数のみを使ったが、駒の位置や種類などを使うことも考えられる。また、BPA の定め方として $m(A) > 0$ なる部分集合 A は正方形以外の形、例えば長方形も考えられる。これらを考慮することによって分類できなかった棋譜にも対応できると考えている。また、他の指標である不特定度 N 、混迷度 C の利用を今後検討していきたい。図 4,5 に図 3 の対局における N と C を示した。

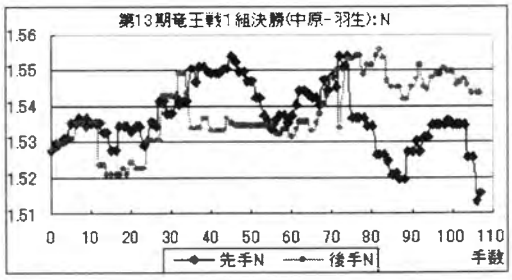


図 4: 不特定度 N のグラフ

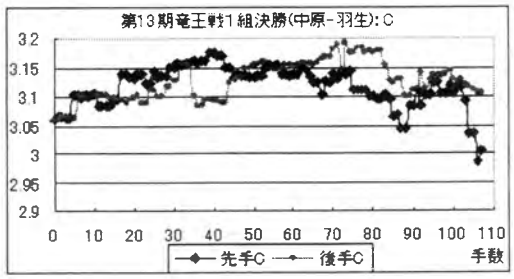


図 5: 混迷度 C のグラフ

参考文献

[1] 松原仁, 滝沢武信, コンピュータ将棋はどのようにしてアマ 4 段まで強くなったのか, 人工知能学会誌 Vol.16, No.3, pp.378-383, 2001

[2] 松本慶太, 鈴木豪, 小谷善行, ニューラルネットワークを利用した TD(λ) 法に基づく将棋の評価関数の学習, 第 6 回ゲームプログラミングワークショップ, pp176-178, 2001

[3] 今龍, 鈴木康広, 大堀隆文, 渡辺一央, ニューラルネットワークによる将棋評価関数の学習, 第 7 回ゲームプログラミングワークショップ, pp143-146, 2001

[4] LevyNewborn 著, 小谷善行 監訳, 飯田弘之, 乾信雄, 吉村信弘訳, コンピュータチェス, サイエンス社, 1994

[5] 松原仁, 竹内郁雄編, ゲームプログラミング「bit 別冊」, 共立出版, 1997.

[6] 松原仁編著, コンピュータ将棋の進歩, 共立出版, 1996

[7] 松原仁編著, コンピュータ将棋の進歩 2, 共立出版, 1998

[8] 松原仁編著, コンピュータ将棋の進歩 3, 共立出版, 2000

[9] Shafer,G.,A Mathematical Theory of Evidence, Princeton Univ. Press, Princeton, N.J., 1976

[10] Klir,G.J. and Folger,T.A., Fuzzy Sets, Uncertainty and Information, Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, 1988. (本多中二 訳、ファジィ情報学、日刊工業新聞社, 1993).

[11] Yahachiro Tsukamoto, Three Type Entropy in the Evidential Theory with their Applications, The Fourth Asian Fuzzy System Symposium, pp645-650, 2000.

[12] 日本将棋連盟 Homepage, http://www.shogi.or.jp/

問い合わせ先

〒 467-8501
名古屋市瑞穂区瑞穂町字山の畑 1
名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科
江崎　朋人
TEL: 052-872-5191
E-mail: t.esaki@nsc.nagoya-cu.ac.jp

Contingency からcrisis を含む危機管理的情報の概念 ー複雑系の光と影ー
The concept of information about management from crisis to contingency -Light and shadow of complexity-

福島 達臣
中央大学大学院総合政策研究科・市原市民病院
Tatsuomi Fukushima Graduate school of chuo-university , Department of politics. Ichihara city hospital
大橋 正和
中央大学総合政策学部
Masakazu Ohashi Chuo-university ,Department of politics

Abstract: The new concept of contingency is needed for crisis manegement to maintain systems in modern society. Characteristic of the system in complex society is having expansion of scale, high quality, complexity and dispersion. Relationship of each systems complictes the problems. The partial problem spread to total system crisis and complex damages take place in disasters like as earthquake near by cities. Incidental damage may occure in systems in our world. The attack to the core of function in cities by terrorism ,etc. have a major impact on politics in the country. Contingency must affect the framework of the structure in the world.
key words: contingency, complexiety, system crisis, framework

1．はじめに

今日の社会環境や経済、情報環境から持たらされる危機 (crisis) は、それが複合化、複雑化する事で予想を越えた状況を生みだす可能性がある。特に文明社会を維持して行くためにはこうした複合化、複雑化から生じる、不測の事態に備える必要性が生じている。 こうした不測の事態、最悪の事態を想定して立てる計画、対処法を contingency plan と呼んでいる。crisis からcontingency と言う概念が必要になった理由は様々な要因が関与していると考えられる。例えば、工業生産に於いては、科学技術の発達や文明の高度化から、規模の拡大や工程の複雑化が進み、或いは工場の多国間の分散化、ネットワーク化が進んでいる。こうした(a) 規模の拡大に加え(b) 高度化や (c) 複雑化、(d) 分散化は同時に様々な問題を含んでいる。その理由はシステムを支える様々な要因があり、その一部の障害が全体に及ぶ危険性が生じる事からである。またこの事はシステムが巨大化すればする程、システム障害から生じる問題が予測を越えたものに成り易い事を意味する。生産のネットワークがコストの面から最適化が図られると、ネットワークが他のシステムを代替する様な機能が失われてしまう。ネットワークの広域化が危機分散の意識から形成されていない場合、問題領域の拡大が生じている事になり、特に生産の重要な要素が中国などの海外にある場合は、国内の本社で生産のコントロール自体が不可能になる場合が生じ得る。従って社会やそのシステムの要因として(a) 大規模化(b) 高度化 (c) 複雑化、(d) 分散化(e) 問題解決の困難性 が構造要因として考えられる場合は、常にcontingencyという見地からの概念と具体的な対策が必要になって来たと思われる。

2．危機の移相

(i) 状況の変化

Contingencyという見地はシステムを固定した静的なものと考えている限り、生まれてこない。また例え、そうした意識が在ったとしても、抽象的な概念に止まり、最悪の事態を想定したものでなければ実用性に乏しいと考えられる。必要な事はシステムの負のダイナミズムを想像し、その起こる確率を考え、問題解決の立場からの対策であり、またその被害を最小にする戦略的な意識が必要と言える。システムが複合化、巨大化、広域化した場合、そこから発生する事態は、様々な相互関係も加わって、予想を越えたものとなり、問題自体を複雑系として考える必要がある。複雑系からは予想を越えた様々な事象、自己組織化や創発などの正のダイナミズムが生じる事がある。一方ではまた予想を越えた負のダイナミズムも生じ得る。高度に発達した社会やそれを支えるシステムには二面性があり、その豊かさを享受するには負の側面を忘れてはならないと言える。

(ii) 環境要因

システムが巨大であり、複雑であればある程、そのシステムを環境に適合させ、最良の効果を引き出させるには、時間がかかる。こうしたシステムの環境にたいする最適化は複雑系の重要な問題である。この事は見方を変えれば、複雑で高度なシステム程、環境の変化に適応していくには時間がかかる事を意味している。従って重要な問題が比較的初期に捕えられないと、対策やその解決が進む以上に複雑なシステムでは問題が深刻化してしまう。こうした環境とシステムのギャップは大は政治システムから小は会社組織まで様々な段階で生じ得る事であり、特にグローバリズムなどの政治や経済、情報などの環境での複合化した変化に、システムが曝される時に顕著になる。特に日本に於いてはシステム中心思考や情報や環境に閉鎖的な意識から、危機管理事態への意識が遅れていると言わざるを得ない。従ってcontingency に対する意識とは、大きな隔たりがある事は否めない。

(iii) システム要因

(a) 情報の遅延

Contingency はシステムの情報の流れにも関連する。例えば、末端からボトム アップしていく重要な情報が、他の多数の情報に紛れたり、遅延したりしている内にシステムの中枢に届かなくなってしまう事などがある。また情報を判断する中枢が、情報の重要性を中枢との距離によって判断する傾向があると、最初から情報に対する判断を見誤る事になる。ボトム アップされる情報を環境からのシグナルと捕えず、単に末端の個人的な反応としか捕えない場合も同様である。情報が末端や全体の組織で共有されるには時間がかかる。個人の、優れた感性の元での情報は新しい変化を認識する上では、遅延が遥かに短いと言う利点がある。個人の情報を切り捨てる事は、システムとは違った感性から持たらされる、新しい情報を失う事に結び付く。

(b) 判断の遅延

情報がすぐさま生じている事態を中枢に伝達できたとしても、判断に要する時間的な遅延が存在する。また高度な判断程、対策会議や関連の協議会を開くなどのプロセスが必要になる。同時に複雑な情報程、その全容が中枢に伝わるには更に時間が必要だ。地震などの広範な被害で、現場の指揮に対して中枢の指揮が優位過ぎる場合は、緊急を要する人命救助などでその対策が遅れると言う問題が生じる。従って、現場に在る程度の指揮権を与えながら、そこから得られる情報を中枢部が統合していくと言う柔軟性が必要になる。

この場合、「現場主義」と称して現場を見ない限り判断出来ないのは、例えば災害地が遠く離れた所にあったり、広範な場合はかえって時間的なロスに結び付く。現場に近い場所で情報にを収集したり、指揮が出来るサブシステムを緊急に立ち上げる事も必要になる。必要な事は、判断の場所が中枢か末梢かを決定する事では無く、正確な判断を如何に迅速に行えるかである。

(c) 実行の遅延

Contingencyが起こった後で、その全容を把握し、被害をまとめ、対策を協議して実行に移すには、時間が必要だ。この間、何もしない事によって貴重な時間が失われ、被害が拡大し、信用が失われ致命症となるかも知れない。従って実行の遅延を防ぐには、被害を予め予想したシュミレーションも必要になる。遅延した綿密な実行よりも、ある程度柔軟性があり、状況の変化に対応出来るような実行プロセスが選択される必要がある。しかし、この場合も、実行の方向性は明確にしておく必要がある。言い替えれば、生じた問題解決についての、問題把握と同時に問題の優先順位 (priority) が決定されている必要がある。 実行の遅延の最大のものは、この優先順位を見誤る事から生じる。優先順位を誤った場合、途中から手が付けられていない問題が拡大して行く事になり、全体の方向転換を行わざるを得なくなってしまう。従って問題全体を最初から把握し、その解決されるべき優先順位を決定している事が重要になる。またcontingencyに於いては、その途中から新しい状況や問題が生じる事がある。この場合、新しい問題を従来の問題と比較して再度優先順位を決定する再評価が必要になって来る。

(iv) 人的要因

日本的な指導者の要件として、組織を取りまとめるような調和的な能力が過大視されてきた。派閥均衡などの視点から無難な調整役がリーダーとして選ばれる事も多い。こうした指導者は環境に変化が無く、システムも順調に稼働している時代であれば、何の問題も生じなかった。しかし環境が変わり、システムがそれに対応して変革を求められる時や予期しない出来事が降りかかった時は、その無能ぶりを晒け出してしまう。また大した指導力も危機管理能力も無い指導者が、周囲の取り巻きに祭り上げられて、ワンマン化した場合も、いかにシステムが巨大化しようが、「ダイエー」や「そごう」の様に、システム崩壊の危機に陥ってしまう。現在の日本の政治や経済、企業の様々な問題はこうした人的な要因に由来するものが多い。出身大学や学部が過大に評価されて、学閥人事が横行しているシステムも似たような傾向がある。日本の場合、学歴と指導力や判断力、危機管理能力は必ずしも一致していない。指導者としての能力よりも学歴と言う格付けを重視している事になる。この場合共通している事は、結果として、システム自身が余り能力の無い指導者を選びとっている事になる。言い換えれば、システムの非常事態としての危機管理能力よりも、平時での系列的、調和的なポジションを選択している事を意味する。これはシステムの運営からは、はなはだ危険な事を意味し、危機管理に於て、予め人的な問題を抱え込んでいる事になる。

3．危機管理と複雑系

(i) 認知モデル的視点

認知モデルの見地からの、様々な情報の流れやその統合、判断や決断のプロセスは重要である。それは我々が物事を理解する上で、脳とそれを含む神経系と言うシステムに頼らざるを得ない事と、理解そのものがこうしたシステムの上に形成される構造だからだ。そのシステムの特徴は(1) 時系列依存であり、経時的である事 (2) 部分を統合して全体像を得る事、従って全体は部分情報に依存する事 (3) 時間的な遅延が生じる事であり、分析や判断というプロセスが含まれる事 (4) 方法やシステムに依存的な傾向を持つ事、言い替えればシステムが情報を選択してしまう危険性が生じる事、などがある。もの事に認知やそれに伴う判断や意志決定はこうした認知システムの上にある事になり、ヒトの認知システムに対する理解とその限界を考慮しなければ、情報に把握の初期の段階で事象の本質を見誤る事になってしまう。

(ii) 複雑系からの視点

現代社会の様々な事象の特徴は、互いの相互関係から複雑な構造を形成している事と、これに対応する様々なシステムもその対応過程で複雑な構造を取らざるを得なくなってきている事が上げられる。従って環境とシステムから生じる問題も複雑にならざるを得ない事になる。そしてこうした複雑性から予測を越えたcontingency が生じる事になる。従って複雑系に対する理解とそれを可視化するプロセスが必要になってくる。これは、問題を解決していくには認知と言う、線上のプロセスから、様々な視点を組み合わせた面上のプロセスが必要になるからだ。面上のプロセスには事象の相互関係から生じる新しい事象や問題の可能性を考慮に入れておく余地が必要だ。

4．Contingency の例

(i) 新型肺炎(SARS) の場合

新型肺炎(SARS) が社会におけるcontingency の要因となっている事には様々な要因がある。前触れも無く突発的に生じた事、肺炎としての致死率が比較的高い事、原因解明に時間を要した事（コロナウイルスの新種である事は判明）、確定した治療法が無い事、飛沫感染で感染が拡大しやすい事、従って北京や香港の様な人口密集地域で爆発的に広がり易い事、この結果社会や経済に対する影響が大きくなる事（工場生産や観光など）があげられる。従って最初にあげた要因の内の(d) 分散化(e) 問題解決の困難性（高死亡率）が主体となってcontingency が生じた事になる。また中国当局の情報閉鎖性や公衆衛生の遅れ、結果に対する楽観視なども問題拡大の要因の一部として上げられる。

新型肺炎(SARS)問題は中国に工場を移転している日本企業を直撃する事となった。つまり分散化やネットワーク化は、その分散する領域全体を含む問題の広域化によって、大きな影響を受けてしまう。経済や情報のグロ

ーバリズムは、他方では問題空間の拡大を意味し、一企業や国家を越えた領域へ問題が拡大している事を意味している。従ってグローバリズムには二面性があり、contingencyに至る確率をむしろ高めているとも考えられる。

(ii) スペースシャトル事故の場合

2003年2月１日に発生したスペースシャトルColumbiaの大気圏突入過程で発生した空中分解事故はColumbia contingencyと呼ばれる。何らかの原因で左翼の一部が損傷し、この損傷部分から高熱ガスが流入した左翼が損傷したと考えられている。この突発的な事故の引き金を引いた最初の原因は明らかではなかった。Columbia事故対策委員会が設置され、広範囲に広がった破片に収集や技術チームからのデータの集積、大気圏突入時のデータの詳細な分析などが行われた。その原因は４ヶ月後の現在、様々の実験が行われ、「打ち上げ時に外部燃料タンクから落下した断熱材が左翼へ衝突したことによる」とほぼ断定されている。打ち上げ時の翼への部分的とも言える障害が、後に機体全体を崩壊させる事故に結び付いていた事になる。この事は複雑なシステムを運営していく上で、細心の注意が必要な事を意味している。

５．Contingencyと複雑系

(i) Contingencyの経緯

Contingencyを引き起こす構造の一つとして複雑系が考えられる。システムの複雑化が進めば、わずかの異変や異常が全体に波及して、予想以上の結果を持たらす事は想像出来る。こうした予想以上の結果が生じても、システムが定常状態に復元する能力を失わなければ、重大な結果は回避出来る。問題は定常状態に復帰出来ず、不可逆な状態に陥る場合だ。不可逆な状態を経てcontingencyに至りケースも様々な場合が考えられる。また筆者は政治や経済に於いても、不可逆な状態が比較的緩やかに生じ、解決困難な問題に発展する事を既に報告している。不可逆性が急速に起こったり、その規模やが予想を越えたものになる場合には、対策が後手に回る事になり、被害が拡大する。従ってその経緯を考慮に入れ、時間経過に伴うパターンを予測する事が必要になる。

(a) 部分が全体に波及

スペースシャトルColonbiaの事故の場合、左翼に生じた亀裂が、大気圏突入時の高熱状態で、翼全体に波及し、機体が崩壊するに至っている。こうした危険性は精密な構造を積み上げて機能するシステムに共通している要素と思われる。航空機や新幹線などの高速列車、原子力発電所などがこれに当たる。部分の障害が全体に波及するのが短時間に生じ、後戻り出来ない不可逆性を生じる可能性があるため、部分の異常でも直ちに、全体の機能を停止させる事が必要になる（図１）。この場合contingencyを回避するには、状況の把握と判断の速さが必要だ。この場合の状況とはどの部分まで進めば、不可逆的な変化が起こるかと言う事である。従って、部分の問題を全体に波及させないためのシステムの恒常的な改善が必要になって来る。

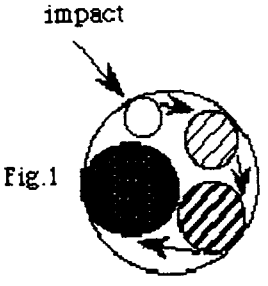


Fig.1

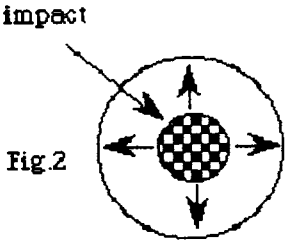


Fig.2

左　図１：部分的なimpactが急速に全体に波及する場合もcontingencyの原因となる

右　図２：高度な機能を持つ中枢部の障害は、システム全体の機能低下や麻痺に発展しcontingency の原因となる

(b) 問題空間の拡大

巨大地震などの災害の場合、それが住民がまばらな山間部などで発生しても、被害は拡大しない。それが高度に発達した精密機械の様な都市の直下や近辺で発性すると、大きな被害を引き起こす事になる。言い換えれば問題空間が急速に拡大すればする程、困難性は増加していく。特に高度に発達、分化した都市機能が大きな影響を受けるし、災害は都市の構造の弱い部分に集中するからだ。都市の重要な機能（電気、水道、ガス、道路、鉄道、通信など）が構造的に弱いままで放置されている場合は、生活や情報に関する重要な機能が瞬時に麻痺するに至る。また建築物の崩壊やそれに伴う道路の寸断、交通機関の事故の多発に加え、津波や高潮、火災などの二次災害が比較的短時間に多発する事になり、適切な対策が取られないと、被害が劇的に増加していく。この事は、阪神・淡路大震災の貴重な教訓からも明らかだ。

(c) 中枢機能低下

地下鉄サリン事件による、東京の地下鉄を中心とした都市機能の低下は、次の都市機能の中心崩壊へと至るテロによって生じた事件の前触れとも考える事が出来る。この事件はカルト宗教集団オウム真理教によって1995年３月20に引き起こされ、12名が死亡し、5500人が中毒などの症状を呈している。またその後遺症に苦しむ人も多い。通勤時間帯に撒かれた猛毒のサリンはオウム真理教自らが製造し、そのメンバー（教徒）には有名な大学の卒業者も含まれていた。従って、この事件のもう一つの特徴は、本来のテロリストではなく、知的な階層が無差別テロと言う犯罪に荷担していた事があげられる。三つの地下鉄路線に撒かれたサリンは政官界の中枢である霞ヶ関に集中するように計画されていたとされ、日本の政治の中枢機能をねらった意図を持つ事は明らかだ。こうした日本の中枢機能の低下を狙ったテロの目的がある程度達成された事がニュースとして世界を駆け回った。これは文明社会に対して、テロリズムと言う手段が有効である事を示した点で衝撃的であったと言える。

(d) 中心崩壊

2001年９月11日、ニューヨーク世界貿易センターのツインビルを崩壊させた、アルカイダによる同時多発テロは、その衝撃の映像と共に世界を震憾させた。この事件は安全保障に対する考え方に大きな影響を与えた。つまり大規模な戦争行為でなくても、テロのような比較的少人数でも、文明国家の中枢部に大きなダメージを与えられる事が証明された事になるからだ。テログループに占拠された航空機は世界貿易センターを崩壊させただけでは無く、アメリカ国防総省の一角にも突入し、この同時多発テロが綿密に計画された事が明らかになった。世界貿易センターの崩壊はアメリカのみならず世界の経済に大きな影響を与えた。こうした重要な機能の崩壊は、様々な形で周囲に波及していき、最小の攻撃で最大の効果をあげる事が出来る事を証明してしまった（図２）。言い換えれば、テロリズムがこうした成果をあげ得た事が衝撃なのだ。そしてこうした衝撃を西欧諸国に与えた事が、イスラム原理主義者からみれば、大きな成果と言える。そしてテロを根絶出来ない限り、テロを中心とした原理主義は、強い影響力を持ち続ける事が出来る。こうした影響は先進国家の日常生活から政治、経済に及び、その未来を脅かし続ける事を意味する。部分から全体に及ぶcontingencyには未だ対応出来る可能性はあるが、中心崩壊がら全体に波及するcontingencyは原因を根絶するしかない。

これは文明に対する挑戦であり、アメリカのイスラム原理主義に対する徹底した根絶意志を呼び起こす事になり、アフガニスタン、イラク戦争に結び付いていく事になる。従ってその影響は文明、経済への影響から政治的なリアクションを引き起こし、更に複雑になっている。

(ii) Contingencyから複雑系へ

ニューヨークテロ事件以降のアメリカのイスラム社会に対するスタンスは大きく変化している。その方向性は究極的にはイスラムの伝統を否定し、原理主義ばかりではなく、イスラム世界を西欧的な民主国家に転換させる方向性を持っている。こうした方向性はまがりなりにも国家や民族の多様性を認めてきた、戦後世界のスタンスとは異なっている事は明らかだ。従って、こうしたテロに対して徹底したイスラム社会の改革に乗り出す為に新しい行動を起こそうとしているアメリカと、戦後世界の多様性を守ろうとしているフランスやドイツなどの間に修復しがたい亀裂が生じた事に結びついてくる。

Contingencyが政治的なリアクションを呼び起こし、その後の世界的なフレーム構造の変化や、変化による複雑な歪みが生じているとも言える。こうした複雑化は、政治の方向性にも影響を与える。新しい世界政治の構造をどう捕え、対処するかが問題になるからだ。アメリカの一極主義とも思える行動や、行きすぎたイスラム社会に対する介入が、逆に反発を強め、テロリズムなどの形で跳ね返って来る可能性もある。つまり問題の(1) 構造化と複雑化や(2) 連鎖が生じて来る。従って問題の靴雑化や相互関係、連鎖などに対する、複雑系の考え方が必要になってきたと言えるのではないだろうか。contingencyが複雑系を維持していくための警告だとすれば、それを越えた更に広い視野と戦略が必要になってきたと考えられるからだ。

５．結語

現代社会の高度なシステムを維持し、安定に保って行くためには新しい危機管理意識としてcontingencyと言う概念が必要である。高度な社会のシステムには(a) 規模の拡大に加え(b) 高度化や(c) 複雑化、(d) 分散化　と言う特徴があり、相互関係が複雑化しているために部分の問題が全体に波及したり、地震などで高度な都市機能が破壊されると被害の広範化や多様化が生じてしまう。また危機管理を念頭に置かないシステムの分散化は、分散したネットワークの一部が被害を受けると、影響が全体に波及してしまう。テロリズムなどによって引き起こされる都市中心機能への攻撃は政治的に大きな衝撃を与え、その後の世界の政治意識と言うフレーム構造の変化にまで発展する可能性が生じる。更に国家間の相互の関係が変化するという世界構造の変化と複雑化が加速される結果を生じる。従って政治の面では、contingencyを契機とした、そこから生じる複雑な構造を意識した上での、広い視野が必要になっていると考えられる。

参考文献

佐々淳行　著　「危機管理のノウハウ・PART 1-3」　PHP研究所　1984年

都甲潔、江崎秀、林健司　著　「自己組織化とは何か」　講談社　1999年

西村和雄　他　著　「複雑系を越えて」　筑摩書房　1999年

吉永良正　著　「複雑系とは何か」　講談社　1996年

谷光太郎　「情報敗戦」　ピアソンエデイケーション　1999年

M.M.ワールドロップ　「複雑系」　新潮社　1996年

K.E.ワイク　他　著　「不確実性のマネジメント」　ダイヤモンド社　2002年

福島達臣　著「問題から見た政策及び不可逆問題についての考察ーグローバリズムの観点からー」　中央大学大学院年報　2002年

福島達臣、大橋正和　著「可逆問題と不可逆問題の概念ーグローバリズムの見地からー」　第４回　政策メッセ研究報告集　2002年

福島達臣、大橋正和 著「不可逆問題と問題空間」 中央大学総合政策研究　2002年

福島達臣　著「問題解決のlogic ー可逆問題と不可逆問題ー」 総務省電子社会基盤分科会　発表資料　2003年

R.アクセルロッド　他　著　「複雑系組織論」　ダイヤモンド社　2003年

連絡先

福島達臣

中央大学大学院総合政策学研究科

東京都文京区春日1-13-27

Tel. 03-3817-7433

E-mail, fukushimamd@aol.com

A Japanese Sentence Classifying Survey and its Human Aiding Techniques

日本語文分類調査とその作業者支援方法について

Izumi Suzuki* Ario Ohsato**
鈴木 泉 大里 有生

Nagaoka University of Technology
長岡技術科学大学
Emails: *suzuki@kjs.nagaokaut.ac.jp **ohsato@kjs.nagaokaut.ac.jp

Abstract: A Japanese sentence classifying survey and its preliminary survey are proposed first. Sentences of a corpus are roughly classified by many human operators in the preliminary survey. And in the main survey, the roughly clustered sentences are classified more precisely by language experts. Next, some human aid techniques are introduced to assist the human operation of the preliminary survey. Hundreds of thousands of sentences must be mutually checked with their meaning, and the operation has to be shared with non-expert operators. Therefore the aiding program is indispensable and is the key technique whether the survey performs well or not.

はじめに、日本語文分類調査とその１次調査を提案する。１次調査ではコーパスで使われている日本語文が多くのオペレーターによって大まかに分類される。続いて本調査では、大まかに分類されたリストに基づいて、専門家の手によって、意味に応じて更に細分化される。次に、１次調査において人間の作業を支援する手法を紹介する。調査では、何１０万にも上る分の意味を相互に比較する必要があり、しかもその作業は専門化以外のオペレーターらによって分担される。従って、その支援プログラムは調査に必要不可欠であり、成否の鍵を握っているといえる。

1. The Proposal

Authors propose a Japanese language survey to list sentences that cover many (for example 70%) of a Japanese text corpus, like newspaper articles or bulletin board articles on the web.

Language is said to be so productive that the number of concepts created by sentences is truly countless. However we strongly believe that we can specify the list of sample sentences that covers a certain percent of the corpus. Sentences are not going to be classified as they are exactly the same as each other, but by the following criteria: First, Proper nouns, numerals, and some specific words are treated as variables. For example, in the sample sentence shown below, the underlined words like "藤原里華", "１", and "スペイン" are treated as a variable. Second, sentences that express the same concept are treated as they are in the same category regardless of the difference of verbs or sentence structures. We have no clear rule to regulate what pair of sentences expresses the same idea and what pair does not. So in the preliminary survey, sentences are to be clustered roughly by assigning a kind of distance between each pair, which lists the most frequently used concept of sentences, for example the top 10 thousand concepts.

Sample:
一方、女子ダブルス１回戦では藤原里華、小畑沙織組が、第１シードのビルヒニア・ルアノパスクアル、パオラ・スアレス組（スペイン、アルゼンチン）に６－３、４－６、６－２で敗退。

Meanwhile, the women's doubles team of Rika Fujiwara and Saori Obata lost in the firs round to the top-seeded pair of Spain's Virginia Ruano Pascual and Argentina's Paolo Suarez 6-3, 4-6, 6-2.

2. Motivation

The interest in statistic natural language processing is increasing. In the field of machine translation, example-based machine translation (or parallel corpus-based translation) that uses previous translation examples of similar sentences is expected to be more

accurate and easier to build than conventional methods. Assume that the system is asked to translate the sentence:

Julie bought a book on economics.

And assume that the input only matches parts of different examples:

(a) **Julie bought** a notebook.
Julie compró una libreta.
(b) Ann read **a book on economics**.
Ann leyó **un libro de economía**.

By putting together the corresponding segments from the Spanish side, a translation can be constructed [1]:

Julie compró un libro de economía.

If we list most of the sentence we use, and the list is classified with their meaning, we would learn how many basic concepts we deal with. And we would learn that some part of language must be treated as a combinatorial matter or the number of concepts is truly countless. In any case, it must be useful for various fields of natural language processing.

3. The process

The purpose of the primary survey is to cluster the sentences roughly by assigning a kind of distance between two sentences. The work is shared by many operators being online, each of whom is not always a language expert.

First, a sentence (or the *target*) is fetched from the corpus. Proper nouns (固有名詞), numerals (数詞), and some specific words are treated as variables (変数) in each sentence. We do not yet decide whether or not any compound sentence (重文) should be divided into two or more simple sentences (単文). Anyway, those preprocessings are to be executed by a program.

Next, *keywords* (キーワード) are added to the target. Any words or phrases can be a keyword. Then the target is going to be compared with the sentences on the list (or the *categories*). Now we are thinking of the following levels of relation between two sentences:

The two sentences are
L1. Exactly the same as each other
L2. Different sentences but they have the same meaning, for sure
L3. It looks like they have the same meaning, but not very sure
L4. Different just because some words or phrases are clearly different in each sentence
L5. Very different in their meaning.

2つの文は
L1. 完全に同一の文である
L2. 異なる文であるが、間違い無く意味は同一である
L3. 意味は同一ともとれるが、確証は無い
L4. 幾つかの語句が明確に異なる点を除いて同一の意味である
L5. 非常に異なる意味を持つ

If level 1 holds true, which a program detects, 1 is added to the frequency of this sentence. Otherwise, the target is added to the categories, and in the case of level 2, 3, or 4, the relation between the two sentences is recorded.

4 Human aid techniques

Several human aid techniques are indispensable to perform the process. A human can not generate all the possible keywords of a sentence. Therefore an aiding technique with a thesaurus resource must be installed. Even more important is a technique that picks up some of the most likely sentences of a target. As many as a hundred thousand categories can exist, therefore it is impossible for a human to check all the categories without any aiding program.

4.1. Category pinpointing technique

Let S be the set of entire sentences, and let K be the entire keywords. Defined the set $A = 2^K$ (power set)

Assume that any word $k \in K$ is either a keyword of a sentence $s \in S$ or not. By $k \leftarrow s$ it denotes that a word k is a keyword of a sentence s. A set of words $a \in A$ is called a *keyword list* of a sentence s if $k \leftarrow s$ for all $k \in a$.

By $a \Leftarrow s$ it denotes that a is a keyword list of a sentence s. A set of sentence whose keyword list can be a (or sentences related to a) is defined as

$$\tilde{a} = \{s \in S \mid a \Leftarrow s\}$$

(Claim 1) Let a_1 and a_2 be keyword lists.
If $a_1 \subseteq a_2$ then relating sentences are $\tilde{a}_1 \supseteq \tilde{a}_2$

Proof

$$\begin{aligned}\tilde{a}_1 &= \{s \in S \mid a_1 \Leftarrow s\} \\ &= \{s \in S \mid k \leftarrow s, \forall k \in a_1\} \\ &\supseteq \{s \in S \mid k \leftarrow s, \forall k \in (a_1 \cup a_2)\} \\ &= \{s \in S \mid k \leftarrow s, \forall k \in a_2\} \\ &= \tilde{a}_2\end{aligned}$$

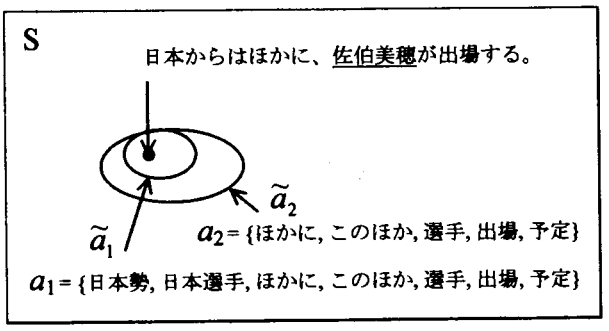


Figure 1. Relating sentences to a list of keywords

The larger a keyword list, the narrower its relating sentences are. (**Claim 1**)

Since a category has a greater number of keywords than a target, it is natural to narrow the sentences down to those which are covered by sentences related to the target. (See **Figure 2.**) It means we should pick up such sentences i that follow

$$\tilde{a}_{Ci} \subseteq \tilde{a}_T \qquad (1)$$

where a_{Ci}: keyword lists of the category i,

a_T: keyword lists of the target

The formula (1) is equivalent to pick up such categories i that follow

$$a_{Ci} \supseteq a_T \qquad (2)$$

As long as a category keyword list is not always complete, we should then widen the searching area as in the formula (2').

Pick up such categories i that $a_{Ci} \supseteq a_{T'}$,

where $T' \subset T$ (2')

The smaller the keyword list T' is, the wider the searching area will be.

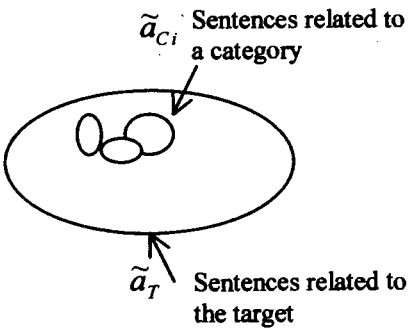


Figure 2.
What category the program should pick up

4.2 Data accuracy checking

The most serious error throughout the work is failing to find categories that are related to a target, after which the operator would create a new category without assigning any relation to already existing ones. And it is almost impossible to find the missed relations afterward. In order to prevent this trouble, some dummy sentences should be included in the bunch of target sentences, and each dummy has some relations to one of the existing categories. If some of the dummies are not classified properly, other categories created by this operator can be improper, too. Those categories must be deleted and sentences belonging to them will be checked again.

Each operator's transactions must be logged for the time being, so that we can investigate the reason why the operator failed to find a proper category.

5. Future plan

The category pinpointing technique is already programmed on the tentative system. We are now under the process of checking its usefulness by collecting more and more variety of sentences. One of the expected troubles is: because of the lack of keywords, the aiding program could not narrow down the categories enough so that operators must check so many categories. In this case, another aiding program that assists humans to add proper keywords to narrow the category is requested. I intend to develop such an intelligent human

interface that as the survey progresses, the system does not only increase the number of categories but also completes the database and be more intelligent. In any case, whether or not the survey performs well might depend on the design of human aiding programs.

カテゴリーを絞り込む手法については既に試験的なシステムに実装し、現在より多くの文を収集してその効果を確認している最中である。予想される問題の一つは、キーワードが不足しているために、支援プログラムが十分にカテゴリーを絞り切れず、オペレーターが非常に多くのカテゴリーをチェックしなければならない可能性である。この場合、カテゴリーを絞り込むために必要なキーワードを人間が更に追加することを支援する新たなプログラムが必要である。我々は、調査が進むにつれて単にカテゴリーが増えるだけでなく、データベース自体が充実し、より知的にふるまうヒューマン・インターフェースを構築するつもりである。いずれにしても、人間を助けるプログラムの良否が調査の成否の鍵を握ることは間違い無い。

References:

[1] Arturo Trujillo, Translation Engines: Techniques for Machine Translation, Springer 1999

[2] 日本語語彙大系, NTT コミュニケーション科学研究所 監修, 岩波書店.「意味体系」、「単語体系」、「構文体系」の 3 つで構成され、「構文体系」には、日本語の用言 6,000 語に対し、その用言がとる 14,000 件の日本語文型パターンが示されている。

[3] 研究報告 「自然言語処理」No.153 – 015, 日英対訳パターンの自動抽出に向けて, 道祖尾太祐、村上仁一、徳久雅人、池原悟

[4] 研究報告 「自然言語処理」No.147 – 001, 意味類型を用いた日英文型パターンの対応づけ, 斉藤健太郎、池原 悟、村上 仁一

[5] 研究報告 「自然言語処理」No.144 – 004, 用例ベース翻訳のためのパラレルコーパスからの対訳対発見, 荒牧英治、黒橋禎夫、佐藤理史、渡辺日出雄

[6] 研究報告 「自然言語処理」No.110 – 007, 日英機械翻訳に必要な結合価パターン対の数とその収集方法, 白井 諭、池原 悟、横尾 昭男、井上浩子

[7] Foundations of Statistical Natural Language Processing, Christopher D. Manning and Hinrich Schütze, The MIT press, 2001

連絡先：
〒940-2188
新潟県長岡市上富岡町 1603-1
長岡技術科学大学 工学部 経営情報系
鈴木 泉
電話：0258-47-9360
FAX：0258-47-9350

Webページからの単語意味情報の抽出

Extraction of the Word Meaning from Text Data in Web Pages

須田　祐史　　横川　壽彦
SUDA, Yuuji　　YOKOGAWA, Toshihiko
帝京平成大学　情報学部
Teikyo Heisei University

Abstract: There exist lots of new words and dictionaries have few entries for them. To know their meaning, Web page search is useful, but the search results have noises. In this paper, we propose a system extracting paragraphs with descriptions of word meanings from the web pages. From the search result of a new word, the system extracts meaning description candidates by the surface structures of the text, such as the number of existence of the searched words, their position, and the pattern coexisting them. The experiment for 10 words shows that the system extracts the candidates of meaning descriptions.

1. はじめに

情報量の増加に伴って新語が出現するばかりでなく、既存の語の意味・用法も変化している。このような語の意味を知るために、辞書・事典を用いるのが一般的であるが、急激に出現する新語や流行語、スラングといった一般的ではない用語に関しては、辞書に収録されない、あるいは、収録されたとしても時間的なずれが生じることが予想される。

これに対して、インターネット上のWebページには語の意味や用法が散在している。これらを調べることによって、既存の辞書情報の補完を行うことができる。しかし、調べたい語を検索キーとしてのサーチエンジンを用いた検索では、大量のページが検索結果として得られる。検索結果表示では、検索語を含む範囲を部分的に表示しているが、不十分な場合が多い。また、Webページ全体を表示すると、用語の説明されている部分を探し出すための手間がかかる。桜井らは、用語を入力すると、Webから用語説明の文章を 13 種類の用語定義文を文型パターンとして用意し、用語定義文のパターンにマッチした文章を収集し、それらを整理・編集することによって用語説明を生成するシステムを構築している[1]。また、藤井らは、辞書説明文から定義文パターンを自動的に生成し、定義文を抽出するシステムを提案している[2]。

本研究では、サーチエンジンを用いて得られた Web ページ上から検索キーとして用いた用語を含む部分を単純な表層パターン、出現位置などを利用して抽出することにより語の意味情報の候補とする。

2. 意味情報抽出システムの概要

図1にシステムの概要を示す。

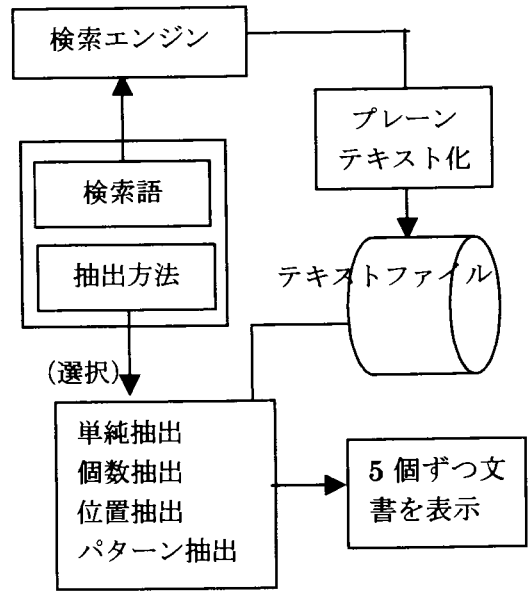


図 1 システムの概要

本システムは、検索キーとなる語と、抽出方法を指定し、検索・抽出を行い、その結果を表示する。以下のステップで処理は実行される。

2.1 検索エンジンによる検索

まず、既存の検索エンジンを用いて検索語をキーとして検索を行う。現在は、Google ジャパンによるサーチエンジンを用いて検索語を検索する。テキストデータの取れるもののみを対象とし、検索結果上位 50 文書を取得する。

2.2 プレーンテキスト化

検索結果として得られる各 Web ページに含まれるテキストデータを取得し、以下の処理を行う。

(a) タグ情報などは、改行に置き換える。
(b) 空白・改行情報を縮約する。
全角文字間の空白の除去や改行記号の除去を行う。この際、2個以上の改行連続は、段落の切れ目としてマークする。

プレーンテキスト化は、最初の検索実行時にバッチ的に行われ、テキストファイルとしてハードディスク上に格納する。

HTML ファイルのタグは、段落情報以外に構文的な情報を含む[1]が、本システムでは、積極的には活用していない。

2.3 表示領域の抽出

以下の各抽出条件に従い、表示するテキスト領域を抽出する。

(a) 単純抽出：単純に、検索語の出現位置を抽出する。文書中の無駄な部分の排除を行う。
(b) 個数抽出：ページ中に一定個数以上の出現回数のある場合のみ抽出する。
(c) 位置抽出：出現位置が、一定の範囲より前のものだけを抽出する。
(d) パターン抽出：「が」「は」など取り立ての助詞がついている場合、及びかぎ括弧で囲まれている場合を抽出する。

文書中に含まれる意味記述は、検索語とともに出現するという前提を置き、必要部分のみを取り出す。

個数抽出では、意味を説明するような文書では、何度も検索語が出現するであろうという予測に基づく抽出である。現在は、3回以上出現したものを抽出する。

位置抽出は、意味情報の説明は文書の先頭部分に近い位置に出現するであろうという想定に基づく抽出である。現在は、文書先頭より 10 段落以内に出現することを条件とする。

パターン抽出は、意味記述部分にはある一定のパターンがある[1][2][3][4]という前提に基づく。本システムでは、形態素解析的手段を用いず、単純な表層パターンのみとし、負荷の少ない方法を取る。

抽出するテキスト領域の範囲は、検索条件に合致する検索語の出現する段落とする。

2.4 表示

表示は、上記に抽出された領域を 1 度に 5 文書ずつ行う。同一文書中に 2 ヶ所以上出現する段落が存在する場合は、すべての段落を表示する。なお、各文書の表示領域はスクロール可能である。

図 2 システムの検索結果表示例

実験システムは、Windows XP 上に、Java 1.4.1 を用いて構築した。

3. 抽出実験

システムの有効性を確認するために、以下の 10 語について抽出実験を行った。

実験対象語：

「つゆだく」「かばちたれ」
「SQL スラマー」「しゃくれ」
「スカイフック」「テレビっ子」
「ハーレムグローブトロッターズ」
「ヤオミン」「フィンガーズ」「ワンギリ」

実験には、Google ジャパンによるサーチエンジン（URL:http://www.googole.co.jp）を用いた。検索語をクエリーとして検索し、検索された Web ページに存在するテキストデータ(上位50個）を対象として、各抽出条件を用いて抽出実験を行った。

4. 実験結果

表 1 に各抽出方法によって抽出された文書数の平均を示す。単純抽出で抽出されなかった文書は、テキスト中に検索語を含まない場合であり、約 11%の文書がこれに該当する。

表 1 抽出文書数

抽出方法	抽出文書	全文書に
	平均文書数	対する割合
単純抽出	44.4	88.8%
個数抽出	19.3	38.6%
位置抽出	14.9	29.8%
パターン抽出	17.8	35.6%

表 2 に、文書内の意味記述の有無を示す。約 32%の文書に意味記述が含まれている。各抽出方法において、抽出された文書に対する意味記述を含む文書の割合は抽出を行わない場合に比べておおむね増加する。なお、各抽出条件で、意味記述を含む文書がまったく抽出されない例は存在しなかった。

表 2 意味記述を含む抽出文書数

抽出方法	意味記述を含む		
	文書数	割合	割合平均
全文書	16.0	32.0%	31.9%
単純抽出	16.0	36.0%	36.4%
個数抽出	7.6	39.4%	50.6%
位置抽出	4.5	30.2%	36.1%
パターン抽出	9.6	53.9%	50.9%

なお、平均は、意味記述を含む文書の抽出文書数に対する割合の平均値である。個数抽出の平均が大きく出ているのは、ある語において結果文書中にすべて意味記述が含まれていたためである。

表 3 に示す縮約率は、各抽出方法によって、文字単位で計測した元のテキスト量に対する表示対象テキスト量の比である。検索語を含む段落のみを表示するので、元のテキスト量に比較すると表示量が減少している。

表 3 表示量の縮約率

抽出方法	縮約率	
	全体	平均
単純抽出	5.5%	6.5%
個数抽出	4.5%	5.5%
位置抽出	2.1%	2.8%
パターン抽出	1.9%	2.2%

表 4 に、意味記述が含まれる文書が、何番目の文書として出現するかを示す。現在のシステムは 1 画面に 5 文書を表示する設定のため、何番目の画面で意味記述が表示されるかを表している。全体的には、全文書を表示するよりも先に意味記述に到達することが確認できる。

また、出現位置情報に基づく抽出結果では求める意味記述を含む文書が遅めに現れている。

表 4 意味記述の出現文書位置(1)

抽出方法	最初の意味記述文書		
	1〜5	6〜10	11〜
全文書	7	2	1
単純抽出	8	2	0
個数抽出	10	0	0
位置抽出	8	1	1
パターン抽出	10	0	0

プログラムを変更し、表示領域を大きめに取り、1 画面 3 文書を想定する。この場合の結果は、表 5 となる。位置抽出、パターン抽出では第 1 画面に入る可能性が高いので、同時に表示する文書数を少なくし、表示領域を拡大しても有用性の低下は少ない。

表 5 意味記述の出現文書位置(2)

抽出方法	最初の意味記述文書			
	1～3	4～6	6～9	10～
全文書	5	3	1	1
単純抽出	5	3	2	0
個数抽出	9	1	0	0
位置抽出	5	3	1	1
パターン抽出	8	2	0	0

表 6 は、意味記述が存在するにもかかわらず、その抽出に失敗した文書の割合を示す。

特に、位置抽出において失敗する例が多い。これは、検索結果文書における対話的文書の存在が原因の一つとしてあげられる。位置情報を段落数で設定したため、対話のように短い段落が多数存在する文書では、段落位置指定に基づく抽出が有効性に欠けた結果と考えられる。

また、プレーンテキスト化の際の段落認識が文章の段落としてそぐわない場合も存在した。

表 6 意味記述抽出失敗割合

抽出方法	抽出失敗	
	全体	平均
単純抽出	0.0%	0.0%
個数抽出	43.1%	43.7%
位置抽出	66.7%	67.5%
パターン抽出	42.5%	38.4%

5. おわりに

提案するシステムは、Web ページの検索結果から単純な条件を用いて、意味記述の候補を抽出・表示する。条件は、検索語の存在、検索語の出現回数、存在位置、表層パターンの 4 種類である。また、表示する部分は検索語の存在する段落とする。

システムのプロトタイプを構築し、10 語について抽出実験を行った。

単純に検索結果を表示する方法に比して、各抽出方法による抽出結果は同等以上の意味記述を含んでいることを確認した。さらに、検索語の出現する段落のみを表示するので、表示量の縮約効果が認められる。

出現回数の情報を利用した抽出は、表示量の縮約効果が大きい。また、簡単な表層パターンを利用することにより、意味情報の含まれている記述を含む確率が向上することも確認できた。

5 文書を 1 画面に表示することにより、1 画面もしくは 2 画面内に意味記述を表示することが可能である。この結果、意味記述にたどりつくまでのコストを大幅に削減できたといえる。

長い段落に意味記述が含まれる場合、表示枠内に入りきらない場合が存在する。また、段落の認識にも問題点が残っている。

今後は、以下の点についてさらに実験・検討を行う。

- 大量の語に関して提案手法の有効性を検証する。
- 抽出結果より、意味記述部分をさらに精密に抽出する方法を検討する。
- 文書の特性を調査する。特に、対話的文章などにおける抽出方法を検討する。また、文書特性に合わせた段落の認識方法を検討する。
- 抽出条件の組み合わせによる性能向上を検討する。

参考文献

[1] 桜井裕，佐藤理史：ワールドワイドウェブを利用した用語説明の自動生成，情報処理学会論文誌，Vol. 43, No. 5, pp. 1470-1480, 2002.

[2] 藤井篤，石川徹也：用語説明抽出に基づく Web 文書の事典的利用，言語処理学会第 6 年次大会発表論文集，pp.296-299, 2000.

[3] 木田敦子，乾裕子，深谷亮，西野文人：新聞記事からの用語集生成のためのテキスト分析，情報処理学会研究会報告，1999-NL-134, pp.85-9, 1999.

[4] 黒橋禎夫，長尾真，佐藤理史，村上雅彦：専門用語辞典の自動的ハイパーテキスト化の方法，人工知能学会誌，Vol. 7, No. 2, pp.336-345, 1992.

連絡先

〒290-0193
千葉県市原市潤井戸字大谷 2289-23
帝京平成大学　情報学部
横川　壽彦
電話：0436-74-7055
FAX：0436-74-3970
Email：yokogawa@ci.thu.ac.jp

文脈依存型概念表現モデルの構築

Constructing a concept representation model dependent on context

関矢　浩史　　天住　貴子*　　高木　友博
Hiroshi Sekiya　　Takako Amazumi　　Tomohiro Takagi
明治大学 理工学部 情報科学科
Department of Computer Science, Meiji University

Abstract: In this paper, we propose a neural network model which has new architecture based on concept structure in human brain. This network model is constructed by using knowledge in brain science and information science. We built a concept representation model, which has hierarchical structure and holds a current context in each hidden layer, on this network. Our proposed approach's utility and capability is discussed from verification results.

1．　はじめに

「脳の世紀」と言われる現在，脳科学分野における研究の活性度には目を見張るものがあり，数多く行われている実験データからさらに新たな理論なども提案されているという状況である．その一方で，1943 年に McCulloch と Pitts がニューロンの計算モデルを提案してから半世紀が経った現在，情報科学の分野では既存のニューラルネットワークが，その能力を発揮できる場面，出来ない場面が判明しつつあり，既存のモデルの規模を大きくしただけでは人間の脳の情報処理を本質的に実現し得ないと考えるに至っている．そこで本研究においては，脳科学から得られた知見を基に，情報科学の知見を補完することにより，文脈に依存した概念を表現することが出来るニューラルネットワークを提案し，このネットワークを用いた概念表現モデルの有効性について検証を行った．

2．　脳科学・情報科学の知見より

2．1．ニューロン素子

ニューロン素子のモデルとしては，内部ポテンシャルと閾値を比較して出力を 1（発火），もしくは 0（非発火）の 2 値とする McCulloch と Pitts の閾値素子を用いることとした [1]．但し，そのまま用いるのではなく，内部ポテンシャルの膜もれによる時間減衰も考慮することとした．

$$U_i(t) = \sum_j w_{ji} x_j(t-1) + aV_i(t-1) \qquad (1.1)$$

$$\begin{aligned} U_i(t) \geq h \quad & x_i(t) = 1, V_i(t) = 0 \\ U_i(t) < h \quad & x_i(t) = 0, V_i(t) = U_i(t) \end{aligned} \qquad (1.2)$$

ここで，$V_i(t)$ は時刻 t におけるニューロン i の内部ポテンシャルである．また，a は膜もれを表す時定数であり，0 から 1 の間の値をとるものとする．

この素子は，次節で述べる学習則を用いるために必要な 0／1 の 2 値をとるモデルの中でも最も単純なもののひとつである．また，内部ポテンシャルの時間減衰によって，遠い過去の入力分が大きく影響するような発火を抑えることが出来る．

2．2．学習則

学習則は，近くにある 2 つのニューロンの発火タイミングを観察し，シナプス前ニューロンがシナプス後ニューロンの発火より前に発火していれば結合重みを増加させ，逆であれば減弱させるということから Spike Timing Dependent Plasticity（STDP）を用いることとした [2]．

*現在，旭化成情報システムに所属

$$\Delta w_{ij} = \delta^{STDP} \sum_n \sum_m w^{STDP}(t_{ijn} - t_{im}) \quad (2.1)$$

$$w^{STDP}(s) = \begin{cases} \exp(s/\tau^{STDP}) & (s \le 0) \\ -\exp(-s/\tau^{STDP}) & (s \ge 0) \end{cases} \quad (2.2)$$

ここで，δ^{STDP}は学習単位量であり，t_{ijn}およびt_{im}は，ニューロンjからニューロンiへのn番目のスパイク入力時刻およびニューロンiのm番目の発火時刻である．

この学習則では，まずHebb則とは違い，シナプスの結合重みを減弱させる学習が存在している．また，シナプスの前後2つのニューロンのみに注目していればよく，バックプロパゲーションなどの学習則のようにネットワーク全体の形状を限定することがない．さらに，シナプス前後のニューロンの状態だけで計算出来るということは，ネットワークの規模の増大などに対しても計算量の増加を抑えることが出来る．そして，Hebb則とは違い，ある一定の時間窓の間に両者の発火が起ればよいので，少し時間的に離れて発火したニューロン同士にも関連付けを行うことが出来る．

2．3．文脈判断（依存）機能

文脈を扱う手法にはいくつか種類があるが，ここで我々は時系列データの分類などに幅広く用いられているElmanネットワークに注目した[3]．しかし，このネットワークにおける文脈判断の能力は隠れ層の値をコピーし保持する文脈層の存在によってもたらされているものであり，実際の脳において隠れ層と1対1に対応する文脈層のような機構が存在しているとは考えにくい．そこで，計算の単位時間の見直しを図った．具体的には，通常は信号が入力されてから出力層に到達するまでを1単位時間として計算するところを，本研究では信号が結合をひとつ通るのにかかる時間を1単位時間として計算を行う方法をとった．この計算方法では，時刻tにおけるネットワーク全体の発火パターンから時刻t+1におけるネットワーク全体の発火パターンを計算することになる．こうすることで，一見すると文脈層をなくすことが出来る．但し，計算をする上では直前の状態を保持しており，そのことも含めて本研究で用いるネットワークもElmanネットワークと同じように文脈を扱うことが出来ると考えられる．

3．　提案システム

3．1．システム概要

まず，ネットワーク全体の構成（図1）は，入力・出力層（これらは同一の層であるが，役割によって呼び方を分けることとする），そしてひとつ以上の隠れ層という形になっている．また，入力・出力層のノードにはそれぞれひとつの単語を割り当てており，隠れ層のノードには特に名前は割り当てない．処理・信号の流れは次の通りとする． i) まず入力層のノードが発火する． ii) その発火に伴い隠れ層上に発火と内部ポテンシャルの分布パターンが発生し，文脈情報を保持する．隠れ層は入力・出力層に近いものほど短い時間の文脈情報を保持しており，最終的には iii) 最下位の隠れ層から出力層へ信号が伝播することになる．

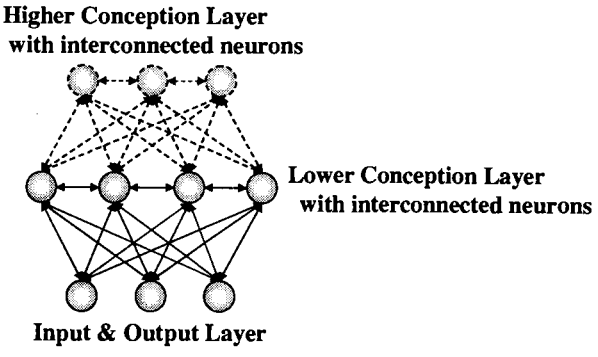


図1　システム概要

3．3．結合

ネットワーク内の結合は次のようになる．

○入力・出力層

　入力元：最下位の隠れ層

　出力先：最下位の隠れ層

○隠れ層

　入力元：入力層

　　ひとつ上位の隠れ層

　　ひとつ下位の隠れ層

同層内の自分以外のノード

出力先：入力層

ひとつ上位の隠れ層

ひとつ下位の隠れ層

同層内の自分以外のノード

ここで，隠れ層のノードに自分自身との結合を無くした理由は学習則にある．本研究で採用したSTDPではその場合，自分と自分の間で発火したタイミングを見ることになり，当然タイミングのずれが存在しないため，学習が上手くいかない（結合が強まり続ける，もしくは弱まり続ける）ことが懸念されたからである．

3．4．学習

学習は，入力した信号が出力層に伝播するタイミングで出力層に理想の発火パターンを提示することで実現する．この操作により，出力層の発火よりも前の時刻において隠れ層の発火が起こっていれば結合重みを学習することが出来る．また，最下位の隠れ層から出力層への結合以外はSTDPにより自動的に学習がすすむことになる．

4．　実験結果

4．1．入力データ・教師データ

入力・出力層のノードとして次の13個の「ＴＶ」「番組」「テレビ局」「スポーツ」「サッカー」「ゴルフ」「相撲」「野球」「スノーケリング」「ビーチバレー」「リゾート」「沖縄」「ハワイ」を用意した．また，隠れ層は1層とし，ノード数は55個と83個の2種類とした．ちなみに，前述したように隠れ層は文脈を表しているため，各ノードに入力・出力層のような名前はついていない．これは，あとから名前をつけることが可能かもしれない点で実際の脳内のニューロンと同じにするためである．

記憶させるパターンは《記憶 1》，《記憶 2》，《記憶 3》の3種類（表1～3）とし，《記憶 1》は「TV」⇒「スポーツ」に対して「番組」＆「サッカー」＆「ゴルフ」＆「相撲」＆「野球」を，《記憶 2》は「リゾート」⇒「スポーツ」に対して「スノーケリング」＆「ビーチバレー」＆「沖縄」＆「ハワイ」を，《記憶 3》は「ハワイ」⇒「スポーツ」に対して「スノーケリング」＆「ビーチバレー」＆「相撲」をそれぞれ理想の出力パターンとした．ここで，⇒は順序を表す記号として用いており，a⇒b の場合は a，b の順で入力を行うということを表している．具体的には，《記憶 1》は時刻 t=1 で「TV」、t=2 で「スポーツ」を，《記憶 2》は時刻 t=1 で「リゾート」，t=2 で「スポーツ」を，《記憶 3》は時刻 t=1 で「ハワイ」，t=2 で「スポーツ」を入力とし，それぞれの時刻において入力に対応するノードを発火させた．

また，最後の入力が出力層に到着する時刻 t=4 でそれぞれの入力に対応させて憶えさせたい出力パターンに対応するノードを発火させることで学習を行った．学習は3つのパターンを順に1回ずつ学習することを1サイクルとし，全部で10000サイクル行った．

	TV	番組	テレビ局	スポーツ	サッカー	ゴルフ	相撲	野球	スノーケリング	ビーチバレー	リゾート	沖縄	ハワイ
入力 t=1	■												
入力 t=2				■									
出力 t=4		■			■	■	■	■					

表1　《記憶 1》

	TV	番組	テレビ局	スポーツ	サッカー	ゴルフ	相撲	野球	スノーケリング	ビーチバレー	リゾート	沖縄	ハワイ
入力 t=1											■		
入力 t=2				■									
出力 t=4									■	■		■	■

表2　《記憶 2》

	TV	番組	テレビ局	スポーツ	サッカー	ゴルフ	相撲	野球	スノーケリング	ビーチバレー	リゾート	沖縄	ハワイ
入力 t=1													■
入力 t=2				■									
出力 t=4							■		■	■			

表3　《記憶 3》

4．2．実験結果

文脈層のノード数を55個にした場合と83個にした場合の学習と想起を 30 回ずつ行った結果を表 4

に示す.

ノード数	55	83
正解	16	25
失敗	14	5
正解率	53.33	83.33

表4　想起結果

記憶はそれぞれ,「TV」→「スポーツ」,「リゾート」→「スポーツ」,「ハワイ」→「スポーツ」, と与えられているため, 最後に入力されたものに対して単純に出力しているのではなく, その前の入力を文脈情報として保持しており, その文脈上で表れた同じ単語に対して違う意味として捉えることに成功していると考えられる.

しかし, 30 回の試行中それぞれ 16 回, 25 回と100%の確率で記憶が学習出来るとは限らなかった. これは, 入力層と隠れ層間の結合重みの初期値の組み合わせが悪い場合において,《記憶 A》と《記憶 B》のふたつを記憶させようとした時に,《記憶 A》の最初の入力と《記憶 B》の最初の入力の結果として隠れ層に表れる発火パターンもしくは内部ポテンシャルの分布が同じような形になってしまっているからだと推察される. このことを支持するように, 想起に失敗した場合のネットワークの答えは必ず《記憶 A》と《記憶 B》の論理和をとった値を想起している. また, ノード数を増やすとその悪い初期値の組み合わせに陥る確率が減るために, 学習の成功率が上がったのだと推察される.

5.　まとめ

本研究では, 脳科学の知見と情報科学の知見とを融合することで新たなニューラルネットワークモデルの提案を行った.

また, 例を用いた実験により, 提案モデルが文脈依存性を持つことを示した.

ここで, 正解率に限界が生じるという問題は, 言葉をそのまま入力ノードと対応させてしまったことが原因である可能性が考えられる. 実際の脳内では, ある言葉を表現するニューロンの物理的な位置は音韻的な近さや, その言葉が関連する他の感覚器からの入力を受け持つ領野との近さなどから必然的に決まるといった可能性が考えられる. そして, 物理的な距離を上手く決めることが出来れば, 結合に近傍の概念を導入することで, ニューロン同士の物理的な距離によって結合させるかどうかを調整するといったことも出来るが, 本研究での提案モデルでは適当に言葉を並べてしまっているため, 上記の方法は使えない. 一方, 客観的に言葉同士の距離を計算することはかなり難しい問題であるといえる. そのため, 言葉を入力単位としている以上は 100%の正解率を出すことは困難であろうと考えられる.

よって, 今後の課題は, 入力単位を言葉以外とするための方法について検討を行うこと. そして, 隠れ層の段数を増加させた場合にも, それぞれの階層において文脈を上手く保持していくことが出来ることを検証することなどが挙げられる.

参考文献

[1] W.S. McCulloch, W. Pitts： A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, Bulletin of Mathematical Biophysics, Vol.5, pp.115-133 (1943)

[2] W. Gerstner, R. Kempter, J.L. van Hemmen, H. Wagner ： A neuronal learning rule for sub-millisecond temporal coding, Nature, Vol.383, pp.76-78 (1996)

[3] Jeffrey L. Elman： Finding Structure in Time, cognitive science, Vol.14, No.2, pp.179-211 (1990)

連絡先：

〒214-8571

神奈川県 川崎市 多摩区 東三田 1-1-1

明治大学 理工学部 情報科学科

関矢 浩史

TEL：044-934-7469

FAX：044-934-7912

E-MAIL：sekiya@cs.meiji.ac.jp

ファジィカラーネーミングシステム

A fuzzy color-naming system

あいまいな色はことばで表現できるか
Vague colors can be expressed in words?

菅野 直敏
Naotoshi Sugano
玉川大学 工学部
Faculty of Engineering Tamagawa University

Abstract. This paper proposes a fuzzy system that, for a known hue name (e.g., red), can extract a few tone modifiers (e.g., dark, dull, deep, no modification, etc.) suitable for color names in common use. The system is constructed by fuzzy sets with conical membership functions that correspond to respective JIS-like modifiers on the tone plane. Achromatic colors are treated as subsets of reddish achromatic colors. The system extracts, in a simple manner, the membership grade of a modifier from projection of a conical membership function. Vague colors among neighboring JIS modifiers are indicated by three candidate modifiers within each grade. This system shows high performance in terms of percentage of correct outputs for vague colors. Also the NCS (Natural Color System) instead of HLS system was applied to this system.

1. はじめに

多種多様な色彩を我々は自分の知っている範囲内で修飾語を用いて簡単に表現することができる．しかし，色彩名を客観的に表現することは難しい．そこで，いろいろな色を形容詞で簡単に表現できるファジィカラーネーミングシステムを構築してきた[3]．本研究では修飾語と明度と彩度の関係に円錐形メンバーシップ関数を使用し，あいまいな色を JIS 規格に近い色名にすることができ，またスウェーデンのナチュラルカラーシステム(NCS)[4]に対しても使用できることを示す．

2. 色と色名

色は有彩色と無彩色に大きく分けられる．無彩色は色みのない色のことで，有彩色はその他の色である．

色名は大きく系統色名と慣用色名に分けられる．系統色名はあらゆる色を系統的に分類して表現できるようにした色名，慣用色名は慣用的な呼び方で表した色名である．以下は JIS 規格(HVC 系)[2]に定められている系統色名である[1]．

系統色名は(1)の基本色名に(2)の修飾語を付けたものとする．

(1)基本色名：有彩色の基本色名は赤，黄赤，黄，黄緑，緑，青緑，青，青紫，紫，または赤紫の何れかを用いる．無彩色の基本色名は白，灰色，または黒を用いる．

(2)明度と彩度に関する修飾語：有彩色には鮮やかな，明るい，こい，薄い，くすんだ，暗い，ごく薄い，明るい灰，灰，暗い灰，またはごく暗いの何れかを用いる．無彩色には灰色に限り「明るい」か「暗い」を用いる．

3. 方法と結果

前システム[5)-12)]ではHVC系の代わりにHLS系を用いた．明度(L)と彩度(S)よりトーン修飾語を求めるのに，明度-彩度平面上で各修飾語に応じた円錐形のメンバーシップ関数を取る方法を使った．明度-彩度平面（等色相面）の修飾語は色み・明るい・こいの 3 つで表現されているので，円錐を密に組み合わせると正三角形に組み込むことができる．トーン修飾語を求めるのに JIS で定められた等色相面には円錐形のメンバーシップ関数を用いた．従って，HLS の等色相面を NCS のそれに換えることで表す（図 2）．図 1 は NCS の等色相面図で白矢印は whiteness, blackness, chromaticness を示している．横軸は HLS の彩度と見なすことができるが，縦軸は明度となっていない．円錐形メンバーシップ関数群(A_1～A_{21})は各方向に 20%の間隔で配置してある．無彩色の A_{01}～A_{06} は三角形で構成されたメンバーシップ関数群である．円錐形メンバーシップ関数（A_1～A_6）のあいまいさは色相修飾語のファジィ集合（B_1～B_6）に対応している．色相が赤であれば，これらの色相修飾語（＋無彩色）は赤みの白（B_6），明るい赤みの灰（B_5），赤みの灰 1（B_4），赤みの灰 2（B_3），暗い赤みの灰（B_2），赤みの黒（B_1）である．もし彩度 s が 0 であるなら，三角形メンバーシップ関数（A_{01}～A_{06}），つまり円錐形メンバーシップ関数（A_1～A_6）の一部分の三角形が無彩色：白（B_{06}），明るい灰（B_{05}），灰 1（B_{04}），灰 2（B_{03}），暗い灰，黒（B_{01}）に対応する．

4. まとめ

既知の色相で明度と彩度の関係から系統色名（色のようすを示す，組み立てた色名による適当な表現）に必要な修飾語を見つけるシステムを考えた．システムの特徴は *i)*明度-彩度平面上においてファジィ集合を各修飾語に応じた同一円錐形のメンバーシップ関数群で表し，有彩色と同じように無彩色も取り扱うことができる．*ii)*修飾語のメンバーシップ関数を明度と彩度のファジィ関係と考えるとメンバーシ

ップ関数の射影の関係から修飾語の度合を簡単に得ることができる.

また, whiteness と blackness を明度(lightness)に, chromaticness を彩度 (saturation) と考えることによって, このシステムは NCS に対しても使用可能であることが分かった.

参考文献

1) 日本工業標準調査会編(1985): 日本工業規格 物体色の色名. 日本規格協会
2) 日本工業標準調査会編(1993): 日本工業規格 色の表示方法 -三属性による表示-. 日本規格協会
3) 鈴木, 高橋, 菅野(1997): ﾌｧｼﾞｨ・ｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑII. 玉川大学工学部紀要 第32号 pp. 97-104
4) Sivik L.(1997): Color systems for cognitive research. In Color categories in thought and language, C. L. Hardin and Luisa Maffi, Ed., Cambridge University Press, New York, pp.163-193
5) 菅野(1999):色名による色の表示方法のﾌｧｼﾞｨ理論的ｱﾌﾟﾛｰﾁ. 第 15 回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ 講演論文集, pp. 757-760
6) Sugano, N.(1999): A fuzzy set theoretical approach for color specification using color names, Proc. of 1999 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE-SMC'99), vol.VI, pp.230-235
7) Sugano, N. (2000): Color-naming system using fuzzy set theoretical method. Proc. of the Fourth Asian Fuzzy Systems Symposium (AFSS-2000), vol.1, pp.42-47
8) 菅野(2000): ﾌｧｼﾞｨ理論的手法を用いたｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑ. 第16回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ 講演論文集, pp. 421-424
9) Sugano, N.(2001): Fuzzy color-naming system using conical membership function of tone modifier, Biomedical Soft Computing and Human Sciences, vol. 7, No. 1, pp. 47-52
10) Sugano, N.(2001): Color-naming system using fuzzy set theoretical approach. Proc. of the 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE2001), pp. 13-16
11) 菅野(2002): ﾌｧｼﾞｨｶﾗｰﾈｰﾐﾝｸﾞｼｽﾃﾑの評価. 第18回ﾌｧｼﾞｨｼｽﾃﾑｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ 講演論文集, pp. 501-504
12) Sugano, N.(2002): Evaluation and improvement of fuzzy color-naming system using neighboring JIS modifiers, Biomedical Soft Computing and Human Sciences, vol. 8, No. 1, pp. 21-27

問合せ先
〒194-8610 東京都町田市玉川学園 6-1-1 玉川大学工学部
電子工学科 感性メディア研究室 菅野 直敏
Tel:042-739-8402 ; E-mail:sugano@eng. tamagawa. ac. jp

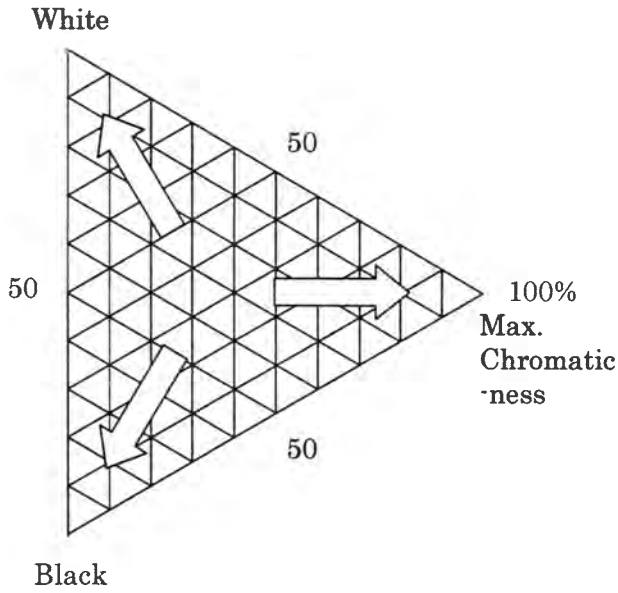


Fig.1. NCS color triangle

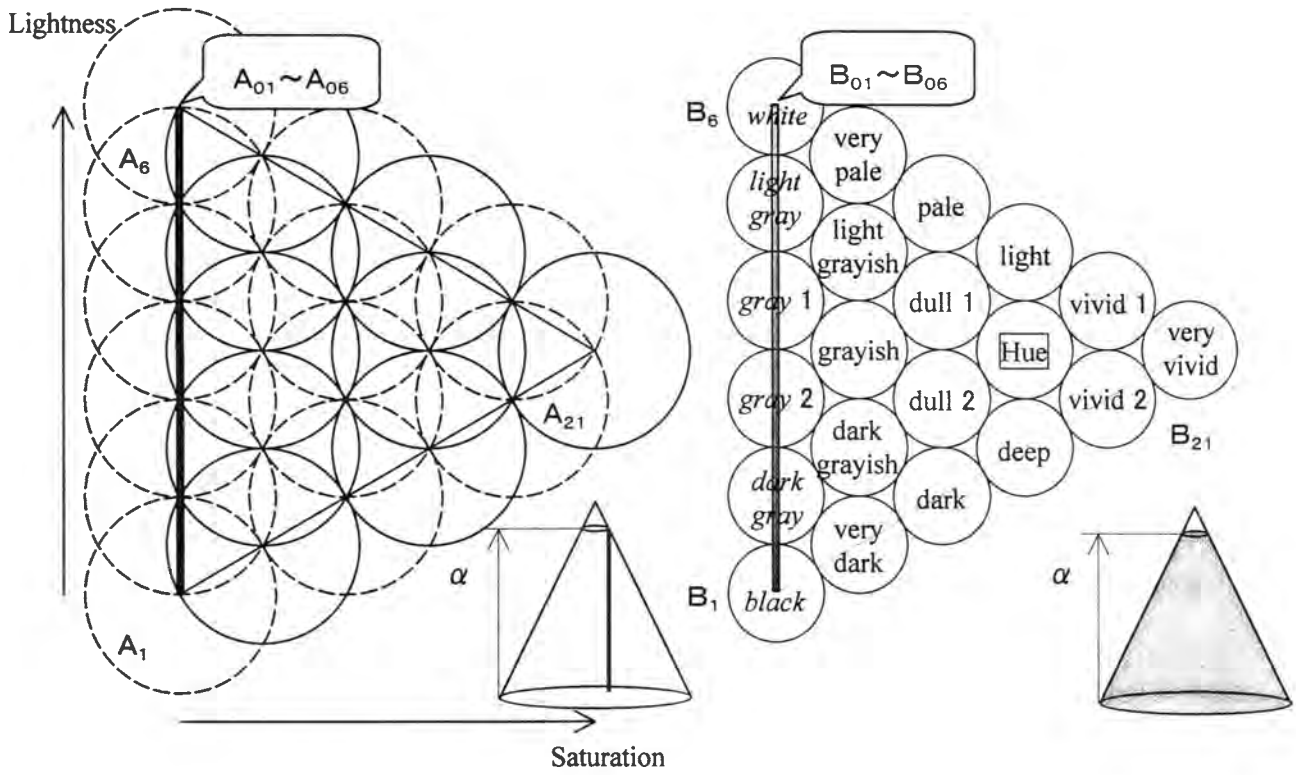


Fig.2. Fuzzy sets on the lightness-saturation plane and fuzzy sets of color names (JIS-like modifiers)

古文書における仮名文字認識に関する検討

A Study on Recognition Processing of Character in Historical Documents

○ 三好哲也，島田大助，三輪多恵子，舟久保登（豊橋創造大学）
Tetsuya MIYOSHI, Daisuke SHIMADA, Taeko MIWA, Noboru FUNAKUBO (Toyohashi Sozo College)

Abstract: This paper describes a comparison results of character recognition for historical documents using some classifying method. It was demonstrated by the experimental results that the recognition performance using a neural network with a hidden layer was better than using the other classifying method.

Keywords: Character recognition, Historical document,

1 はじめに

古文書や漢書などの古典籍がデジタルアーカイブされるとともに，文字データとしてデータベース化されている．データベース化するための古典籍の翻刻（活字データにすること）には，多大な費用と労力を必要とするため，コンピュータを援用した翻刻支援システムに関する研究がすすめられている [1, 2].

古典籍に含まれる文字に対する文字認識のアプローチとして，(1) 文字の領域の切り出しと1文字単位の文字認識，(2) 対象領域全体から直接文字パターンの探索の2段階からなる分析が考えられる．これらは必ずしも独立したステップではなく，相補的に行うことによって精度の高い文字認識が可能となると考えられる [3]．文字認識の結果を古典籍画像からの文字の抽出に反映させるためには，正確に抽出された各文字の認識がどの程度精度よく行えるかを確認しておく必要がある．

本研究では，版木本に含まれる文字の認識精度について分析する．そのために，文字認識手法として単純類似度法を用いたパターン認識法やニューラルネットワークを用いた認識手法を用いて，その認識率の比較を行うとともに，文字種別による認識結果の差異を分析する．

2 分析対象

本研究では，近世の平仮名からなる版木本を分析対象の古典籍とした．具体的には図1に示すような「女五経」という近世の古典籍を用いた．女五経の原典は東京大学附属図書館・情報基盤センターによりデジタルアーカイブされて，霞亭文庫 (http://133.11.199.8/cgi-bin/KateiIndex) として公開されている．その資料よりjpegファイルとしてダウンロードした．

古典籍の画像から文字データを自動抽出することを目標としているので，1文字単位もしくは語句単位の抽出が機械的に行えなければならないが，ここでは人間によって抽出した文字を対象に，文字認識の評価を行う．

図1 文字認識対象として古典籍

表1 認識対象文字と文字数

文字	数	文字	数	文字	数
あ	17	か	39	こ	16
い	43	き	27	ゝ	19
う	31	く	34		
お	18	け	26		

図1に示したような版木本の4頁に含まれる「あ」「い」「う」「お」「か」「き」「く」「け」「こ」「ゝ」の10種の文字を合計270文字抽出し，それらの文字認識を行う．10種の文字の文字数を表1に示す．

3 文字認識実験

3.1 特徴量

文字認識を行う場合に検討すべき主な事項として，(1) 文字の特徴量の決定，(2) パターンマッチングの

方法の2点が考えられる．本研究では，処理過程の単純さから文字の黒色部分を表すドットを特徴ベクトルとして用いる．そして，(a) 各文字の平均的なドット配列を参照パターンとする方法，(b) 複数の文字パターンを参照パターンとする方法の2種類の特徴量により文字認識を行う．

切り出された1文字を30 × 20の画素で表し，上側および左側に空白ができないようにドットを平行移動して特徴ベクトルとする．平均ドット配列を参照パターンとする場合には，文字種ごとに特徴量ベクトルの加算平均を算出し，その加算平均がしきい値0.5以上の場合に，参照パターンベクトルのビットを1とした．

3.2 文字認識方法

文字認識のためのパターンマッチング法には，種々の方法が考えられるが，本研究では，(a) 特徴ベクトルの一致性に基づく方法，(b) ニューラルネットワークを用いた方法を用いる．それぞれの場合における平均認識率および個々の文字に対する認識率を比較する．

参照ベクトルとの一致性の指標として一致率 $r = C_1/C_2$ を定義する．C_1 は認識対象文字と比較文字の同画素が黒ドットとなっている一致ドット数を表し，C_2 は，比較対象の文字の黒ドット数を表している．すなわち，一致率は，参照パターンのドット数に判別対象文字のドット数がどの程度一致しているかを示す指標となっている．

ニューラルネットワークを用いる認識において，ネットワークへの入力は600次元の入力ベクトルとし，教師信号に各文字種に対応したビットが1となっている10次元からなるベクトルを用いた．ニューラルネットワークの重みパラメータを決定するために，後半の文字データを用い，前半のデータで認識率の評価を行う．

以上を組み合わせて（1）平均ドット配列を参照パターンとし一致性に基づき文字識別する方法（2）表出する文字を参照パターンとし一致性に基づき識別する方法（3）表出する文字を参照パターンとしニューラルネットワークで識別する方法による文字認識実験を行う．

4 文字認識の結果

前節で述べた文字認識方法による認識結果を表2に示す．表2の結果において（1）は平均ドット配列を参照パターンとし一致性に基づき文字識別する方法による認識結果，（2）は表出する文字を参照パターンとし一致性に基づき識別する方法による認識結果，（3）表出する文字を参照パターンとしニューラルネットワークで識別する方法による認識結果を示している．

表2 各文字に対する認識結果

判別対象文字	(1)	(2)	(3)
あ	0.11	0.37	0.87
い	0.22	0.63	0.74
う	0.31	0.63	0.90
お	0.12	0.20	0.40
か	0.83	0.87	0.90
き	0.40	0.58	0.66
く	0.47	0.62	0.81
け	0.30	0.53	1.00
こ	0.00	0.42	0.71
ゝ	0.54	0.44	0.55
全体	0.37	0.58	0.77

各文字の平均ドットパターンを参照パターンにした場合の認識率が最も悪く，ニューラルネットワークを用いた場合が最も良い結果となった．

5 おわりに

本研究では，版木本に含まれる文字に対して，特徴ベクトルの類似性に基づく文字認識とニューラルネットワークを用いた文字認識を行い，10種の文字に対する文字認識結果を比較した．ニューラルネットワークの識別精度が最も良く77%を示したが，使用に耐えるレベルとは言えないので，特徴量の検討や判別手法の開発により，今後，識別能力の向上をはかる予定である．

参考文献

[1] 山田奨治，柴山守：古文書を対象とした文字認識の研究，情報処理，Vol.43, No.9, pp.950–955(2002).

[2] 山田奨治，柴山守：n-gramによる古文書証文類翻刻支援の検討，人文科学とコンピュータシンポジウム論文集，Vol.2000, No.17,185-192 (2000).

[3] 梅田三千雄，橋本智広：認識処理を援用した文字切り出しによる古文書のキャラクタスポッティング，電気学会論文誌c，Vol.122-C, No.11, pp.1876–1884(2002).

［問い合わせ先］
〒440-8511 豊橋市牛川町松下20-1
豊橋創造大学 経営情報学部
メディア・ネットワーク学科
三好 哲也
TEL:0532-54-2111 ext.623
E-mail: miyoshi@sozo.ac.jp

MathMLに対応したオンライン手書き数式認識システム

On-line Handwriting Recognition System for Mathematical Expression corresponding to MathML

小林 一馬　西守 克己　西村 亮　石原 永伯
Kazuma Kobayashi　Katumi Nishimori　Ryo Nishimura　Naganori Ishihara
鳥取大学 工学部 電気電子工学科
Electrical and Electronic Engineering, Tottori University

Abstract - A new mathematical expression recognition system which can input mathematical characters and equations using on-line writing pen and carry out automatic format generation of the XML file constructed by MathML has been developed. By this research, in order to recognize the mathematical expression with more complicated structure, this system was found to be useful for laboratory use.

1 はじめに

通常文章の文字認識は多くの研究がなされ、実用化されているが、数式認識が可能なシステムはほとんどないのが現状である。

そこで、我々の研究室では、ペンを用いて数式入力ができ、Webで数式を表示可能なMathML文章を自動生成する数式認識システムを開発してきた[1)-3)]。本報告では、この数式認識システムにおいて、より複雑な構造を持った数式を認識可能とすることを目標とし、数式構造認識システムの強化(開発・改良)を行った。

2 システムの概要

本システムは、マウスやペンを用いて自然に入力できるインターフェースを採用している。そして、文字認識後にTeXやMathMLの文章を出力する。また、認識結果を、Web ブラウザ(Mozilla)を用いてプレビューすることが可能である。本システムの実行画面を図1に示し、本システムの処理の流れを図2に示す。

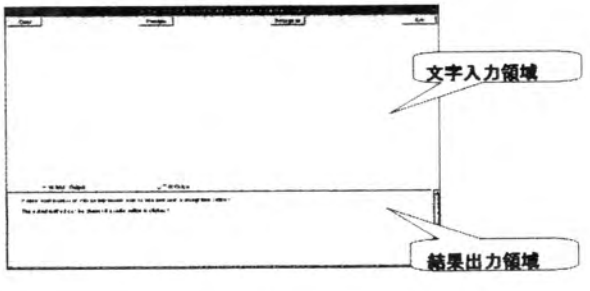


図1 システムの実行画面

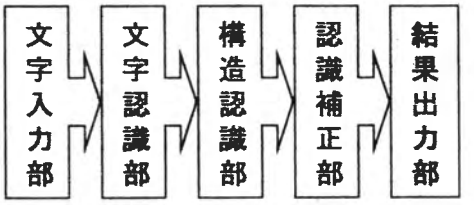


図2 システムの処理の流れ

2.1 文字入力部

2.1.1 文字の入力

文字の入力は、ウィンドウ上部にある文字入力領域にマウス、ペンを用いて行う。マウスは左クリックのままドラッグすることで、ペンは紙に書くのと同様の方法で文字を入力することができる。

2.1.2 文字の切り出し

入力したストロークと直前に入力されたストロークとで接触判定・近接判定を行い、同じ文字の一画か異なる文字の一画かを判定し、文字の切り出しを行う。

2.2 文字認識部

文字認識処理は、文字入力後に認識ボタンを押すことで開始される。文字切り出し部で切り出された文字を1文字ずつ認識システムに送り、文字の認識を行う。システム内部では以下の処理を行っている。

(1) 前処理

パターンの大きさを64×64ドットに正規化し、文字の最小(x,y)座標、文字の縦幅、文字の横幅を求める。

(2) 特徴抽出

文字の方向コード、方向コード間の方向転換角度、始点の座標、終点の座標、画数などの特徴を求める。

(3) ファジイによる認識

まず、文字の画数によって辞書をふるいにかける。次に、求めたデータと辞書のデータを比較し、ファジイ関係を用いて認識を行う。辞書とそれぞれのファジイ値を合成し、値が最も高い文字種を認識結果とする。

(4) 認識結果出力

第1位から第3位までの結果を出力する。下位の認識結果は、文字認識補正を行うときに使用する。

このシステムの単体文字の認識率は、英小文字、英大文字、数字、数式記号(四則演算記号・等号・括弧記号など)を認識対象文字としたとき、平均 98.13%であり、1 文字の認識にかかる時間は、TurboLinux4.2 (CPU:Celeron466MHz)の PC の場合、約 16ms であった。そして、この認識システムを用いて認識した文字を用い、数式構造認識部で数式構造を認識する。

2.3 数式構造認識部

文字認識部で得られた文字認識候補と最小(x,y)座標、縦幅と横幅を用いて数式構造認識を行う。

2.3.1 前処理

最初に、前処理として以下の処理を行う。

・最小 x 座標順に文字を並べ替え、番号を付ける

・特殊記号に修正係数を加える

2.3.2 補正数式構造認識

マイナス記号が連続して存在することや、プラス記号とマイナス記号が連続して存在することは数式の意味を考えるとあり得ない構造であるため、それぞれイコール記号とプラスマイナス記号に変換を行う。

2.3.3 数式構造認識

"分数構造"、"シグマ構造"、"根号構造"の認識を行う。従来システムでは、これらの数式構造が複合した場合や、これらの数式構造が添え字になる場合に正確に数式の構造を認識できない不具合があった。そこで、本報告では数式構造認識システムを一から見直し、改良したため、これらの問題は起こらなかった。また、多重根を認識するためのシステム改良も行った。

2.3.4 添え字判定

本報告では添え字の基底文字になる可能性のある文字を「親文字」、添え字になる可能性のある文字を「子文字」と呼ぶことにする。

添え字判定部では、判定する文字と、判定する文字よりも若い番号の文字との縦の位置関係を調査し、上付き文字、下付き文字、同一ライン文字を判定する。添え字の判定範囲には、添え字判断のアンケート(有効回答数63)を採り、その結果を考慮して決定した判定範囲を使用している。その判定範囲を図3に示す。

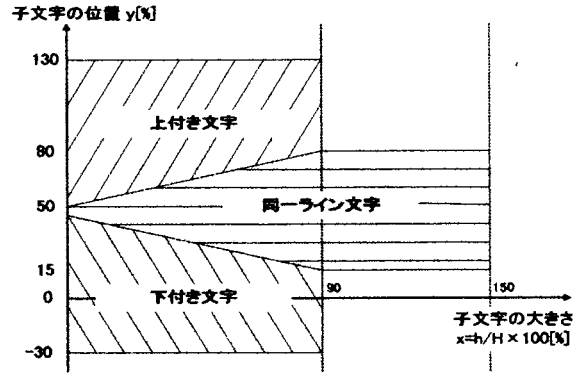


図3 添え字判定範囲

ただし、添え字判定のベースラインがずれる文字(b,d,h,k,f,l,g,j,p,q,y)は、添え字判定範囲の上方・下方修正を行う。そして、修正後の判定範囲を用いて添え字の判定を行う。

具体的には図 4 の例のように、「f,l」の場合は上端を10%低い位置に再設定し、「b,d,h,k」の場合は上端を20%低い位置に再設定する。「g,j,p,q,y」の場合は下端を 20%高い位置に再設定する。このように再設定した後の値を用いて、図3のグラフの添え字判定範囲から添え字の判定を行う。ただし、「f,l」と「b,d,h,k」の上付き文字判定上限は元の上端を基準にした上限とし、「g,j,p,q,y」の下付き文字判定下限は元の下端を基準にした下限とする。また、これらの文字が子文字となったときの補正として、添え字判定に用いる中心座標は再設定後の値を用いて添え字の判定を行う。

また、従来システムでは、"分数構造"、"シグマ構造"、"根号構造"等の特殊な構造が添え字になるような場合

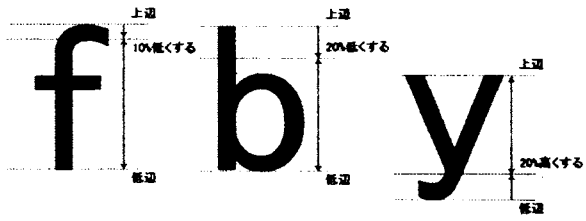


図 4 添え字判定範囲の補正

に認識が出来ない問題があった。しかし、今回改良を加えたシステムでは、これらの構造が数式内部に存在した場合には、これらの構造は1つの文字として扱うような形で添え字の認識を行う。そのため、これらの特殊な構造が添え字になっても認識が可能である。

2.3.5 添え字判定の補正

従来システムでは「bc^2」や「b^2c^2」といった数式は、それぞれ「b^2c」や「$b^{22}c$」と誤認してしまうことが頻繁に起こった。そこで、今回のシステムでは添え字と判定された場合、その時の判定に使用された親文字の最終同一ライン文字を調査し、その文字に添え字を付けるような補正を行うようにシステムを改良した。

例えば、「bc^2」を「b^2c」と誤認してしまうような場合では、判定に使用した親文字が同一ライン文字の最終文字かどうかの調査を行う。この調査を行うことで、上付き文字「2」を「b」の上付き文字ではなく、「c」の上付き文字として補正することが可能となる。同様に、「b^2c^2」を「$b^{22}c$」と認識してしまう場合でも、最終同一ライン文字を調査することによって、後ろの上付き文字「2」を「b」の上付き文字ではなく、「c」の上付き文字として補正することが可能となる。

2.4 文字認識補正部

2.4.1 括弧記号の補正

数式が正しく入力された場合、括弧記号は以下のような数学的意味を満たしているはずである。

・括弧閉じ記号が数式の先頭文字になることはない
・括弧閉じ記号の直前に演算記号は存在しない
・括弧開き記号が数式の最終文字になることはない
・括弧開き記号に添え字が付くことはない
・括弧記号は必ず対になって存在する(孤立しない)

これらの条件を括弧記号が満たしていない場合、認識結果を下位の認識結果に変換する。ただし、最下位の認識結果まで変換候補を広げても、条件を満たすことができない場合は、認識結果は棄却とする。

2.4.2 大文字・小文字の補正

英文字には、大文字と小文字でその形状が変化しない文字がある。これらの文字を単体で大文字か小文字かを判定するのは困難である。

そこで、形状変化しない英大文字や英小文字が数式内に存在した場合、その文字と同一のライン上の形状が変化する英大文字・英小文字または数字を検索し、それらの文字の大きさを比較することで、より確率が高いと思われる文字に補正する。

2.5 結果出力部

認識結果をウィンドウ下部の認識結果出力領域に出力する。認識結果はTeXとMathMLで出力可能であり、画面への認識結果出力と同時に、XML ファイルをMathML の書式で出力するので、プレビューや他のアプリケーションで認識結果を容易に利用できる。

また、従来システムでのMathML出力は、数学的な意味を満たしていなかったが、今回のシステム改良により、数学的意味を満たした出力が可能になった。

3 認識実験

今回のシステム改良の有効性を調べるため、数式認識実験を行った。実験は被験者 11 名に対し図 5 の数式を入力してもらうことで行った。図 5 の①～③の数式は、今回改良した添え字の認識システムの有効性を調査するために用意した数式であり、図 5 の④～⑦の数式は、特殊な構造が複合するような数式に対する、今回改良した数式構造認識システムの有効性を調査するために用意した数式である。

① a^{a^a}　　④ $x^{\frac{1}{2}}$　　⑥ $\sqrt[3]{2}$

② $E = MC^2$

③ $a^2 + b^2 + c^2$　　⑤ $\sqrt{\frac{1}{2}}$　　⑦ $a \pm b$

図 5 認識実験に使用した数式

3.1 比較実験

今回改良した添え字認識システムの有効性を調査するために、従来システムと今回改良したシステムの比較実験を図5の①～③の数式を用いて行った。この実験の結果を表 1 に示す。ただし、文字認識システムには従来のシステムから変更を加えていないため、文字認識率については比較を行わない。

表 1 比較実験の結果(%)

	従来のシステム		今回のシステム	
	文字認識率	構造認識率	文字認識率	構造認識率
数式①	75.76	54.55	84.85	96.97
数式②	92.73	87.27	92.73	96.36
数式③	88.64	85.23	95.45	96.59

この実験での全体の文字認識率は 88.36%であり、構造認識率は従来システムが 75.68%、改良を加えたシステムが 96.64%であった。この実験は、従来システム、改良後のシステムの順番で実験を行った。そのため、改良後のシステムの方が、タブレットでの数式入力に書き手が慣れていたと思われる。これが認識率の違いの原因の一つだと思われるが、それを考慮しても、改良後のシステムは従来システムよりもかなり高い認識率を示しているため、改良後の添え字認識システムは、添え字を含む数式を認識する場合には、従来システムよりも有効であるといえる。

3.2 複雑な構造を持つ数式の認識実験

次に、従来システムでは認識不可能である多少構造が複雑な図 5 の④～⑦の数式を用いて認識実験を行った。実験の結果を表 2 に示す。

表 2 複雑な数式を用いた実験の結果(%)

	文字認識率	構造認識率
数式④	86.36	78.18
数式⑤	97.73	90.91
数式⑥	93.94	81.82
数式⑦	95.45	95.45

この実験での平均構造認識率は 86.59%であった。この実験では、単体の文字が認識できた場合は、数式構造をほとんどの場合で正確に認識できていたが、数式の構造を認識する前に、単体文字の認識で失敗する場合が多く見受けられた。特に数式④のように、構造が複雑な上に、文字を細かく書かなければならない数式において、文字切り出しが正確に行えていないために、隣接する文字同士が同一文字として認識されることにより起こる誤認が多く見受けられた。よって、より複雑な数式を認識するには、文字認識システム、特に文字切り出しシステムの見直しが必要だと思われる。

4 まとめ

本報告では、現在までに開発された数式認識システムにおいて、より複雑な構造の数式を認識可能とするために、単体文字の認識システムには手を加えずに、数式構造認識システムの強化(開発・改良)を行った。

その結果、今回改良を行ったシステムは、従来システムより添え字の認識率を高めることができ、従来システムでは認識が不可能であった複雑な数式を認識することが可能となった。しかし、特殊な構造が複合するような複雑な数式では、文字を細かく書かなければならないため、隣接する文字同士を同一文字として認識するため正確に数式を認識できない問題が見つかった。そのため、現在の文字切り出しシステムは、複雑な数式を認識するために不十分だということがわかる。

よって、今後の課題としては、文字認識システムの強化、特に文字切り出しシステムの改良が挙げられる。

参考文献

1) 松井, 西守, 西村, 石原:"ファジィ理論を用いたオンライン数式認識", 第 16 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.649～652, 2000.
2) 流郷, 西守, 西村, 石原:"オンライン自由手書き数式認識", 第 7 回ファジィ学会中国・四国支部大会講演論文集 A-1, 2001.
3) 流郷, 松井, 西守, 西村, 石原:"オンライン手書き入力による数式認識システム", 平成 12 年度電気・情報関連学会中国支部第 51 回連合大会講演論文集, pp.187, 2000.

[問い合わせ先]
〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4 丁目 101
鳥取大学工学部電気電子工学科
西守克己
TEL 0857-31-5688　　FAX 0857-31-0880
E-Mail nisimori@ele.tottori-u.ac.jp

表情認識におけるシンボル適応方法の検討

Consideration of Symbol Adaptation in Facial Expression

岩田　満　　田野　俊一
Mitsuru Iwata　　Shun'ichi Tano

電気通信大学大学院　情報システム学研究科
Graduate School of Information Systems, University of Electro-Communications

Abstract: In the previous recognition systems of facial expressions, symbols, e.g., movement in facial part, are determined beforehand. In this paper, we consider an automatic adaptation of symbols used by HMM based on the knowledge acquired by the handwriting character recognition system. This approach consists of symbol generation using the information on recognition results instead of statistical distribution of input data and combining results obtained from two or more HMMs.

1. はじめに

人間同士のFace to Faceコミュニケーションでは，言葉以外にも顔の表情や身振り，手振り，声色などのノンバーバル（非言語）情報を補助的あるいは相補的に使用している．コンピュータが人間と同程度にノンバーバル情報を理解し，また表現することができれば，これをインタフェースへ応用することにより人間とコンピュータとの共同作業におけるコミュニケーションはさらにスムーズになる．ノンバーバル情報の中で最も重要な情報は表情であり，表情認識に関する研究は数多く行われている[1, 2].

現在の音声，文字認識システムはほとんどが刺激・応答系のシステムであり，認識対象データを統計的処理するのみである．しかしながら，認識対象データをシンボル化し，統計的処理に記号的処理を組み合わせることにより，認識システムの性能は飛躍的に向上する．そのような試みの一つに，Hidden Markov Model（HMM）がある[3]．HMMは，認識対象時系列データをシンボル化し，これを入力データとして扱うことで，文脈のような高度な表現が可能となったものである．時系列パターン認識手法としてはDPマッチングもあるが，不特定者を対象とした場合に，HMMの方が優位であるといわれている．

従来研究におけるHMMのシンボル化の際には，その統計的性質のみに目が向けられており，認識を行う際にどのような特徴に注目するべきか，それが出力後の結果にどのように影響を及ぼすかについては考慮されていない．

そこで本研究では，オンライン手書き文字認識システム[4]で得られた知見をもとに，HMMの出力情報を利用して認識システムが扱うシンボルの自律的適応を図る．出力情報としては学習時のエラー情報を用い，それに従ったシンボルの適応化を図る手法の検討を行う．

2. 表情データ

今回認識対象とする表情は，表情認識の研究で広く用いられているEkmanの感情分類である喜び，悲しみ，驚き，恐れ，怒り，嫌悪の6種類である．

近年の半導体技術の進歩により，距離画像をビデオレート（30フレーム/秒）で得ることが可能となった．これにより，顔の表情を連続的に三次元画像として得ることができる．従来の表情認識では，顔の三次元形状が二次元に射影された画像，いわば情報の欠落した画像を用いており，その認識精度は低いと考えられる．

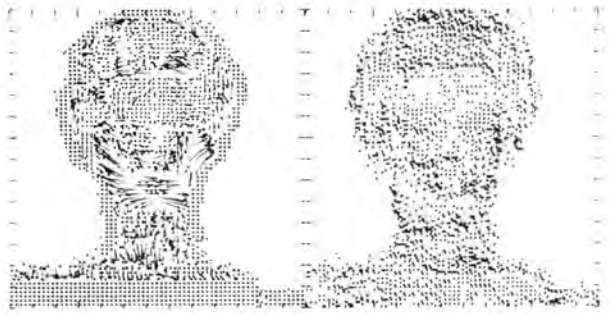
解析対象である三次元表情データは，ステレオカメラで被験者の表情変化を撮影して収集する．図1にステレオカメラで撮影したセンターRGB画像と，被写体の距離が疑似カラーで表現された距離画像の例を示す．

(a)　　(b)

図1: センターRGB画像(a)と距離画像(b)

ブロックマッチング法[5]により動画像からオプティカルフローを計算し，顔の各部位の移動方向と移動量を抽出する．従来のオプティカルフローは輝度情報のみを利用して計算されているが，本研究では輝度情報の他にカメラからの距離情報も用い，三次元形状を考慮したオプティカルフローを計算して

いる[6]．強い喜びの表情について，計算された二次元画像上のフローベクトルの一例を図2(a)に示す．また，距離方向の移動ベクトルを距離画像から算出した結果を図2(b)に示す．図の左下方向の矢印は手前への移動を表し，右上方向の矢印は奥への移動を表す．



(a) (b)

図2: 二次元方向のフローベクトル(a)と距離方向のフローベクトル(b)

3. HMMを用いた表情認識

3.1. 入力データ

表情認識で利用するデータは，前節で説明したフローベクトルから算出された，顔の各点 P_i における三次元座標 $v_i=(x_i,y_i,z_i)$ の時系列情報 $(v_{i1},v_{i2},...,v_{iT})$ である．ここで，t はフレーム番号である．

3.2. ベクトル量子化

データが存在する特徴量ベクトル空間を，カテゴリーを代表するテンプレートに分割する量子化方法をベクトル量子化（Vector Quantization: VQ）と呼ぶ．この手法を用いて認識対象の特徴量ベクトル(特徴点の座標ベクトルなど）をHMMに入力するシンボルに変換する．

特徴量ベクトル x はあらかじめ求められているコードベクトル集合 $\{y_1,y_2,...,y_N\}$（コードブック）を参照し，一つのシンボル $\hat{n}$ に置換する．

$$\hat{n}=\arg\min_n d(x,y_n) \qquad (1)$$

ここで，d はユークリッド距離である．

また，多数の訓練サンプルからコードブックを作成するための手法として，k-means法を用いる．

3.3. HMM

本研究では，一つの表情を一つのHMMで表現するので，HMMは6種類となる．図3にHMMのモデル例を示す．認識によく用いられるHMMは，初期状態，最終状態を設定したleft-to-rightモデルである．

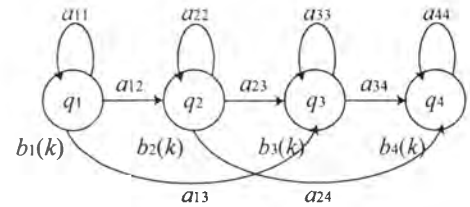


図3: left-to-right HMMの例

ここで，a_{ij} は，状態 q_i から状態 q_j へ遷移する確率を表し，$b_j(k)$ は，観測シンボル v_j が状態 q_j から出力される確率を表す．

HMMでは，状態遷移確率に従って状態遷移が起こり，その状態からある確率で観測シンボルが出力される．

3.4. HMMの学習

各HMMパラメータの推定は，表情の時系列パターンの数多くのサンプルを用いた学習によって行われる．表情 w に対応するモデル M のパラメータセット $\{a_{ij},b_j(k)\}$ は，表情 w に対応する特徴量からバウム・ウェルチアルゴリズム（Baum-Welch algorithm）[3]によって推定される．

3.5. 認識

長さ L の出力シンボルの観測系列 o を，

$$o=(o_1,o_2,...,o_T) \qquad (2)$$

とする．このとき，各HMM M が観測系列 o を出力する確率 $P(o|M)$ を求め，最大確率を与えるモデルに対応する表情を認識結果とする．確率 $P(o|M)$ は，フォワードアルゴリズム（forward algorithm）[3]によって算出される．

3.6. 時系列の生成

学習されたHMMを用いて，典型的な時系列を生成することができる．従って，表情認識システムにHMMを用いることで，同じモデルで表情認識と生成が行える．

4. シンボルの自律的適応

4.1. シンボルの高次元化

表情認識で利用されるシンボルは，顔の部位の位置座標，速度ベクトル，加速度ベクトルなどの特徴量がVQによりシンボルに変換されたものである．従来研究では，これらのシンボルはEkmanによって提唱されたFACS（Facial Action Coding System）において定義されている44種類のAU（Action Unit）を参考にして，あらかじめ恣意的に選択されている

[7]. 本研究では認識システムの性能の向上のために性質の異なるシンボルを体系的に取り扱い，認識システムの出力情報をもとにシンボルが自律的に適応していくアプローチを検討する．

オンライン手書き文字認識システム[4]では，シンボルに表4に示す時間に関する次元の概念を取り入れている．このような概念を表情認識システムにも取り入れることで，「（ある部位が）ゆっくり上がる」といったシンボルを作成し，「右に大きく動く」などの性質の異なったシンボルと同一に扱うことが可能となる．

表1: シンボルと扱う時間

扱う時間	シンボル
t	座標
t, $t+1$	速度ベクトル，方向
t, $t+1$, $t+2$	加速度ベクトル，方向の角度差

表情変化時には，目や眉，口などの動きが同時に生じるため，本研究では変化に注目する位置（範囲）についても考慮する．図4にその概略を示す．

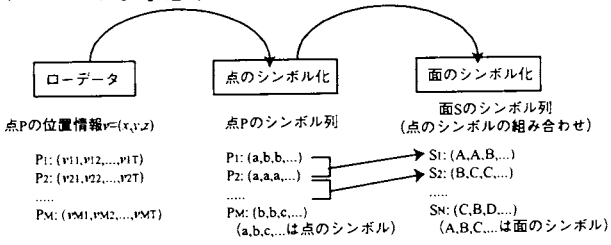


図4: 注目する位置（範囲）

ローデータは，顔の各部位 P_i における三次元座標値の時系列情報である．まず点（0次元）のシンボル化を考える．これは，「例えば右目の目尻の点がゆっくり上がる」などの表情認識に有効なシンボル a, b, c, ...をローデータから発見することである．次に面（2次元）のシンボル化を考える．面 S はいくつかの点 P の組み合わせで構成されるが，本研究では点の組み合わせについては固定せずに，システムが認識結果に応じて適応的に組み合わせを変更するアプローチをとる．これにより，右目を含む周辺の点が組み合わさって「右目」という面や，右目と左目の周辺の点が組み合わさって「目」という面，また「顔の上半分」や「顔全体」などの面におけるシンボルA, B, C, ...が生成されうることが予想される．

4.2. 統合手法

異なる次元のシンボルから得られた結果を，認識時に統合する手法について検討する．

長さ T の1次元の観測シンボル系列を $o^{(1)}=(o_1^{(1)},o_2^{(1)},...,o_T^{(1)})$，2次元の観測シンボル系列を $o^{(2)}=(o_1^{(2)},o_2^{(2)},...,o_T^{(2)})$，3次元の観測シンボル系列を $o^{(3)}=(o_1^{(3)},o_2^{(3)},...,o_T^{(3)})$，...とする．あるカテゴリーの各次元のモデル $M^{(1)}$，$M^{(2)}$，$M^{(3)}$ におけるそれぞれの尤度を，フォワードアルゴリズムと同様に最適パスを算出するビタービアルゴリズム（Viterbi algorithm）によって導き出す．

$$p(o^{(1)} \mid M^{(1)}) = \prod_{t=1}^{T} p(o_t^{(1)} \mid M^{(1)}) \quad (3)$$

$$p(o^{(2)} \mid M^{(2)}) = \prod_{t=1}^{T-1} p(o_t^{(2)} \mid M^{(2)}) \quad (4)$$

$$p(o^{(3)} \mid M^{(3)}) = \prod_{t=1}^{T-2} p(o_t^{(3)} \mid M^{(3)}) \quad (5)$$

これらの尤度の積を，そのカテゴリーの尤度とする．すなわち，最大の次元を D とした場合は，

$$p(o \mid M) = \prod_{d=1}^{D} p(o^{(d)} \mid M^{(d)}) \quad (6)$$

となる．この手法は最も単純な統合方法である．(6)式の積演算の代わりに，最大値（max演算）や最小値（min演算）を用いるなどの派生も考えられる．

4.3. 結果を考慮したクラスタリング

従来研究においてはベクトル量子化におけるクラスタリングは，統計的分布を反映するように行われている．本研究ではさらに，特徴量をシンボルに変換するベクトル量子化において，認識結果をもとにそのエラーが少なくなるように特徴量ベクトル空間の分割領域を変更する手法を検討する．ニューラルネットワークでは，このようなクラスタリング手法がバックプロパゲーション学習アルゴリズムに取り込まれており，その有効性が実証されている．

文献[4]ではエラーベース法を提案している．エラーベース法とは，少数のシンボルから目的のシンボル数 K まで，エラーの量に従って分割するシンボルを選択し，量子化する手法である．まず，2つのシンボルを k-means法に従って作成する．そして，全てのシンボルを分割することで得られる，エラーの量が最も多く減少したもの，すなわち，そのシンボルが誤認識の原因となっていると分かったものを分割する．

エラーベース法のアルゴリズムは以下の通りである．ただし，シンボル数を K 個とし，シンボルを $v=\{v_1,v_2,...,v_K\}$ とする．

Step 1: $k=1$ とする．

Step 2: シンボル v_k を分割し，シンボル v_{k1}，v_{k2} を作る．

Step 3: シンボル v_{k1} と v_{k2}，シンボル v_k 以外の残り

の全てのシンボルνを用いてHMMにて認識した結果のエラー数E_kを求める.

Step 4: $k=k+1$とし，$k>K$であれば次に進む．そうでなければStep 2に戻る.

Step 5: $\hat{k}=\arg\min_{k=1}^{K} E_k$を求め，$\hat{k}$を分割する.

表情認識においてもこの手法が適用可能であるかどうかの調査および検討を行う.

このように認識結果を利用してクラスタリングを変更することによって，表情表出時の個人差に対しても認識システムが適応的に対応できると考えられる.

5. まとめ

本研究は，手書き文字認識システムで得られた知見をもとにして，表情認識におけるHMMで扱うシンボルの自律的適応化，および複数の特徴量を有効に活用する統合手法の検討を行った．本研究の特徴は，システムにあらかじめFACSのような知識を与えることなく，多数の例示データと学習時のエラー情報から自律的に認識に有効なシンボル（FACSにおけるAUのようなもの）を獲得し，認識システムの性能を向上させることである.

今後はシンボルの自律的適応手法についてさらなる調査・検討を行い，表情認識システムを構築し，シンボルの自律的適応の有効性を確認する予定である.

参考文献

[1] G. Donato, M. S. Bartlett, J. C. Hager, P. Ekman, and T. J. Sejnowski: Classifying Facial Actions, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 21, No. 10, pp. 974-989, 1999.

[2] 太田寛志: 顔面構造に基づいた顔動作解析と表情認識に関する研究，静岡大学大学院理工学研究科博士論文, 1998.

[3] 鹿野清宏，伊藤克亘，河原達也，武田一哉，山本幹雄: 音声認識システム，オーム社, 2001.

[4] 横山和重，田野俊一，岩田満，山内ゆかり: HMM オンライン手書き文字認識における認識情報を利用したシンボルの自律的適応方式，第30 回知能システムシンポジウム，pp. 179-184, 2003.

[5] 安居院猛，長尾智晴共著: 画像の処理と認識，昭晃堂，東京, 1992.

[6] Mitsuru Iwata and Shun'ichi Tano: Analysis of Three-Dimensional Facial Movements in Facial Expression, Joint 1st International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 3rd International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2002), 25B2-6, 2002.

[7] Takehiro Otsuka and Jun Ohya: Spotting segments displaying facial expression from image sequences using HMM, Proceedings of Third IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, pp. 442-447, 1998.

問い合わせ先

〒182-8585　東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
電気通信大学大学院情報システム学研究科
岩田　満
Tel: 0424-43-5604, Fax: 0424-43-5681
E-mail: miwata@is.uec.ac.jp

ヒューマンビークルにおける 事例ベースによる意図認識機構

Driver Intention Recognition Using Case-base Learning for Human Vehicle System

山口　亨*,**
Toru Yamaguchi

武田康宏*
Yasuhiro Takeda

*東京都立科学技術大学 大学院工学研究科　システム基礎工学専攻
Systems Engineering Science, Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan Institute of Technology
**科学技術振興事業団さきがけ研究 21
PRESTO, Japan Science and Technology Corporation(JST)

Abstract : Most traffic accidents are caused by drivers' carelessness and lack of information on the surrounding objects. In this paper we proposed a model of human intention recognition through case-base learning. The system can help us recognize object's intention (e.g. turn, left, right or straight) by using detected data about human's motion, speed of the car and the distance between the car and the intersection. Furthermore, we included an example using case-base learning in this paper to improve the precision of recognition.

1. はじめに

ITS（Intelligent Transport System: 高度道路交通システム）は、最先端の情報通信技術を活用することにより、人と道路と車両を一体のシステムとして構築し、安全性の向上、輸送効率の向上、快適性の向上が期待されている。しかし、多くの情報がシステム内にあるにもかかわらず、その情報を有効に運転者に与えているかどうかの検討は不十分である。情報過多は逆に運転者の混乱を招いてしまう。運転者の意図を利用することで情報過多による混乱を防ぎ、運転者の負担を減らすことが出来る。本稿では運転者の動作を検出し、事例ノードを配置した意図認識機構による運転者の意図推論手法を提案する。

2. 意図認識機構

本稿ではあいまいな概念である運転意図に関する知識構築の手段として知識表現を利用したモデルを図２に示す。運転意図の中から直進、左折、右折の３基本運転意図の認識を行う意図認識モデルについて説明する。これは次の性質を持つ。

1) 現実世界の数値データと人間が思考する記号を融合処理できる。
2) 物理量から高次概念へのボトムアップ処理と高次概念から物理量へのトップダウン処理を融合できる。

以下に、運転動作から左折、直進、右折の３基本動作意図の認識を行う意図認識モデルについて説明する。モデルはファジィ連想メモリシステムに実装され，連想推論が実行される。モデルは３段構成である。最下段は入力層で、各動作の特徴量をファジィラベルのメンバシップ値で表現する。中段には、学習過程で使用する事例ノードを配置する。N 個の事例に対し、３動作を学習するので、合計３N パターンを学習する。各動作の特徴が入力された時、中段では、最も近い特徴をもつひとのノードが最も強く活性化する。活性値分布により、各動作毎にどの事例に近いかわかる。しかし、中段に現れる活性値だけで、運転意図を特定することはできない。この問題は、コンテキストの導入により解決される。最上段は運転意図を示すレイヤであり、左折、直進、右折に対応する３つのノードからなり、中段すべてのノードと結合している。

このモデルは事例から運転意図をファジィ集合として記憶後、入力を与えると下段と中段との間、及び中段と上段との間で反響動作を繰り返し、活性値分布がコンテキストに矛盾しない状態に収束することで認識結果を得る。ここでコンテキストとは各運転意図の事例から得られた標準的パターンで、パターンに似た各動作の特徴の組み合わせは推進されるのに対し、パターンに合わない特徴の組み合わせは抑制される。認識結果は上段の３動作に相当するノードの活性値により表される。

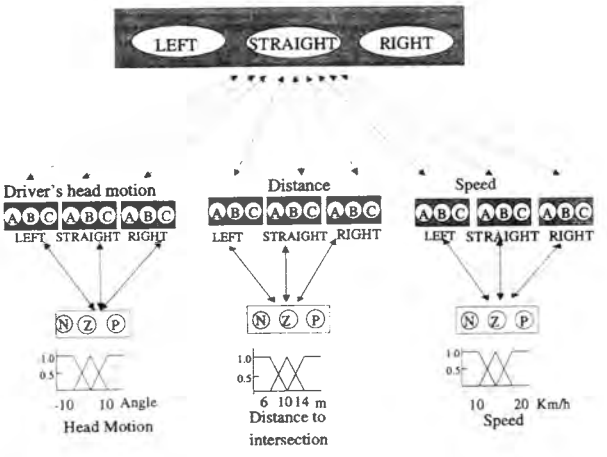


図２ 意図認識モデル

3. 認識実験

3.1 実験システム

ある運転行動を起こそうとする時一般に運転者はある程度決まった動作をすることが確認されている。本研究ではこの動作に着目し人間の顔の方向情報、交差点までの距離、車両のスピードを図4に示す実験システムで検出し、検出された動作から直進、右折、左折の3基本動作の意図を推論する。

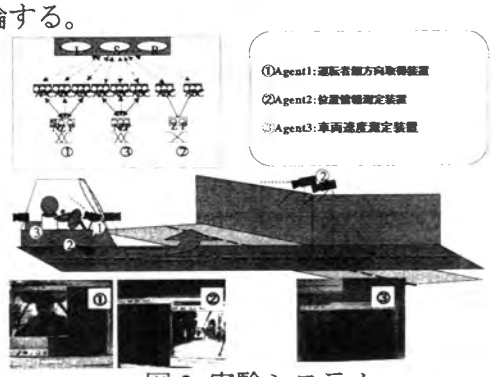


図3 実験システム

3.2 事例データ計測実験システム

図4に示すのは今回の研究でご協力頂いた矢崎総業株式会社での実車実験システムである。構成としては図3に示す実験図とよく似たシステムとなっている。この矢崎総業株式会社での計測実験から得られた7人分の事例を帰納学習させる。

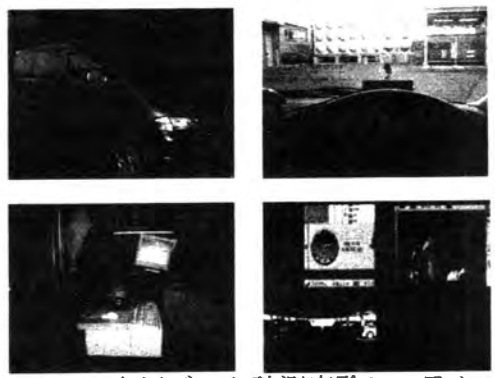


図4 事例データ計測実験システム

3.3 認識結果

7人21データを意図認識モデルに学習させた後、未学習の運転動作の入力しコンテキストを用いずに得られた結果が図5である。中段ノードの活性地分布が曖昧でどの運転意図か判断できない。

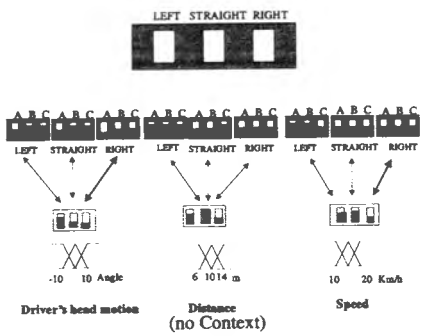
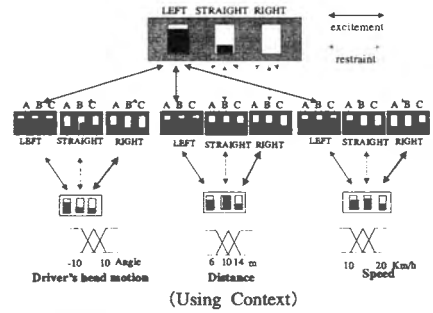


図5 意図推論の結果（コンテキストなし）

これに対し図6がコンテキストを用いた結果である。反響動作によりファジィエントロピーが減少しノード活性値分布はLEFTに収束する。



(Using Context)

図6 意図推論の結果（コンテキストあり）

4. 運転者の意図認識実験結果

意図認識実験を行う前に予備実験を行い、特徴のある7人分の学習事例を得た。これらの学習事例の数と認識率の結果を図5に示す。認識率は未学習の運転動作データを入力した時のものである。7人分の事例を学習させた後の認識率は左折88%，直進95%，右折86%であった。

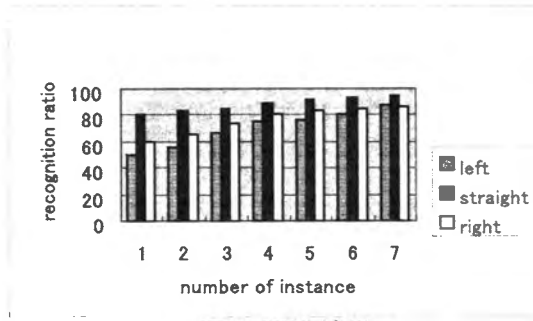


図7 認識結果

5. おわりに

学習事例の増加により認識率が向上し、帰納的学習が行われたことを示している。このことにより事例ベースによる意図認識機構の運転者意図推論の有用性を示した。

参考文献

[1] 山口亨、谷萩隆嗣、萩原将文:“ニューラルネットワークとファジィ信号処理”、コロナ社、1998

[2] 技術研究組合 国際ファジィ工学研究所-研究報告書:“ファジィ思考による知的情報処理”、株式会社 コンピュータ・エージ社、1995

[3].Chen Dayong, Toru Yamaguchi, "Distributed Sensory Intelligence Architecture For Human Centered System" Proc. of IEEE International Symposium on Computational Intelligence In Robotics and Automation,pp194-199,2001.

〒191-0065 東京都日野市旭が丘6-6
東京都立科学技術大学大学院
システム基礎工学専攻 山口研究室
武田 康宏
電話: 042-585-8641
Email: takeda@fml.ec.tmit.ac.jp

オントロジーを用いた意図認識機構の構築

Construction of intention recognition system by using ontology

黒崎　竜治*　　山口　亨**　　村上　洋*
Ryuji Kurosaki*　Toru Yamaguchi**　Hiroki Murakami *
kurosaki@fml.ec.tmit.ac.jp, yamachan@fml.ec.tmit.ac.jp, muraka@fml.ec.tmit.ac.jp
*/**[1]東京都立科学技術大学　大学院工学研究科　システム基礎工学専攻
*/**System Engineering Science, Graduate School of Engineering
Tokyo Metropolitan Institute of Technology
**科学技術振興事業団さきがけ研究２１
**PRESTO, Japan Science and Technology Corporation (JST)

Abstract; In this paper, we show the construction of the autonomic human support agent system that independently judge and act. Its method is applying human's communication to between human and agent, and interpreting various situations and commands. To do so, we construct ontology which is the engineering model of an intention for human.

1　はじめに

現在、計算機やロボット(エージェント)は人間生活のあらゆる局面で多様に利用されている。しかしながら、人間とそれらのシステムのインタラクションには限られた入出力系しか現状では許容されていない。それに比べ人間同士のコミュニケーションにおいては、多様な入出力のチャンネルを複合的に利用している。

本研究では、人間同士のコミュニケーションを人間とエージェント間に適用し、様々な状況下（シチュエーション）に於ける人間の動作からその意図を認識する。人間の意図の工学モデルであるオントロジーを構築し、そのオントロジーを検索手段とすることで、様々な状況に対応することができる。そして、人間の手や顔の動き（ボディランゲージ）といったユーザに直感型インターフェイスにより、意図を判断する自律移動エージェントを提案し、その有効性を示す。

2　システム構成

自律型人間共生エージェントシステムをロボットエージェントに実装した外観と構成を図１に示す。本研究におけるシステムは、３層構造からなるRasmussenモデルを基盤としている。ＣＣＤカメラから得られた人間の動作をインスタンス層において具体的入力情報に変換し得られた複数の情報をオントロジー層に入力する事により人間が何を意図しているのか推論するシステムである。

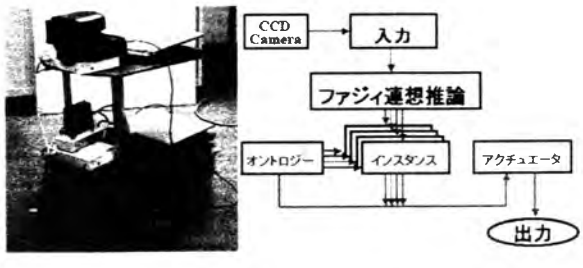


図１　自律型人間共生エージェントシステムの構成

2．1　推論機構とインスタンス

本稿では、図２に示すようにファジィルールを双方向連想記憶(ＢＡＭ)で表現したファジィ連想推論によって、CCD カメラから人間の手の色情報を頼りに特徴点を抽出して、特定動作の認識を実現している。

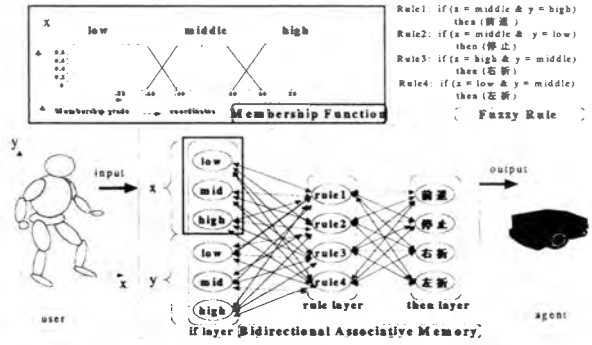


図２　ファジィ連想推論

2．2　オントロジー

本来オントロジーは哲学用語で「存在に関する体系的な理論」という意味である。世の中のものすべてを体系的に整理して説明することを目指すのが哲学におけるオントロジーである。図３にオントロジーの概念と提案モデルについて示す。

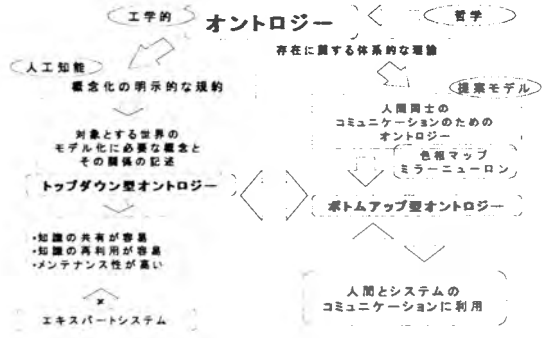


図３　オントロジーと提案モデル

2．2．1　オントロジーと概念ファジィ集合

本稿において、オントロジーの構築に概念ファジィ集合(CFS)を使用する。本研究では、層間が全結合されたネットワークであるＢＡＭによって、ＣＦＳの構築を行った。ＣＦＳでは、我々が通常概念を形成して行くときのように、別々に形成した個々の概念を逐次組み合わせながら、全体的な概念を形成してゆくことができる。つまり、個々の連想マトリクス $M_i(i=1,2,....,n)$ からなるＣＦＳを、式２－１にしたがって合成することができる。ここで、$norm[...]$ は連想マトリクスの正規化演算である。

$$M = norm[M_1 + M_2 + M_3 + ... + M_n] \quad (2\text{-}1)$$

2．2．2　オントロジー構築過程

まず、図４(第１過程)に示すように人間の観察や実験と、ＢＡＭ・ＣＦＳを用いてエージェントの基礎となるオントロジーの作成を行い、これを最も簡単なプロトタイプとする。次に、図４(第２過程)に示すように人間からエージェントの入力に関するオントロジーを適用し、それぞれ対応するエージェントから人間の出力のオントロジーを構築する。次に、図４(第３過程)に示すように新たなインスタンスにより、オントロジーを生成。他のエージェントに同様のパターンを持つオントロジーがあれば、それを合成することにより、新たなオントロジーを構築する。インスタンス内部には２．１項におけるコマンド認識のネットワークが含まれており、具体的な事例を格納している。

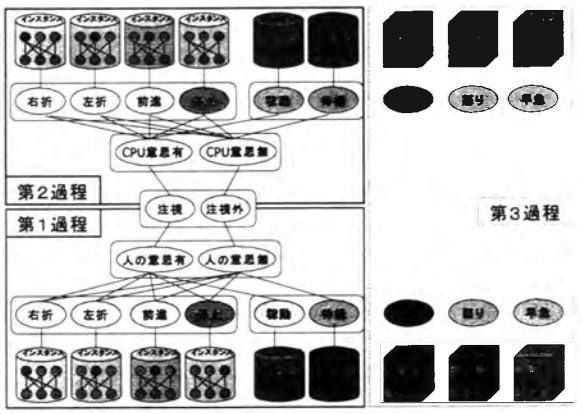


図４　オントロジー生成過程

3　オントロジーによる知識共有

意図表現の個人差などにより具体的情報であるインスタンスは異なる場合があるために、抽象的な概念で構成されたオントロジーを検索手段とする事で、他のエージェントがすでに持つインスタンスを自分の持つオントロジーの文脈と同等な物より検索し、下位層にある知識を共有する事でスムーズな知識獲得が行える。

4　実機実験

本システムにおける実機実験の条件と結果を示していく。今回の実験では、構築したオントロジーを搭載したロボットエージェントを２台用意し、知識を獲得しているロボットＡと知識が欠落しているロボットＢによる意図認識実験、オントロジーの学習実験、知識共有実験を行った。

図６に実際に動作状態のオントロジーの表示画面、表１にコマンド認識における特徴点と推論結果、表２にオントロジーにおける出力値を示す。

図５　動作状態のオントロジー

X	Y	GO	STOP	RIGHT	LEFT
13	52	1.165	0.754	-0.295	-0.295
61	-24	-0.341	-0.341	1.136	0.878

表１　コマンド認識時における特徴点と推論結果

GO	STOP	RIGHT	LEFT	ON	OFF	GAZE	NO GAZE
1.165	0.754	-0.295	-0.295	0.820	0.130	2.686	-2.019
-0.341	-0.341	1.136	0.878	1.120	4.270	-2.019	2.686

表２　オントロジーにおける入力値と推論結果

意図認識率の平均値は９２％であり、学習実験においては、ロボットに不満・満足の報酬を与える事により新たな概念の精練に成功し、知識共有実験においては、知識を持ち合わせないロボットＢがＡの知識を獲得し、ロボットＡと同等の意図認識に成功した。

5　おわりに

今回人間の意図認識機構としてオントロジーを提案し、手や顔の動きといった直感型インターフェイスによって人間の意図を自律的に判断し、オントロジーの成長や知識共有によってより賢くなるエージェントシステムを構築し、有効性を示した。

参考文献

[1] 増田俊輔　他：ナチュラルインターフェイスと情報共有 第 17 回ファジイ・システム・シンポジウム，pp. 265-268(2001. 9)
[2] S. Masuda, T. Yamaguchi, F. Harashima : Cooperative Intelligent System Using Ontological Neural Network,Proc. of 2001 IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems(INES-2001), Helsinki, Finland, pp.125-128 (CD-ROM) (2001.9)
[3] 増田俊輔 他：空間型知能とインテリジェントスペース：第 28 回知能システムシンポジウム，pp. 291-296(2001. 3)

[1]〒191-0052　東京都日野市旭が丘６－６
東京都立科学技術大学 大学院工学研究科 システム基礎工学専攻 山口研究室　TEL/FAX 042-585-8644
黒崎竜治　kurosaki@fml.ec.tmit.ac.jp

高齢者福祉ペット型ロボットにおけるコミュニケーションシステム
Communication System of Pet-type Robot for Aged People's Welfare

前田 利之
Toshiyuki MAEDA
阪南大学
Hannan University

丹羽 寿男
Hisao NIWA
(株) ピンチェンジ
PIN CHANGE Co.,Ltd.

吉田 和美
Kazumi YOSHIDA
(株) ピンチェンジ
PIN CHANGE Co.,Ltd.

萱嶋 一弘
Kazuhiro KAYASHIMA
(株) ピンチェンジ
PIN CHANGE Co.,Ltd.

前田 祐司
Yuji MAEDA
広島県立保健福祉大学
Hiroshima Prefectual College of Health Science

Abstract: We present a communication system of the pet-type robot for aged people's welfare. The robot can communicate with the people autonomously, and also it is net-accessible, and that feature allows the people to communicate with others, directly or using the communication server.

1 はじめに

これまで開発されてきた福祉機器の多くは身体的な支持やや介護者の支援を目的としており、精神的活動を支援するものは少ない。特に日本では独居老人は地域社会から隔離される傾向にあり、孤独感につながる。従って精神的側面からも他者との対話は非常に重要なものとなってきている。それらの課題を解決する中で、コミュニケーションを支援するペット型ロボットは非常に重要な候補であると考えられる [2, 3]。本研究では、新たな高齢者福祉用のペット型ロボットによるコミュニケーションシステムを提案する。

2 ユーザビリティ

ペット型ロボットを情報端末として考えたとき、高齢者が利用することを考えると、機械・電子機器の堅いという感じを与えてはいけない。高齢者にとって「かたい」機器というだけで、接する機会が減ることが予想される。また、音声や接触（センシング）で対話・操作することが可能で、ペットのようなあたたかみを持たなくてはならない。さらに、高齢者に操作を強要してはならない。

これらの要件を満たすために、端末の筐体としてぬいぐるみを設計し、内部に動作を可能とする制御ハードウェアを設計、実装した。また音声入力（認識）と音声出力（合成・組み立て）と、対話を補助するマルチモーダルなインターフェースを制御ハードウェア上に統合的に実装した。さらに、ユーザーインターフェースについては操作法にいたるまで極力簡単にした。例えば、電話をかけるときにも端末（ペット型ロボット）に触れる必要は無いようにしている。

ペット型ロボットは上述の機能のに加えて、コミュニケーションをサポートする情報端末にならなくてはならない。これは特に独居老人が孤独感を感じないようにするために非常に重要であると考える。

3 コミュニケーション機能

全てのペットロボットはインターネット接続しており、それが即ちロボットがペットであると同時にネット端末であるということである。音声技術がロボットと、あるいはロボットを介した情報交換のために利用される。これらの音声操作は利用者（高齢者）を自然に、また優しい感じにさせることができ、これが利用をさらに促進させると考える。現システムではコミュニケーションのための音声操作（スイッチ）がサポートされている。この機能は主にインターネットや公衆回線を用いた他者とのコミュニケーションに用いられる。特に後者の機能によりインターネット接続が困難な親戚・知人とのコミュニケーションをとる助けとなる。

ネットワークを通じたコミュニケーションの他に、ペット型ロボット単体での自律会話機能は、特

図 1: The robot “Molly”.

に独居老人にとっては必須である。なぜならば、ペットロボットがそのユーザーにとっての友人（パートナー）となることができ、孤独感からの開放を助けるからである。自律会話機能は、音声認識と音声生成からなる。情報媒体としての音声は、特に高齢者にとってはコンピュータを直接的に操作することが困難な高齢者にとっては非常に有効であると考える。

4 ペット型ロボットの構成

図 1 が「モーリー」と名付けられた本研究におけるペット型ロボットのプロトタイプである.

アフォーダンス [1] を考慮して、利用者が簡単に楽しく、かつ違和感なく利用できるように実装されている。昇り、下りのどちらについても、情報センターとの情報交換については TCP/IP 接続でなされている。電話については現時点では VoIP 等のプロトコルは用いておらず、内蔵 PHS をそのまま公衆回線網に接続している。

5 おわりに

以上述べたように、我々は情報センターを含んだペット型ロボットシステムを開発し、そのコミュニケーション機能について検討をおこなった。今後の課題としては、実証実験をさらに推めて機能の有効性の分析をすすめるとともに、さらに会話や発声のコンテンツ（内容構成）についても、より一層快適で有用なインタラクションを目指し、さらなる検討が必要であると考える。

謝辞

本研究の一部は、通信・放送機構 (TAO) の事業として実施されており、また広島県福祉関連産業創生プロジェクト研究開発支援事業補助により推進された。また実証実験に際しては広島県三原市、大阪府池田市、財団法人さわやか公社の方々に協力いただいた。関連各所・各員に対し、ここに深く感謝する。

参考文献

[1] E. J. Gibson and R. D. Walk, “The visual cliff,” *Scientific American*, 202:64–72, 1960.

[2] 松川善彦、前川英嗣、前田利之、萱嶋一弘、“電子玩具におけるアフォーダンスの実現 －システムの構築－”, 1996 信学総大, A–355, March 1996.

[3] 萱嶋一弘、吉田和美, “ペットロボットと心のケア” **リハビリテーション・エンジニアリング**, Vol. 17, No. 4, Nov. 2002.

連絡先

〒 580-8502　大阪府松原市天美東 5-4-33
阪南大学　経営情報学部
前田　利之
Tel: (072) 332–1224
Fax: (072) 336–2633
Email: maechan@hannan-u.ac.jp

アクティブジョイスティックによる人協調型車椅子ロボットの軌道制御

Trajectory Control of Human Cooperative Wheelchair Type Mobile Robot Using Active Joystick

井上 明子　　村上俊之
Akiko Inoue　　Toshiyuki Murakami
慶應義塾大学　　慶應義塾大学
Keio University　　Keio University

Abstract: When a human is riding on a wheelchair type mobile robot, autonomous motion or autonomously generated trajectory is useful in various aspects. However it is preferable that the mobile robot should be manipulated according to the user's will in case the user finds an obstacle which the mobile robot cannot detect. This paper proposes a novel strategy to generate a trajectory taking both robot's autonomously generated trajectory and the human's input into account. Cooperatation between human and robot is achieved by using fuzzy logic. Simulation and experimental results show the validty of the proposed method.

1 序論

近年，無限の作業領域を持つ移動ロボットは次世代の産業用ロボットとして多くの関心が寄せられ，目標位置への精密な位置決め制御を自律制御により実現することが大きな研究目標として取り上げられている。一方，これから到来する高齢化社会に向けて，人の動作をサポートできるロボットの実現にも多くの期待が寄せられている。本研究で取り上げている車椅子型移動ロボットもその一つであるが，従来の移動ロボットとは異なり移動ロボット本来の自律性だけではなくジョイスティックから入力される人間の動作指令を効率的に融合し，車椅子型移動ロボットの制御に反映させる人協調型の制御アルゴリズムの確立が必要となる。

自律的軌道をもつ車椅子型移動ロボットに人間が登場した場合，操作者の気分の変化や操作者に認識できない障害物との接触が生じた際に，ロボットの軌道生成に関してその自律性だけでは解決できない問題が発生する。そのような時に操作者の意志をとり入れて軌道の修正を行うことが必要である。本論文では操作者から与えられた目標位置に到達するための軌道はロボットが自律的に計画し，ジョイスティックの操作性を変化させる。これにより，操作者はジョイスティックの操作性から自然とロボットの意志（自律性）を認識し，操作しやすい方向（ロボットが行きたい方向）に操作者が操作する結果となる。一方，人間の意志がロボットの自律的軌道と異なった場合，ロボットの指令と人間の指令とが競合し，人間はジョイスティックを倒しにくい方向に倒そうとする。そのような時にロボットの指令と人間の指令の両者を考慮に入れ，両者をファジィ論理 [2] を用いて融合させることでジョイスティックの倒しやすさを決定する手法を提案する。

2 実験システムのモデリング

2.1 移動ロボット

移動ロボットは図 1 のような構造を持っている。

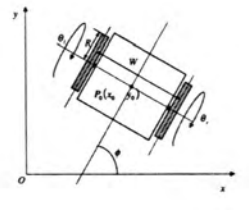


図 1: 移動ロボット

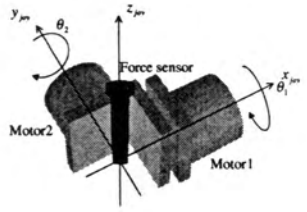


図 2: ジョイスティック

移動ロボットの基準点の世界座標系における加速度 $\ddot{\boldsymbol{X}}$ と車輪の回転角加速度 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ の関係を表す運動学関係式は次のようになる。ここで $\boldsymbol{J}^{+}_{aco}$ はヤコビ行列の擬似逆行列である。

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{J}^{+}_{aco}\ddot{\boldsymbol{X}} \tag{1}$$

移動ロボットの動力学関係式は (2) 式のように表せる。ここで $\boldsymbol{M}_{\theta}$ は等価慣性行列である。

$$\boldsymbol{M}_{\theta}\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\tau} \tag{2}$$

2.2 ジョイスティック

本研究に用いるジョイスティックは図 2 に示すように x_{joy} 軸，y_{joy} 軸まわりにモータが取り付けてある。二つのモータの回転角を θ_1，θ_2 とする。先端の速度は近似的

に以下に与えることができる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_j \\ \dot{y}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l\dot{\theta}_2 \\ l\dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

人間がジョイスティックを倒した方向角 ϕ_{human} と垂直から倒した角度 θ_{human} は近似的に以下のように与えられる。

$$\phi_{human} = \text{atan}\frac{\theta_1}{\theta_2} \tag{4}$$

$$\theta_{human} = \sqrt{\theta_1^2 + \theta_2^2} \tag{5}$$

3 人間とロボットの協調手法

今回の研究の目的は人間の意志およびロボットの自律的な軌道計画の両者を協調させてジョイスティックのたおしやすさ（=やわらかさ）を決定することにある。ここで，人間という曖昧さを持った対象を取り扱うためにファジィ論理を用いる。本制御手法の良い点は，対象の厳密なモデル化が不要であるという点にある。提案手法の目的は，人間の入力した方向角がロボットの計画した軌道に近いほど，また人間が“進みたい”という意志を強く持っているほどジョイスティックが倒れやすくなり，その方向に移動しやすくなる操作感度を実現するということにある。ロボットの計画した軌道への近さとして，方向角の差 $\Delta\phi$ を評価値とする。また人間の“進みたい”という意志の強さとして，ジョイスティックへの入力トルクの時間積分値を評価値にする。ファジィ論理では，if ～ then ～という形のルールを用いて記述し，そのルールに基づいて制御を行う。if ～で表される前件部としてはロボットの計画した方向角および人間の入力した方向角の差と入力トルクの積分値を用いる。さらに then ～で表される後件部ではジョイスティックのやわらかさを用いる。ここで，ジョイスティックのやわらかさを決める変数を融合度係数 ζ とする。

3.1 方向角の差

ロボット座標系における所望の方向角を ϕ_d を定める。人間がジョイスティックを倒した方向角を ϕ_{human} とする。ϕ_d と ϕ_{human} の差の絶対値を $\Delta\phi$ とし，ϕ_d と ϕ_{human} の近さを表す指標を $\pi - \Delta\phi$ を評価値とする。

$$\pi - \Delta\phi = \pi - |\phi_d - \phi_{human}| \tag{6}$$

$\pi - \Delta\phi$ が大きいほど，すなわち人間の入力とロボットの所望の方向角が近いほどジョイスティックがやわらかくなる。これをファジィルールとして記述すると (7) 式～(9) 式のようになる。

$$\text{if } \pi - \Delta\phi \text{ is SM then } \zeta \text{ is SM} \tag{7}$$

$$\text{if } \pi - \Delta\phi \text{ is MD then } \zeta \text{ is MD} \tag{8}$$

$$\text{if } \pi - \Delta\phi \text{ is BG then } \zeta \text{ is BG} \tag{9}$$

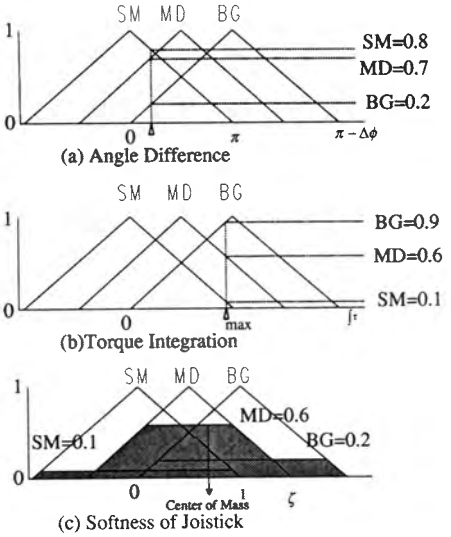


図 3: ファジィ集合

3.2 人間のトルク入力

人間側の意志の指標として，人間の入力したトルクを時間積分した値を評価の対象とする。トルクはジョイスティックを倒している時間間隔だけ積分され，ジョイスティックを戻すと積分値をクリアする。人間の入力トルクの時間積分は次の式で表せる。

$$\int \tau_{human} dt \tag{10}$$

$\int \tau_{human} dt$ が大きいほど，ジョイスティックがやわらかくなる。これをファジィルールとして記述すると (11) 式～(13) 式のようになる。

$$\text{if } \int \tau dt \text{ is SM then } \zeta \text{ is SM} \tag{11}$$

$$\text{if } \int \tau dt \text{ is MD then } \zeta \text{ is MD} \tag{12}$$

$$\text{if } \int \tau dt \text{ is BG then } \zeta \text{ is BG} \tag{13}$$

ここで前件部の SM，MD，BG はそれぞれ人間がその方向に少し進みたい，中程度に進みたい，とても進みたいことを示している。人間の入力のファジィ集合は図 3(b) のメンバーシップ関数で表される。

3.3 ジョイスティックのやわらかさ

ファジィ論理の後件部では，操作者の意志とロボットの自律性の融合を実現するため，ジョイスティックの柔らかさの指標として融合度係数 ζ $(0 < \zeta < 1)$ を決定する。ジョイスティックのやわらかさのファジィ集合は図 3(c) のように定める。ここでSM，MD，BG はそれぞれ少しやわらかい，中程度にやわらかい，とてもやわらかいことを示している。前述した方向角の差のファジィ集合とトルクの積分のファジィ集合から，やわらかさの値 ζ を決定する。前件部にルールが複数個あるので，Min-Max 法を使って解の合成を行う。$\Delta\phi$ と $\int \tau dt$ がある値であったとき，それぞれのファジィ集合の SM，MD，BG の値がひとつずつ決まる。ここでは前件部の二つの条件に対して AND 演算を行い，二つの値のうち小さい方の値 (Min) を選択する。図 3(a)，(b) の場合では SM=0.1，MD=0.6，BG=0.2 となる。最後にこれらの集合の OR 演算 (Max) をして得られたファジィ集合の重心を解とする。重心の値を求めるには，図 3(c) の横軸を ζ，縦軸を $\mu(\zeta)$ として次の演算によって求められる。

$$\zeta = \frac{\int \zeta\mu(\zeta)d\zeta}{\int \mu(\zeta)d\zeta} \tag{14}$$

(14) 式により求められた融合度係数 ζ からコンプライアンス制御に用いるパラメータを決定する。今回は算出した ζ を用いて K_C，D_C，M_C の 3 つを K_{max}，D_{max}，M_{max} から K_{min}，D_{min}，M_{min} まで変化させる。パラメータを決定する関係式は次のように表せる。

$$\begin{aligned} K_C &= K_{max} - \zeta(K_{max} - K_{min}),\ K_{min} \le K_C \le K_{max} \\ D_C &= D_{max} - \zeta(D_{max} - D_{min}),\ D_{min} \le D_C \le D_{max} \\ M_C &= M_{max} - \zeta(M_{max} - M_{min}), \\ & \qquad M_{min} \le M_C \le M_{max} \end{aligned} \tag{15}$$

4 シミュレーション

- $\Delta\phi = 0$ の場合 (Case1)
- $\Delta\phi = \frac{\pi}{4}$ の場合 (Case2)
- $\Delta\phi = \frac{\pi}{2}$ の場合 (Case3)

上の 3 つの場合について，

- 移動ロボットの位置
- ジョイスティックのやわらかさ (融合度係数 ζ) の変化

のシミュレーションを示す。

4.1 ジョイスティックのやわらかさの変化

ジョイスティックのやわらかさの変化については Case1 ～ 3 に加えて，$\Delta\phi = \frac{3}{4}\pi$ の場合，$\Delta\phi = \pi$ の場合についてもシミュレーションを行った。図 4 から，人間がトルクを加えつづけるとなめらかにやわらかさが増していくことがわかる。トルクの積分値が最大値に達するときの変化，到達点は $\Delta\phi$ によって異なっていることがわかる。

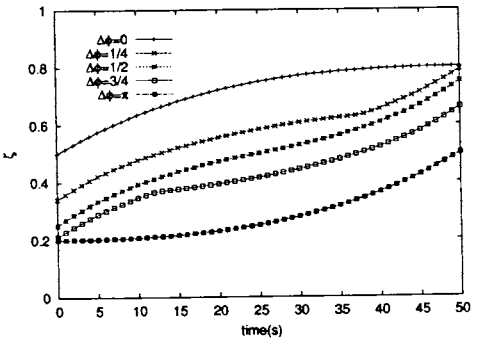


図 4: トルク積分値を変化させたときの柔らかさ (融合度係数 ζ) の変化

4.2 移動ロボットの軌道

各方向差に対して人間が一定のトルクをジョイスティックに加えたときの移動ロボットの軌道を図 5 から図 7 に示す。移動ロボットの動作がジョイスティックのやわらかさの変化に応じて決まっていることがわかる。この場合，人の意志が反映されながら，ロボットの自律軌道に誘導された結果となっている。

5 実験

本論文で提案した手法の有効性を示すために実験を行った。

5.1 実験結果

シミュレーションと同様の場合についての，ジョイスティックのやわらかさ (融合度係数)ζ の変化，移動ロボットのたどった軌跡のデータを図 8 から図 13 に示す。これらの図より，操作者のトルク入力に応じてジョイスティックの柔らかさ (融合度係数) が滑らかに変化し，その柔らかさに基づいたジョイスティックの変位により移動ロボッ

トの軌道生成および追従動作が実現できていることがわかる。

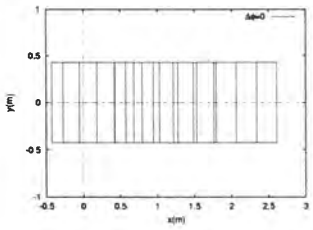


図 5: 移動ロボットの軌跡 (Case1)

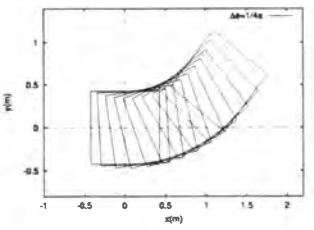


図 6: 移動ロボットの軌跡 (Case2)

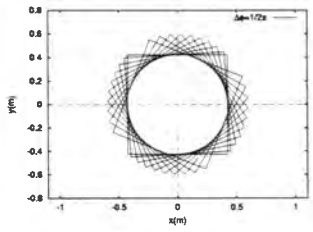


図 7: 移動ロボットの軌跡 (Case3)

5.2 考察

3つのケースにおいて融合度係数ζは，提案するファジィ論理に応じて方向角差と操作者の操作入力と協調して滑らかに変化していることがわかる。また実験時に操作者は融合度係数ζの変化に応じてジョイスティックより力の変化を感じることができ，移動ロボットの自律軌道を感じとりながら滑らかな軌道修正を行うことができている。さらに車椅子型移動ロボットは融合度係数ζの変化に基づいたジョイスティックの変位により生成された軌道を操作者に違和感を与えることなく滑らかに追従している。

6 結論

本論文では自律的に計画された車椅子型移動ロボットの軌道に，アクティブジョイスティックを用いて操作者の意志を反映させるためのコンプライアンス制御系の一構成法を示した。さらに，ファジィ論理に基づいて決定される融合度係数ζに応じてジョイスティックのコンプライアンスゲインを変化させることで，ロボットの持つ自律性と操作者の意志を融合させる手法を提案した。また，融合度係数ζの変化と，それに応じて修正された自律軌道に対する移動ロボットの追従特性をシミュレーションと実験により評価し提案手法の有効性を確認した。

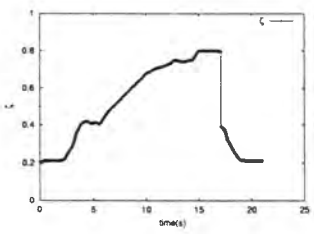


図 8: ζの時間変化 (Case1)

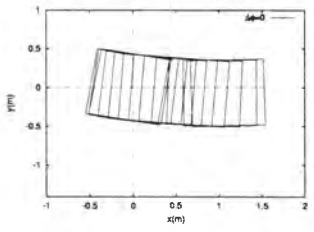


図 9: ロボットの軌跡 (Case1)

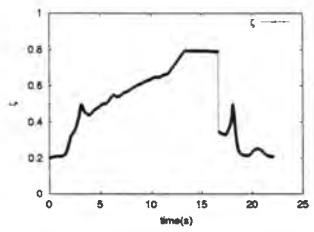


図 10: ζの時間変化 (Case2)

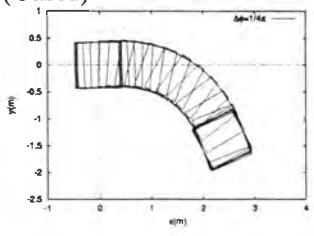


図 11: ロボットの軌跡 (Case2)

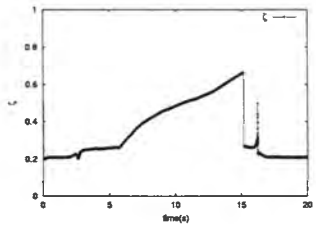


図 12: ζの時間変化 (Case3)

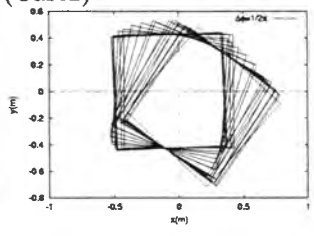


図 13: ロボットの軌跡 (Case3)

参考文献

[1] Y. Horiguchi, T. Sawaragi, G. Akashi, Naturalistic human-robot collaboration based upon mixed-initiative interactions in teleoperating environment, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Volume 2, pp.876-881, 2000

[2] 萩原 将文, ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム, 産業図書, pp.76 - 92, 1994

[3] K. Ohnishi, et al., "Robust Motion Control by Disturbance Observer" Journal of RSJ, Vol.11, No.4, pp. 486-493, 1993

連絡先

〒 223-8522
横浜市港北区日吉 3-14-1
慶應義塾大学理工学部村上俊之研究室
井上明子
電話:045-563-1151
FAX:045-566-1720
e-mail:akiko@sum.sd.keio.ac.jp

安全な福祉ロボットのための三次元力制限機構と反射機構の提案

Rehabilitation Robot Risk Reduction by Three-Dimensional Force Limitation and Reflex Mechanism

手嶋教之,
Noriyuki TEJIMA,
立命館大学,
Ritsumeikan Univ.,

荒木克治
Katuji ARAKI
関西TLO
Kansai TLO

Abstract: In this paper, we elaborate upon two different types of mechanisms for rehabilitation robot risk reduction. The first type is a three-dimensional force limitation mechanism, which is an advanced mechanism of the straight-movement type force limitation mechanism. It will be effective when the end-effector of the robot hits a human. The next one is a reflex mechanism, which is similar to the biological reflex. It will be effective when an arm of the robot hits a human.

1 はじめに

現在の福祉概念の中心は自立であり，介護ではない．福祉の目標は高齢者や身体障害者らのQOL (Quality of Life)を向上させることであり，そのためにはその人たちの自立を達成することが最も重要である．痴呆や重度の機能障害などでどうしても自立が図れない場合の2次的手段が介護である．このため，現在の世界の福祉ロボットの主流は自立を支援するロボットであり，介護支援ロボット研究を行っているのは日本を含めた東アジアの国ぐらいしかない．例えば欧米では食事や日常生活の自立のために重度障害者がHANDY-1[1]やMANUS[2]などのマニピュレータを実際に使用し始めてからすでに10年以上が経つ．日本でもようやく2002年にセコム社の食事自立支援ロボットであるMySpoon[3]が発売された．

オランダ製の自立支援汎用マニピュレータMANUSに関しては，数年以上使用している数十名のユーザに対して様々な調査研究が行われ，評価されている[4]．それによると，多くのユーザがMANUSなしでの生活に戻ることなど考えられないというほど必要不可欠なものと感じているが，改善して欲しい点も多数挙げられている．価格や使いやすさのほかに，動作速度が遅いこと，可搬重量(2kg)が小さいこと，腕の長さがもう少し長いほうがよいこと，などが挙げられている．例えば動作速度を上げることは技術的には容易だが，そうすると安全面で問題となる．現状ではMANUSなどの福祉ロボットでは，極端に小さなパワーのアクチュエータを使用する以外に適切な安全対策は見つかっていないためである．それも理論または実験的裏づけなしに制限パワー値を決定している．すなわちMANUSなどの自立支援ロボットを超える高機能のロボットを開発するためには，福祉ロボットの安全に関する詳細な検討が必要不可欠である．以上より本研究の目的は，福祉ロボットのための安全技術を向上させることにより，安全でかつ高機能な福祉ロボットを実現することである．この技術が実現すれば，福祉以外の人間共存ロボットにも応用が期待できる．

2 安全に関する理論的考察

安全の基礎に関してはすでにいくつかの国際規格でその考え方が規定されている．ISO/IEC GUIDE51によれば，「リスク」を「危害の発生する確率及び危害のひどさの組み合わせ」と定義し，「安全」とは「受け入れ不可能なリスクがないこと」と定義している[5]．このことは，安全とは絶対的なものではなく相対的なものであること，リスクを0にすることはできないこと，などを意味している．安全へのアプローチは，福祉ロボットのあらゆるリスクを明らかにして(リスクアセスメント)，その残存リスクが大きすぎる場合には小さくするような対策をとることを繰り返すことによってなされる．残存リスクが許容できる範囲にまで小さくできない場合には，使用者に対してその残存リスクを明らかにする必要がある．

本研究では，福祉ロボットが人間に対して機械的に接触した場合のリスクに限定して考えることとする．また人体との接触において，眼球などの特別に弱い部分での接触については考えないこととする．また，許容可能なリスクの大きさは，ユーザ自身や社会が決めることであり，設計者が決めるものではない．ここでは，福祉ロボットの許容可能な危害のひどさは，皮膚軟部組織の軽度な損傷程度であると仮定する．このような仮定のもとで福祉ロボットのリスク低減策について考えることとする．

もしもロボットと人間の皮膚との接触が静的であれば，ロボットが人間に加える静荷重値F_{st}が静的な荷重閾値F_{st_th}を越えないようにすればよい．

$$F_{st} < F_{st_th} \tag{1}$$

一方ロボットが衝撃荷重を皮膚に加える場合についてはこれまで明確になっていない．衝突の際に消費される単位面積あたりの運動エネルギーが皮膚軟部組織の損傷と関係するという報告[6]がいくつかあるが，運動エネルギーとの関係を明確に証明する実験は行われているわけではない．また，運動量などの他の物理量との関係を示唆する論文もある[7]．本報では単位面積あたりの消費運動エネルギーを指標とできると仮定する．すると，ロボットの慣性モーメントIが一定だとして接触面積をAとすれば，単位面積あたりの許容運動エネルギーK_{th}から，接触時の許容最大速度ω_{th}を求めることができる．

$$\omega < \omega_{th} = \sqrt{\frac{2K_{th}A}{I}} \tag{2}$$

この許容最大速度以下でロボットが動作をする限り，このロボットは安全となる．もしも皮膚軟部組織の損傷が運動エネルギーではなく運動量などと関係するのであったとしても，同様の考え方で許容最大速度を求

めることができる.

以上より福祉ロボットの機械的接触に関するリスクを許容可能まで低減するには，(1)(2)の両式を満足するように福祉ロボットを設計すればよいことが明らかとなった. あとは静的な荷重閾値F_{st_th}および単位面積あたりの許容運動エネルギーK_{th}さえ実験的に明らかにすればよいこととなる.

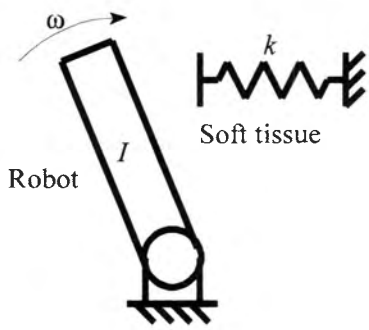


図1 ロボットと人体の衝突モデル

(2)を満足するようにロボットを設計した場合，ロボットの慣性モーメントIが大きいと許容最大速度ω_{th}が極端に小さくなり，実用には耐えられないほど遅い速度でしか動作できなくなってしまう可能性もある. このような場合に対処するために，単純なモデルで検討してみる.

図1は慣性モーメントIの1自由度ロボットが角速度ωで人体に衝突した場合のモデルである. 人間の皮膚・ロボットの柔軟被覆・服などによる弾性は，バネ定数kのバネ1つで単純化した. 実際には粘性もあるが計算が複雑化するのでここでは無視できるものと仮定する. すると，ロボットが人体に衝突した際のピーク荷重値F_{peak}は

$$F_{peak} = \sqrt{2Ek} = \sqrt{Ik}\omega$$

となる. ただし，Eは運動エネルギーである. このことから，単位面積あたりの許容運動エネルギーK_{th}によって

$$F_{d_th} = \sqrt{2K_{th}Ak}$$

のように動的な荷重閾値F_{d_th}を求めて，ロボットが人体に衝突した際のピーク荷重がこれを越えないようにすれば，(2)式と同等の条件が満足できることとなる.

$$F_d < F_{d_th} \qquad (3)$$

3 力制限方式の比較

以上で，静的にしろ動的にしろ，ロボットと人間の間に作用する荷重値を人体の耐性値以下に制限することがリスク削減において有効な方法であることが明らかになった. 以下ではそのための方式について比較検討する.

ロボット表面やアクチュエータなどの機構に柔軟性を持たせれば安全であると主張する人がいるが，これは誤った考えであることは上記考察から明らかである. 柔軟構造は衝突時のピーク荷重を下げる働きをするが，静的接触には効果がない. また許容量以上の弾性エネルギーが蓄積されて，これが一気に運動エネルギーとして放出される危険性がある. これを避けるには適当な粘性が必要となる. このため単に柔軟な構造であるだけではなく，適切な粘弾性設計を行う必要がある.

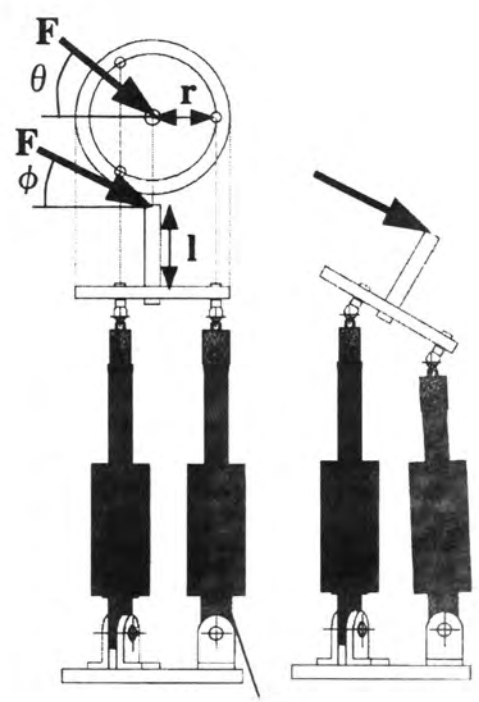
力制御によって過大な力を制限する方式も考えられる. この方法は制御系がきちんと動作している限りには有効な方法であるが，力制御系をフェイルセーフなシステムにすることは現状ではできないため，故障や誤動作の際でもリスク低減を保障することはできない. システムを多重化することによって信頼性を高める方法もあるが，力センサも制御系も多重化する必要があり，コストや構造の複雑さなどからあまり現実的ではない. そのためこの方法は実用的な方法ではあるが，最後の段階でロボットの安全を保証できるものではない.

より信頼性の高い方策として，力(トルク)制限機構がある. これは摩擦力や磁力を使って弱い力・トルクであれば伝達するが，過大な力・トルクは伝達しない構造の機構であり，ロボットの各関節に取り付けて使われる. 電気系に比較して故障する可能性が低く，信頼性が高いために有効な手段である. ただし，多関節マニピュレータでは，手先の制限すべき力と関節トルクとの関係はマニピュレータの姿勢によって大きく変化するので，最適設計をすることは容易ではない.

4 3次元力制限機構

以上の問題を解決するため，以下に示す3次元力制限機構を提案する. この3次元力制限機構は，3次元方向から加わる圧縮荷重に対して，閾値以下であればそれを伝達し，閾値以上であればその荷重を逃がす機構である. その原理を図2に示す. この3次元力制限機構は3本の直動型力制限機構を組み合わせた構造となっている.

直動型力制限機構は1方向の圧縮力に対してだけ力制限を行う機構で，例えば図3のような構造で実現できる. 図3左の機構に磁力よりも小さな圧縮力を加えても変形しないが，磁力以上の圧縮力を加えると磁石が離れて機構が縮み，圧縮力を逃がす(図3右). 圧縮力がなくなるとバネの力で復帰する. この際使用している異方性ダンパの特性により，圧縮方向には粘



Straight movement type force limitation mechanism
図2 3次元力制限機構の動作原理

性がほとんどないので急速に圧縮されるが，進展方向には粘性を高くしてあるので除圧時には数秒かけてゆっくりと復帰する．このためこの機構によって蓄えられた弾性エネルギーが除圧時に一気に開放される危険はない．

各直動型機構の閾値を$\mathbf{F_{th}}$とすると，3次元力制限機構に加わる外力$\mathbf{F}$は次のように制限される．

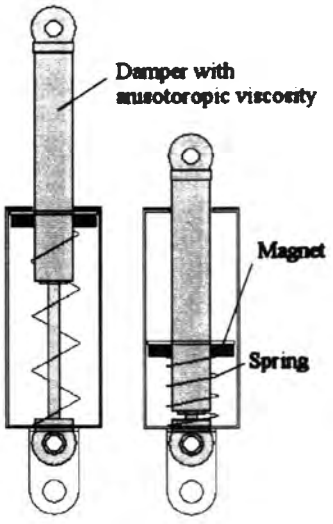


図3 直動型力制限機構の構造

$$\mathbf{F} < \mathbf{F_{3th}}(\theta,\phi) = \frac{3\mathbf{r}\mathbf{F_{th}}}{\mathbf{r}\sin\phi + 2\mathbf{l}\cos\phi\cos\theta} \quad \left(|\theta| \le \frac{\pi}{3},\ \ 0 \le \phi\right)$$

この原理に基づき3次元力制限機構を試作した．その外観を図4に示す．なお，今回は試作なので，特性計測用に6軸力センサを組み込んでいる．3本の直動型力制限機構は同じように製作したが，閾値は36.2～41.3[N]とばらつきがでた．この原因は，摩擦や荷重方向の誤差，磁石接着面の平面度などが影響していると考える．

6軸力センサを用いて試作した機構の3次元力の閾値を測定した．その結果の一例として，ϕ=0 の場合を図5に示す．誤差はあるが，ほぼ理論どおりに力制限が行われていることが示せた．

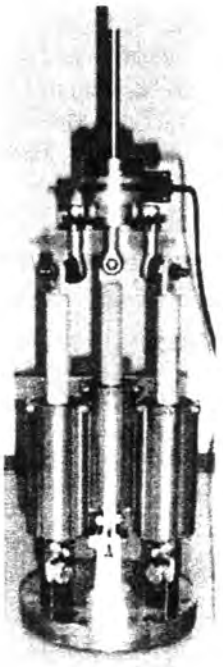


図4 試作した3次元力制限機構

この3次元力制限機構をロボットアームの手首部に取り付ければ，ロボットの姿勢によって制限閾値が変化することはなくなる．しかし，この機構では力の閾値はその圧縮荷重が加わる位置と方向とによって変化する．理論上$\mathbf{l}/\mathbf{r}$比が1のときに力の加わる角度による閾値の最大値と最小値の比が最小となるが，それでも$\sqrt{5}$倍になる．試作した装置では$\mathbf{l}/\mathbf{r}$比が3.8であり，閾値の最大値と最小値の比が10倍近い差が出てしまった．ロボットの手先効果器に取り付ける場合でも，$\mathbf{l}/\mathbf{r}$比は1より大きくなるのが普通であり，現在の構造では閾値の最大値と最小値の比を3倍程度に抑えることは難しい．

また，このような機構を実際のロボットの手首部につけることは難しい．通常のロボットアームの内部には動力伝達機構が組み込まれていることが多いが，現在の3次元力制限機構ではこのような伝達機構を使用できるような構造にはなっていない．今後はこれらの点を改良していく予定である．

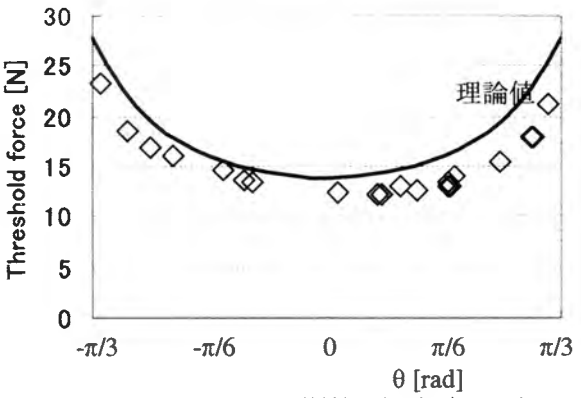


図5 3次元力制限機構閾値の測定結果の例

4 反射機構

3次元力制限機構は，ロボットの手先効果器に過大な力が加わった時には有効な手段になりえるが，ロボットが手先効果器以外の部分で接触した場合には対応できない．そこで人体がアーム部に接触した場合のリスク低減機構も必要となる．そこで，3次元力制限機構を使用する際に同時に使用する機構として以下に示す反射機構を考案した．

人体には生命維持・危険回避のために反射機能が備わっている．例えば，手で熱いやかんを触ると，その信号は脊髄レベルで処理され，即座に手を引っ込めるよう筋肉に命令が送られる．この反射は大脳で判断していないため，反応速度が速く，また精神状態に依存しないという特徴も持つ．今回提案する反射機構は，この反射機能を模擬したものである．提案する反射機構の動作原理を図6に示す．

ロボットアームとそれを動作するアクチュエータはピンを介して接続されている(図6(a))．ロボットアーム表面に配したタッチセンサが何かに接触したことを検知すると(図6(b))，コンピュータで処理せずに直接駆動回路を用いてピンをはずす．するとアームはアクチュエータとは分離され，アクチュエータが回りつづけた場合でもバネの力でアームは接触物とは反対方向に引き戻される(図6(c))．これによってアームが過大な力を加えることを防ぐ．ピンを引き抜く回路はファイルセーフに構成することができるのでセンサ等の故障にも対応できる．手先効果器に荷重が加わった場合とは異なり，アーム部表面に接触した場合にはいつでも異常事態であると考えられるので，この場合にはタッ

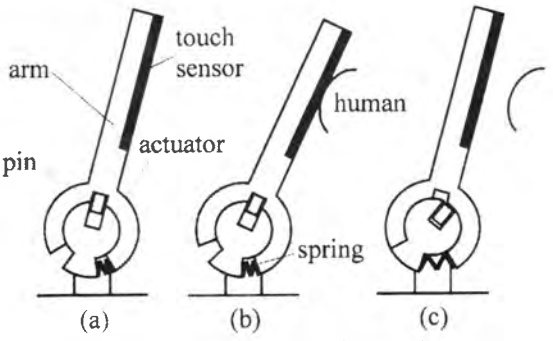


図6 反射機構の基本動作原理

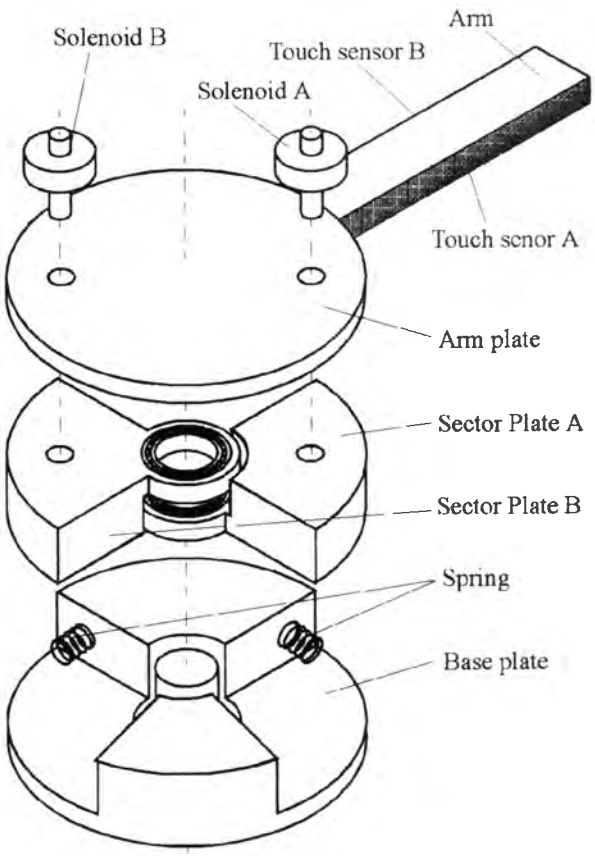


図7 双方向に動作可能な反射機構の基本構造

チセンサで十分である. これにより, コンピュータがアクチュエータを停止するのに十分な時間をとることができる.

実際に使用するには図6のような一方向の動作ではなく両方向の衝突に対して作動する必要がある. このための機構は図7に示すような少し複雑な構造となる. ソレノイドA及びBはそれぞれ扇状板A及びBを固定している. この際にはベースを二つの扇状板ではさみこんで固定していることによって, ベースとアームは一体化して動作する. もしもセンサAがONになるとソレノイドAがOFFとなり, 扇状板Aがアームと分離する. その結果, バネによって二つの扇状板は相互に離れ, 結果としてアームは衝突物体から離れる方向に動く. センサBがONになったときも同様の原理で反対方向に動作する.

現在この装置を試作中であるが, 適切なバネ強さ及びソレノイドの選択が重要となることがわかっている. また, 現在の構造では, この装置が働いた後に自動復帰することはできず, 人が復帰作業をしなくてはならず, 実用性に乏しい. 小型軽量化などとともに今後の課題と考えている.

5 まとめ

福祉ロボットの実用化を考えると, 知能化や高機能化以前に安全性が最も重要である. しかし, 福祉ロボットに関する安全化技術はまだなにもないに等しい状態である. 日本ロボット工業会の福祉用ロボット標準化調査委員会の中でも, 福祉ロボットの安全に関して活発な議論がなされ, 福祉ロボット安全の基本的考え方や安全技術を日本から世界に発信し, この分野での日本の優位性を確保したいとしている.

今回, 福祉ロボットの衝突安全に関して理論的に考察し, これに基づいて二つの機構を提案した. これらの機構にはまだ問題点が多く, これらを使ってすぐに福祉ロボットを安全にするようなことはできない. しかし, これらを改良し, 技術を積み重ねることによって安全な福祉ロボット実現の一助になると考えている. 今後もこれらの機構の問題点を改良し, より実用的な安全機構の提案を続けていく予定である.

参考文献

[1] HANDY-1ホームページ http://ourworld.compuserve.com/homepages/Rehab_Robotics/Hand1.htm
[2] MANUSホームページhttp://www.exactdynamics.nl/
[3] MySpoonホームページhttp://www.secom.co.jp/myspoon/
[4] G. J. Gelderblom, Manus Manipulator User Profile, **Proceedings** *of AAATE '99 SIG1 Workshop of* **Rehabilitation Robotics**, 1999, pp.8-14
[5] ISO/IEC GUIDE 51 英和対訳版: 安全面－規格に安全に関する面を導入するためのガイドライン, 日本規格協会, 1999
[6] C. R. Cardany, G. Rodeheaver, J. Thacker, M. T. Edgerton and R. F. Edlich, The Crush Injury: A High Risk Wound, **JACEP**, **5** (12), 1976, pp.965-70
[7] A. Trott, Mechanisms of Surface Soft Tissue Trauma, **Ann Emerg Med**, **17** (12), 1988, pp.1279-83
[8] 平成14年度経済産業省委託工業標準化推進調査高齢者等福祉ロボットの標準化に関する調査研究成果報告書, 社団法人日本ロボット工業会, 2003

連絡先:
〒525-8577 草津市野路東1-1-1
立命館大学理工学部ロボティクス学科
手嶋教之
電話: 077-561-2880
FAX: 077-561-2665
E-mail: tejima@se.ritsumei.ac.jp

生体情報フィードバックによる乗馬ロボットの制御

Control of Horseback Riding Robot with Biofeedback

陳貴林（高知工科大）　王碩玉（高知工科大）　河田耕一（高知工科大）　四宮葉一（松下電工）
小澤尚久（松下電工）　石田健司（高知医科大）　石田健司（日本医科大）　土谷武士（北大）

Gui-Lin CHEN, Kochi University of Technology
Koichi KAWATA, Kochi University of Technology
Takahisa OZAWA, Matsushita Electric Works, Ltd.
Tetsuhiko KIMURA, Nippon Medical School
Shuoyu WANG, Kochi University of Technology
Youichi SHINOMIYA, Matsushita Electric Works, Ltd.
Kenji ISHIDA, Kochi Medical School
Takeshi TSUCHIYA, Hokkaido University

Abstract: The validity of the health promotion using the developed horse-riding robot has been proved by much clinical testing. In order to acquire the better health promotion effect during training some muscle of a human body, it is required to feedback a certain human body information. In this paper, a framework to constitute the biofeedback system of the horseback-riding robot for health promotion using carried type electromyometer is proposed. To hold muscular power activity during training, the robot's motion frequency and pattern are online adjusted. The experiment results are reported.

1. はじめに

まもなく迎える超高齢社会において，高齢者や障害者が元気・安心・安全で質の高い生活を実現するために，病気や障害に陥ってからの介護機器を開発することが必要であると同時に，健康増進に積極的に寄与することも大事である．

乗馬によるリハビリテーションはドイツをはじめヨーロッパでは理学療法士によく使われている．これを乗馬療法と呼ばれて，馬に乗ってバランスをとることにより，腹筋・背筋を中心とする筋力強化で，腰痛の予防とバランス感覚の改善が期待できる療法である．身体効果のほかに，屋外で乗馬をすると，視線が高くなる，といったことで得られる「解放感」や，馬の世話をすることによる「生き物との対話」といった心理的効用がある[1]．乗馬療法による身体障害者の症例改善報告は盛んにされている[2]~[4]．しかしながら，実際の生きた馬で行うことは，その維持，生育環境，動作の再現の困難さなど，さまざま問題があるため，広範に普及するには限界がある[5]．

そこで，生きた馬のかわりに乗馬ロボットを開発し，身体への筋力増加と平衡感覚の改善で有効性があるのが実証を得られた[6]．さらに，この結果を応用することで，家庭用の乗馬療法機器の開発を行っている[7]．

しかし，これまでの研究でも健康増進訓練する前にロボットの動作を予め決めておくことで，実際に訓練するときに個人の具体的な情況によってロボットの動作を調整することはできない．訓練者が訓練動作対して熟知しに従って，効果がだんだん弱いようになることがある．訓練過程中では訓練の強さが適当かどうかように掌握することが困難である．

そこで，本論文では携帯型筋電計を利用して，健康増進用乗馬ロボットの生体情報フィードバックシステムを構成し，特定な部位の筋力活動を保持するために，筋電計から測定した平均発揮筋力率とロボット運動モード（運動周波数と運動パターン）の関係をオンラインに学習し，運動モードをオンライン調整する方法と，実験結果について報告する．

2. 生体情報フィードバック制御系の構築

乗馬ロボット生体情報フィードバックシステムを Fig. 1に示す．携帯型筋電計を利用して，乗馬者の筋電量の変化を制御パソコンにフィードバックさせることで，設定した発揮筋力率目標 P_d と学習した人体の性能（データベースに保存した平均発揮筋力率とロボット運動モードの関係）によって，オンラインに運動モードを調整する．それによって人体の特定の部位に対して効果がある訓練することができる．

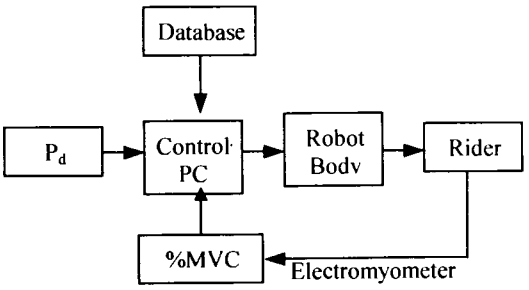


Fig.1　Block diagram of the biofeedback control system

一般に筋肉放電量があまりに大きいと筋肉が傷を受けやすい，また筋肉放電量があまりに小さいと訓練の効果が見られないと言われている．本文では現在の筋肉放電量と最大筋肉放電量の比を発揮筋力率(%MVC)といい，発揮筋力率を訓練の強さと考える．毎日人体の状態が異なっていることと測定する部分位置の不一致のため，目標として訓練の強さが異なっていることを考慮しなければならない．そこで，毎回にまず人体の特性を測定しなければならない．まず，運動モードと平均発揮筋力率の関係を測定する．現時点での最大の発揮筋力率と最小発揮筋力率との関係がわかり，目標を決定する重要な参考になる．

人体の特性は時変で且つ強い非線形を持つ．しかし短い時間内で，その他の条件が同じであれば，一定の規則がある．よって人体の特性は１つの式では表現するのが困難であるが，IF−THEN により，ある程度で近似表現できる．

3. オンライン学習制御実験

被験者は 23 歳の大学生で，測定部位は傍背柱肌群（第７脊椎横推 3cm），電極間の距離は 3cm とし両極表面筋放電位の計測を行った．測定データは筋電計で最初処理を

して，コンピューターに入力される．Pic.1 に実験様子を示す．

Pic.1 Photograph of experiment

Table 1 に示すように，運動モードを 9 種選択する．まず，9 種の運動モードはそれぞれ 20 秒間実行して，各モードの平均発揮筋力率（%MVC）を計算する．各運動モードの平均発揮筋力率を Fig.2 に示す．

Table 1 Robot motion mode

MMn	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pattern	walk			trot			gallop		
Frequency	0.44	0.57	0.71	0.65	0.84	1.03	0.88	1.15	1.41

Note: MMn for the number of selected robot motion mode

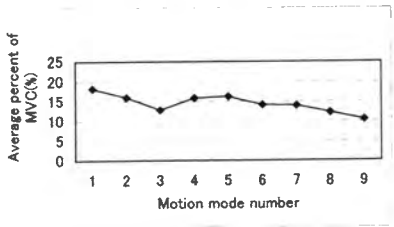


Fig.2 Average percent of MVC versus motion mode

平均発揮筋力率によって，大きい順に各運動モードを並べ替える．その順序を m と表示する．その順序の関係はデータベースに保存する．従って，最大平均発揮筋力率 P_{max} と最小平均発揮筋力率 P_{min} がわかる．P_{max} と P_{min} の範囲が 5 段階分けられる．段階の長さ l は

$$l=(P_{max}-P_{min})/5 \tag{1}$$

次に，訓練を 120 秒間行って，運動モードを 20 秒ごとに調整する．調整するときに誤差 Δe は式(2)で計算する．

$$\Delta e=(\sum_{i=1}^{n} p_i+(k-n)p_n)\Big/k-p_d \tag{2}$$

ただし，k は調整の総回数

n は現時点の調整回数

p_i は i 回目の 20 秒間の平均発揮筋力率

p_d は訓練目標とする平均発揮筋力率

運動モードと平均発揮筋力率の関係によって運動モードを調整するルールは

IF $\Delta e > l/2$ THEN $m=m+1$

IF $\Delta e < -l/2$ THEN $m=m-1$

IF $m<1$ THEN $m=3$

IF $m>9$ THEN $m=7$

$l/2$ を誤差の範囲として，訓練後で制御が成功か判断する条件は式(3)で表す．

$$|\Delta e|<l/2 \tag{3}$$

例として，今回実験には $P_{max}=19.0$，$P_{min}=10.1$，$l/2=0.89$．3 段目を選択して 3 段目の中心を制御目標 $P_d=14.55$ とした．制御結果が Fig.3 に示すように，誤差 Δe は-0.6 で，誤差の範囲にあることが確認できた．このような実験を 2 名の被験者で 5 回行ったが，成功結果は 3 回ある．それにより，発揮筋力率によってロボット運動モードを調整する可能性を確認した．

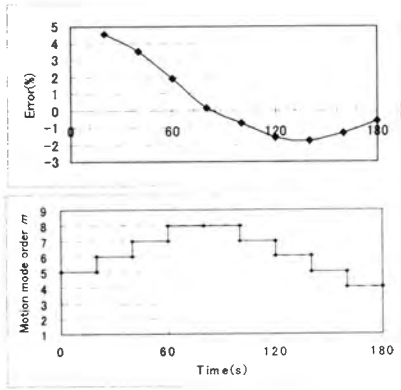


Fig.3 Control experiment results

4. まとめ

携帯型筋電計を利用して，健康増進用乗馬ロボットの生体情報フィードバックシステムを構成し，特定の部位の筋力を保持するために，ロボット運動モードのオンライン調整と実験結果について報告した．発揮筋力率によってロボット運動モードを調整する可能性を確認した．制御の成功率を高めるために，制御ルールを改善するのは必要である．

参考文献

[1] 太田，“乗馬療法”，畜産の研究，Vol.51, No.1, pp. 148--154, 1997.

[2] M. J. Blery and N. Kauffman, “The effects of therapeutic horseback riding on balance”, *Adapted Physical Activity Quarterly*, Vol.5, pp.221--229, 1988.

[3] R. Dlin, A. AyaloNo. Yazdi, O. Inbar and D. Snir, “The influence of therapeutic horseback riding on physiological biomechanical, and psychomotor variables”, *Maccabiah-Wingate International Congress on Sport & Coaching*（1989: Wingate), pp.131--140, 1991.

[4] J. R. MacKinNo.n, S. No.h, J. Lariviere, A. MacPhail, D. E. Allan and D. Laliberte, “A study of therapeutic effects of horseback riding for children with cerebral palsy”, *Physical & Occupational Therapy in Pediatrics*, Vol.15, No.1, pp.17--34, 1995.

[5] 木村，“生馬シミュレータの開発”，医療，Vol.40，No.8，別刷，pp. 749--755, 1986.

[6] 仲島，四宮，関根，王，石田，木村，“VR 乗馬療法システムの開発とその効果検証に向けての取り組み”，ヒューマンインタフェース学会学術論文誌，Vol.1，No.4，pp. 81--86, 1999.

[7] 四宮，関根，仲島，澤田，王，石田，木村，“乗馬療法機器の開発と筋力トレーニング効果の検証”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.6, No.3, pp. 197--202, 2001.

連絡先

〒782-8502

高知県香美郡土佐山田町宮ノ口185

高知工科大学知能機械システム工学科

知能ロボティクス研究室(王研究室)

王碩玉

TEL: 0887-57-2306 FAX: 0887-57-2320

E-mail: wang.shuoyu@kochi-tech.ac.jp

ニューラルネットによる効率的なサッカーの試合予測モデル

The efficient prediction model of the soccer games by the multi-layered neural network

飯坂康年　　椎塚久雄
Yasutoshi IIZAKA　　Hisao SHIIZUKA
工学院大学大学院　工学研究科　情報学専攻
Informatics, Graduate School of Kogakuin University

Abstract : We propose a prediction method of soccer games result using the past data and the multi-layered neural network as a support tool of TOTO until now. Since much useless input data existed because every input data was decided by our subjects, as an inprovement of the former method, in this paper it is shown that a new method deleting useless input data using Principal Compotent Analysis(PCA) is given with useful example.

1. はじめに

1993 年の日本プロサッカーリーグ（J リーグ）の開幕以来 10 年弱でサッカーは国民的スポーツと言っても過言ではないくらい国民に浸透してきた．2002 年の日韓共同開催のワールドカップや海外で活躍する日本人選手など近年さらにサッカー熱が高まってきている．特に，2001 年の TOTO（サッカーくじ）が発足したことによりサッカーの試合結果を予測することの興味が高まっている．しかし，実際に TOTO を購入する人は限られており，浸透度はそこまででもない．原因の一つとしてサッカーの試合を予測することの難しさが考えられる．サッカーの知識に長けた専門家は，複数の試合に及ぼす要因を考え予測していると考えられるが，サッカーの知識に乏しい人は専門家ほどの精度を得るのは困難である．そこで，本論文ではサッカーの試合結果予測の支援ツールとして過去の複数のデータとニューラルネットを用いてサッカーの試合予測モデルを構築し，入力変数に主成分分析法を用いることで，実際には入力変数として意味を持たない変数を見出しさらに予測精度を高める手法を提案している．

2. 従来の試合予測モデルと問題点

試合予測を行うために 33 入力，3 出力，隠れ層 2 層からなる 4 層の階層型ニューラルネットモデルを採用してきた．出力層の素子を A, B, C とすると，A が発火すると勝ち，B が発火すると引き分け，C が発火すると負けを示唆するものとする．サッカーの試合に影響を及ぼす要因と考えられるものを入力変数とする．チームの戦力を数値化する手法として J リーグの勝点制を利用することにする(式 2.1)．Pの値が 1 に近いほど戦力は高いことを示唆し，0 に近いほど戦力が低いことを示唆している．戦力はステージでの強さ，試合会場（HOME または AWAY）ごとでの強さ，作成する試合データの直前から過去 5 試合の強さを数値化し，多角度から強さを表現する．

$$P = \frac{3 \times W + 2 \times V + 1 \times D}{3 \times \text{試合数}} \qquad (2.1)$$

但し，
W ：90 分以内の勝利数
V ：延長戦での勝利数
D ：引き分け数

また入力変数は以下の通りである．

・メインとするチームについての入力変数として
X1　今ステージの予測する試合までの戦力 P
X2　予測する試合会場(HOME または AWAY)での戦力 P
X3　最近 5 試合の戦力 P
X4　予測する試合会場での有利，不利さ（X2-X1）
X5　チームコンディション（X3-X1）
X6　今ステージの予測する試合までの延長突入率
X7　予測する試合会場での延長突入率
X8　最近 5 試合の延長突入率
X9　予測する試合会場での延長への突入のし易さ(X7-X6)
X10　チームコンディションを考慮した延長突入率(X8-X6)
X11　今ステージの一試合あたりの得失点差
X12　予測する試合会場での得失点差
X13　最近 5 試合の得失点差
X14　予測する試合会場での得失点差の増減（X12-X11）
X15　チームコンディションを考慮した得失点差(X13-X11)

・相手チームについての入力変数として
X16～X30 上記のものと同様のものとする．

・メインチームと相手チームの戦力差の入力変数として
X31　今ステージの戦力差（X1-X16）
X32　予測する試合会場での戦力差（X2-X17）
X33　最近 5 試合の戦力差（X3-X18）

ここで問題となるのは，これらの入力変数は試合結果に影響を及ぼしそうなものとして独自に用意している点である．そこで，入力変数に対し主成分分析法を適用することで実際には試合に影響を及ぼしていない変数がないかを探ることにする．そして試合に影響を及ぼしていない変数と思われるものを入力変数から外すことにする．

3. 入力変数に対する主成分分析法の適用

試合予測モデルの入力変数はメインとするチームと相手チームについての入力変数が同じになるように構築してある．そのため，今回主成分分析法を適用する範囲はメインとするチームについての入力変数(X1～X15)とした．その結果の第 1 主成分から第 3 主成分の値をまとめたものを表 3.1 に示す．第 3 主成分までの累積比率は 75.1%である．

表 3.1　主成分分析の結果

	第1主成分	第2主成分	第3主成分
X1	0.35932836	0.09779933	-0.1811458
X2	0.3913693	0.08357122	0.08880134
X3	0.32246798	0.21440874	-0.2903572
X4	0.26330865	0.03873778	0.29120002
X5	0.18282094	0.27096263	-0.3150693
X6	-0.0690622	0.49328774	-0.0973242
X7	-0.052825	0.53263302	0.00625879
X8	-0.1386127	0.45306843	0.06531657
X9	0.02912416	0.29007733	0.29984336
X10	-0.1735971	-0.0132719	0.36366407
X11	0.37194343	-0.1342498	-0.0492019
X12	0.3093855	0.01192168	0.38708769
X13	0.36955298	-0.1038061	-0.0166304
X14	0.11057165	0.12298935	0.54951456
X15	0.2652511	-0.0432289	0.02217048

4.　新しい試合予測モデル

もともと試合に影響を及ぼす要因として入力変数を決定してきたので得られた第 1 主成分を“試合に影響を及ぼす度合い”と解釈することにする．ここで入力変数 X6～X10 に着目すると，これらの第 1 主成分値は非常に小さいものになっており，かつこれらは全て延長突入率に関わる変数である．そこで入力変数 X6～X10 を試合に影響を及ぼさない変数と考え入力変数から外すことにする．これに伴い，相手チームの同等の入力変数 X16～X20 も外すことにする．これらより新しいサッカーの試合予測モデルの入力変数は以下の通りになる．

・メインとするチームについての入力変数として

Y1　今ステージの予測する試合までの戦力 P
Y2　予測する試合会場(HOME または AWAY)での戦力 P
Y3　最近 5 試合の戦力 P
Y4　予測する試合会場での有利，不利さ（Y2-Y1）
Y5　チームコンディション（Y3-Y1）
Y6　今ステージの一試合あたりの得失点差
Y7　予測する試合会場での得失点差
Y8　最近 5 試合の得失点差
Y9　予測する試合会場での得失点差の増減（Y7-Y6）
Y10 チームコンディションを考慮した得失点差（Y8-Y6）

・相手チームについての入力変数として

Y11～Y20 上記のものと同様のものとする．

・メインチームと相手チームの戦力差の入力変数として

Y21 今ステージの戦力差（Y1-Y11）
Y22 予測する試合会場での戦力差（Y2-Y12）
Y23 最近 5 試合の戦力差（Y3-Y13）

5.　新しいモデルと従来のモデルの精度比較

精度比較するための予測対象試合は，2001 年 2nd ステージの第 6 節から最終節とする．但し，J2 から J1 にあがってきたばかりのチームは同じ土俵でのデータが収集不可能なため行わない．また，より多くの試合を予測するために 4 チームについて行う．従来の予測モデルと新しい予測モデルの予測結果をまとめたものをそれぞれ表 5.1，表 5.2 に示す．学習データはメインとするチームの過去 1 年分の試合データから作成したものを使用し，学習は BP 法で行い総誤差関数が 0. 0001 になるまで繰り返し，大域的最小値へ収束せずに局所的最小値へ収束する場合を考え，10000 回で打ち切るものとする．

表 5.1　従来の予測モデルの予測結果

		試合数	正答数	正答率[%]
試合結果別	勝ち	22	17	77.3
	負け	12	8	66.7
	引き分け	1	0	0.0
試合会場別	HOME	20	13	65.0
	AWAY	15	12	80.0
トータル		35	25	71.4

表 5.2　新しい予測モデルの予測結果

		試合数	正答数	正答率[%]
試合結果別	勝ち	22	18	81.8
	負け	12	8	66.7
	引き分け	1	0	0.0
試合会場別	HOME	20	14	70.0
	AWAY	15	12	80.0
トータル		35	26	74.2

今回採ったサンプル数は 35 試合である．実際の試合結果と予測結果が一致したのは従来の予測モデルは 25 試合で正答率は 71.4%であった．内訳としては，“勝ち”と判断したのは 22 試合中 17 試合，“負け”と判断したのは 12 試合中 8 試合，“引き分け”と判断したのは 1 試合中 0 試合で，的中率はそれぞれ 77.2%，66.7%，0%であった．

一方，新しい予測モデルは予測結果が 35 試合中 26 試合一致し正答率は 74.2%であった．内訳としては，“勝ち”と判断したのは 22 試合中 18 試合，“負け”と判断したのは 12 試合中 8 試合，“引き分け”と判断したのは 1 試合中 0 試合で，的中率はそれぞれ 81.8%，66.7%，0%であった．

6.　まとめ

本論文ではサッカーの試合予測モデルの効率化を図るためにニューラルネットの入力変数に対し主成分分析法を用いる手法を提案した．結果としては入力変数の数を減らしたにも関わらず精度が向上することが確認できた．

より精度を上げるための今後の課題としては，不足している入力変数の発見，学習データの採用方法の見直しが必要である．

【参考文献】

[1] 馬場則夫，小島史夫，小澤誠一：“ニューラルネットの基礎と応用”，共立出版株式会社，1994
[2] 長谷川勝也：“これならわかる Excel で楽に学ぶ多変量解析”，株式会社技術評論社，2002
[3] 飯坂康年，椎塚久雄:階層型ニューラルネットによるサッカーの試合予測，第 18 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.101-102，2002.

【参考 Web】

[1] J リーグ公式サイト
http://www.j-league.or.jp/

【連絡先】

〒163-8677
東京都新宿区西新宿 1-24-2
工学院大学大学院　工学研究科情報学専攻
数理情報研究室　飯坂康年
Tel：03-3342-1211(代表)　内線：2653
E-mail：em02002@ccs.kogakuin.ac.jp

強化学習によるRoboCupサッカーエージェントの行動獲得に関する研究

Research of Behavior Acquisition of Robocup Soccer Agent by Reinforcement Learning

○星野 孝総‡ 倉多 宏† 亀井 且有‡
Yukinobu Hoshino Hiroshi Kurata Katsuari Kamei

立命館大学大学院理工学研究科† 立命館大学理工学部‡
Graduate School of Computer Science Dept.of Computer Science
Ritsumeikan University Ritsumeikan University

Abstract RoboCup is an international joint project of soccer Game by Robot teams. The purpose of RoboCup project is a development and a study about AI and intelligent robotics research. In this project, many people are studying an intelligent robotics on RoboCup simulation league about many fields of science. On this paper, we would report some good move of soccer agents on RoboCup simulator. Those agents would learn the best action by using Reinforcement learning. We have created and modified unique Fuzzy rules for the RoboCup soccer agent. Also, we would propose a fuzzy reasoning method for RoboCup and Reinforcement learning.

1 はじめに

RobuCupは，2050年にヒューマノイド型ロボットで人間のサッカー世界チャンピオンに公式ルールで勝利することを目標とするプロジェクトである[4]．中でもシミュレーションリーグはエージェント間の協調行動の獲得や学習など，情報科学の幅広い分野の研究が可能なリーグである[3][6][7]．シミュレーションリーグ[5]には，プレイヤーのポジショニングを強化学習を用いて学習するチームや，遺伝的アルゴリズムを用いて処理を自動プログラミングするチーム[2]など，さまざまな研究がある．本研究では，これまでに特徴的な入力に対して行動決定するプレーヤーのファジィルールを設計してきた[1]．そこで，本論文では強化学習を用いてファジイルールのチューニングを行うプレーヤーを作成し，対戦実験を通して得点と失点から有効性を検証する．

2 RoboCupシミュレーションリーグのライブラリ

Carnegie Mellon Universityではパス，ドリブル等の個人技ルーチンをライブラリとして公開している．ソースコードはC++で書かれている．このライブラリはCMUnited99(以下CMUと呼ぶ．)と呼ばれ，多くのチームのライブラリとして用いられている．本研究で扱う，パス，ドリブル等の行動はCMUを用いている．また，CMUにはテスト用プレイヤーとして，ボールを見つけ，ボールに近づき，ボールをゴール方向へ蹴るという単純な動作を行うプレイヤーが用意されている．本研究では，これを実験の対戦プレーヤ(以下PLと呼ぶ．)として用いる．

3 ファジィ推論を用いたプレイヤー

ファジィ推論を用いるプレイヤーは，最も近い敵の位置，最も近い味方の位置，ボールの位置，自分の位置，自分の向きを入力とし，行動を出力する．出力である行動は，ボールを蹴ることが出来る状態で実行できる行動と，そうでない行動に分けることができる．ボールが視野内に無い場合は，ボールを捜すために$turn$行動を選択し，90度左に回転する．プレイヤーの入出力と処理手順を図1に示す．

ファジィルール前件部の入力変数は，敵の位置($enemy$)，味方の位置($teammate$)，ボールの位置($Ball$)，自分の位置($MyPosition$)，自分の向き($MyDir$)の5つとした．また，$enemy$，$teammate$，

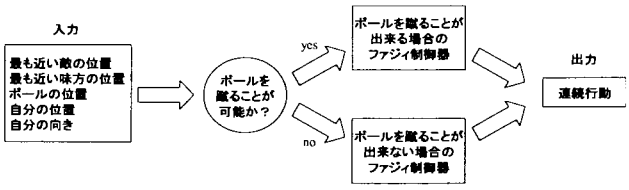
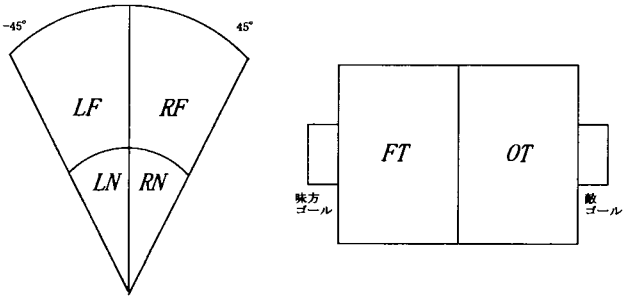


図 1 モデル化されたプレイヤーの入出力と処理手順

Ball に関するファジィ変数は，視野を 4 分割し，図 2(a) に示すように LeftFar(*LF*)，LeftNear(*LN*)，RightFar(*RF*)，RightNear(*RN*) とした．*MyPosition* に関するファジィ変数は，図 2(b) にしめすように OpponentTerritory(*OT*)，FriendlyTerritory(*FT*) とした．*MyDir* に関するファジィ変数は，図 3 に示すように OpponentGoal(*OG*)，FriendlyGoal(*FG*) と設定した．



(a) (b)

図 2 視野と位置に関するファジィ変数

ファジィルール後件部の出力変数は各行動を表している．各行動に関する実数値は [0:1] の実数値をとる．これらの前件部と後件部を組み合わせ，計 420 個のファジィルールにより行動を決定するシステムを構成する．例として，ボールを蹴ることが出来ない状態における 91 番目のファジィルール R^{91} を式 (1) に示す．

R^{91} : if *enemy* is LN and teammate is RF and *Ball* is LN and MyPosition is FT and *MyDir* is OG
then *GetBall* is Good and ToGoal is Bad and *ToSpace* is Bad (1)

行動を決定するファジィ推論法には簡略推論法を用いる．はじめに，各ルールの前件部の適合度 w_i を min

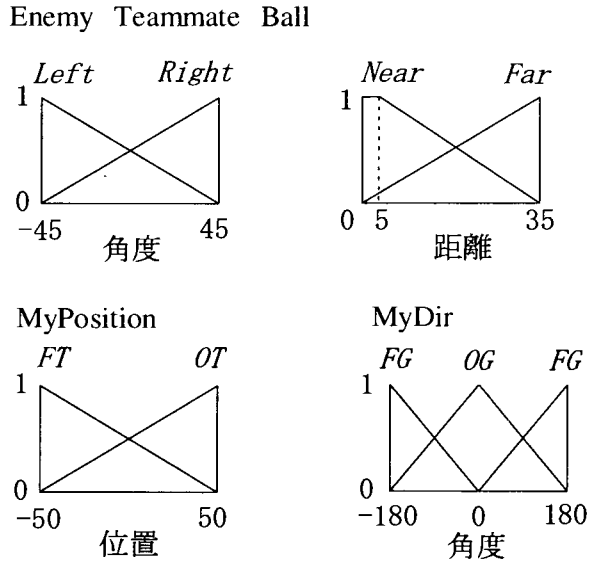


図 3 ファジィ変数のメンバーシップ関数

演算で求める．次ぎに，ルールの適合度と行動の評価値に関する重み付き平均 y を計算する．例として，式 (2) に y_{Pass} に関する計算例を示す．ここで，$Pass_i$ はルール R^i の行動 $Pass$ に対する評価値を表している．また，全ての行動に対し重み付き平均を求め，重み付き平均が最も高い行動を選択する．

$$y_{Pass} = \frac{\sum_{i=1} w_i Pass_i}{\sum_{i=1} w_i} \quad (2)$$

4 強化学習によるプレイヤーの学習

ProfitSharing 法を用い，ファジィルールの後件部の各行動に関する評価値を更新することにより，学習を行う．Kickoff から得失点するまでの期間を，1 エピソードとした．プレーヤーの行動は一定時間連続して実行される．そのため，サーバーの単位時間をステップに用いて学習すると，同じ行動が何度も強化されるという不具合が生じる．そこで，入力から行動を出力した時刻までを 1 ステップとして学習した．自チームが得点した場合には報酬が与えられ，失点した場合には罰が与えられる．

報酬 r から各ステップで選択された行動に対する強化関数 $f(r)$ を式 (3) で与える．ここで r は報酬，d は報酬の割引率である．d，w はそれぞれ [0:1] の値をとる．T は報酬を受けたステップ数，t はルールを適応した時

のステップ数である．

$$f(r) = d^{T-t}r \tag{3}$$

行動選択時に適用したファジィルールの後件部を，$f(r)$ 及びファジィルールの帰属度 w から行動の評価値を更新する．ファジィルール i の Pass が選択された場合の後件部 $Pass_i$ の更新式を式 (4) を与える．

$$Pass_i \leftarrow \alpha Pass_i + (1-\alpha)wf(r) \tag{4}$$

ここで α は学習率であり，[0:1] の値をとるのもとする．また人があらかじめ設計したファジィルールを後件部の初期値として与えた．こうに強化学習を用いて行動を獲得するプレイヤーを RLP とし，またその概念図を図 4 に示す．

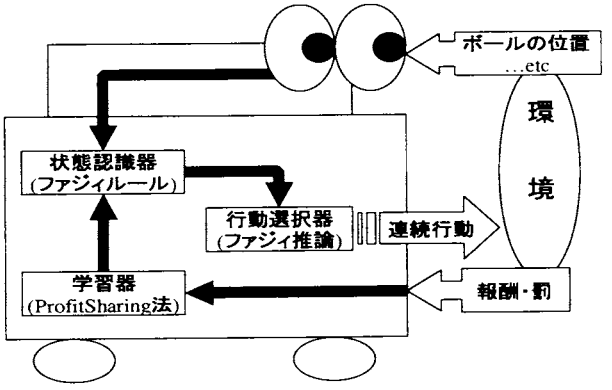


図 4 RLP の概念図

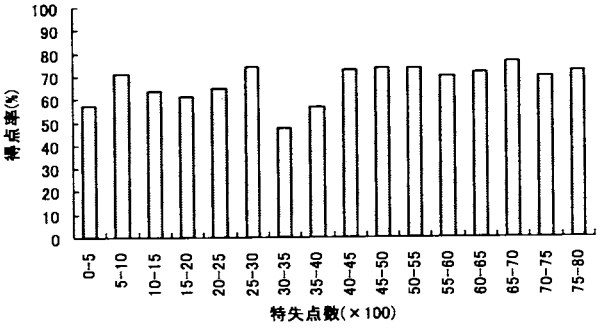


図 5 RLP の得点率

5 RLP VS PL

RLP と LP の対戦シミュレーション実験を行い，学習の有効性を検証した．対戦人数は 4 対 4 とし，RLP のプレイヤーをそれぞれ RLP1，RLP2，RLP3，RLP4 とする．サーバ上で，プレイヤーがスタミナを消耗しないように設定し，オフサイドルールも適用しないように設定した．試合時間は設定せず，得失点数が 8000 点になったとき試合を終了し，そのときの図 5 に得点率のグラフを示す．得失点数が 1500〜2000 点と 6000〜6500 点の間では図 6 に示すような行動が多く観測された．最初に RLP 全員がボールを取りに行き，敵と味方が近づくような混戦状態になる．すると，図 7 に示すように，1 体の RLP が抜け出し，ゴール前へ移動をはじめる．最後に残った 3 体がボールを奪い，ゴール前へ移動している RLP に，パスを出す．この時は RLP4 が最も多くゴール前へ移動していた．

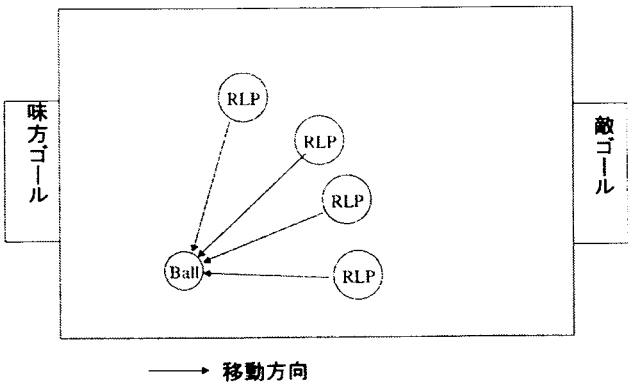


図 6 RLP の動作 (得点率が高いとき)

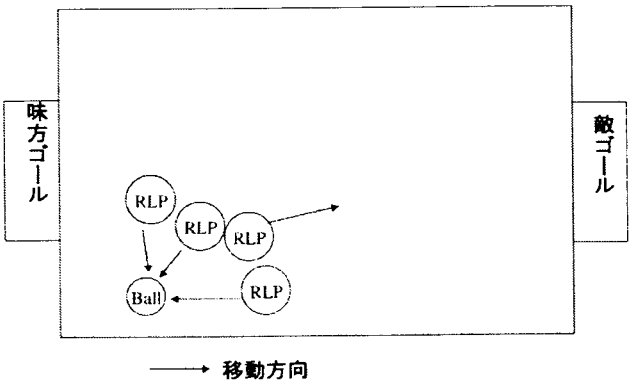


図 7 混戦状態における RLP の動作 (得点率が高いとき)

3000〜3500 点の間では，図 8 のような 2 対 4 の争いになる状態が多く観測された．このとき，RLP1 と

RLP4は敵ゴール前へ移動し，RLP2とRLP3がボール獲得の行動が選択されていた．得点率が最も高いときで，最高得点率は75%を超えている．しかし，獲得したファジィルールを解析してみると，味方や敵の位置ではなくボールの位置が行動を決定する要因になっていることが解った．

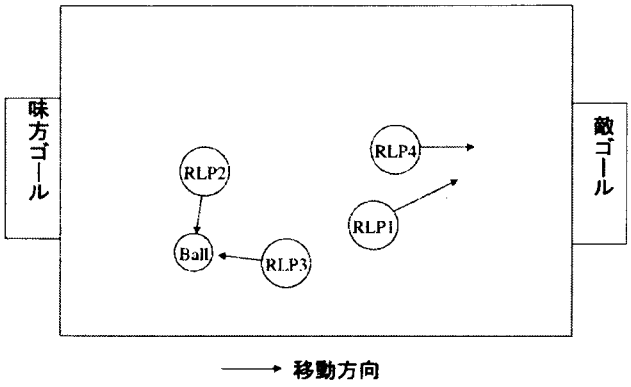


図 8 RLP の動作 (得点率が低いとき)

6 おわりに

本研究では，特徴的な入力が得られた際にとる行動をファジィルールで記述し，強化学習を用いてファジイルールの後件部をチューニングするプレイヤーを提案した．対戦実験を通し，その得失点から有効性を検証した．強化学習を用いることにより，パスの中継を行うプレイヤー，やフォワードの役割をするプレイヤーを得ることができた．しかし，味方や敵の位置に関するファジィ変数は利用されていなかった．原因としては，一番近い味方や敵の位置を入力として扱っていることが考えられる．また，ディフェンダーの役割を果たすプレイヤーを得ることもできなかった．報酬を与えるエピソードは，キックオフから得点する間であるため，得点する直前の行動に対し，大きな報酬が与えられる．このため，ディフェンダーの役割を果たすプレイヤーは得られなかったと考えられる．今後の課題として，報酬や罰の与え方の工夫や，ファジィ変数を経験的に獲得する手法の提案．さらには，ファジィ変数の獲得を自動化の手法などを提案していきたい．

参考文献

[1] 倉多，亀井：ファジィ推論に基づくRoboCupサッカーエージェントの行動選択・制御，第46回システム制御情報学会研究発表講演会論文集，pp.277–278(2002)

[2] 高橋，伊藤：RoboCupではじめるエージェントプログラミング，共立出版，2001年

[3] 前田：マルチエージェントロボットにおける協調行動学習のための進化シミュレーション，日本ファジィ学会誌,Vol.13,No.3,pp.281–219(2001)

[4] 浅田：RoboCupSoccerロボットの行動学習・発達・進化，共立出版，2002年

[5] 前田：ロボカップ：シミュレーションリーグ，日本ファジィ学会誌,Vol.14,No.6,p.p.575–583(2002)

[6] 有働，中島，石渕：ファジィQ学習によるサッカーエージェントの構築，第18回ファジィシステムシンポジウム，p.p.89–90(2002)

[7] 河原林，久保，森下，高橋，小高，小倉：ファジィ意思決定によるサッカーパスポイントの決定，第17回ファジィシステムシンポジウム，p.p.431–434(2001)

[お問い合わせ]
星野孝総
立命館大学理工学部　情報学科
滋賀県草津市野路東 1-1-1

ファジィ行動選択強化学習によるサッカーロボットの戦術獲得
Strategy Aquisition of Soccer Robot under Reinforcement Learning for Fuzzy Action Selection

日高 芳智
Yoshitomo HIDAKA

水本 雅晴
Masaharu MIZUMOTO

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

Abstract: Generally, machine learning needs huge time. This paper aims at performing efficient study by describing action in machine study by fuzzy reasoning. Validity is verified by conducting a simulation experiment and a machine experiment for the proposal technique.

1 はじめに

近年、RoboCupプロジェクトやヒューマノイドのような自律エージェントロボットを対象とした高度な研究が盛んに行われている。

我々はRoboCup中型機リーグを対象とした自律エージェントロボットの行動制御を題材とした研究を行っている。初期段階としてファジィ推論による行動制御を試みたが、膨大な状態数に対応したファジィ推論を記述することは容易ではなく、結果として良い行動制御をさせることはできなかった。

その解決方法のひとつとして、機械学習アルゴリズムである強化学習を取り入れた。しかしながら、一般的に強化学習は報酬を得るまでに長いエピソードを必要とし、学習が収束するまでに膨大な時間がかかる。実環境による試行錯誤は少ない方がよく、効率的な学習方法が望まれる。

そこで、本研究では強化学習における行動をファジィ推論により記述するファジィ行動選択強化学習を提案した。提案した手法に対してシミュレータを製作し、その有効性を検証した。また、実機実験における問題点や実験結果などについて述べる。そして、今年5月に新潟で開催されたRoboCupJapanOpen中型機リーグに出場した結果についても報告する。

2 RoboCup

RoboCupは、ロボット工学と人工知能の融合、発展の為に自律移動ロボットによるサッカーを題材として日本の研究者によって提案された競技である。「西暦2050年、人間のサッカーの世界チャンピョン・チームに勝てる自律型ロボットのチームを作る」という夢に向かって、人工知能やロボット工学などの研究を推進し、様々な分野の基礎技術として波及させることを目的とした新たなランドマーク・プロジェクトである。RoboCupにはサッカーシミュレータ上で競技を行うシミュレーションリーグと、実際に実機を使用し競技を行う小型機リーグ、中型機リーグ、四脚ロボットリーグ、ヒューマノイドリーグがある。

我々の対象としているのは中型機リーグであり、9m×5mのフィールドに、50cm×50cmのプレイヤー機4台を1チームとしている。競技中のロボットを人間が行動を操作することは許されておらず、各ロボットは完全に自律していなければならない。しかし、協調行動のためにロボット同士で通信することは許されている。また、自己位置同定のためにロボット以外の外部の視覚であるグローバルビジョンを使用することは出来ず、サッカーコートにある数少ない情報から算出しなければならない。ボールは赤色、ゴールは黄色、青色が使われており、ロボットに搭載したカメラにより物体を認識しやすいようになっている。

3 強化学習

強化学習とは、試行錯誤的な経験により、目標を達成するための学習制御の手法である。強化学習を使うことで

- 制御プログラミングの自動化、省力化
- ハンドコーディングよりも優れた解の獲得
- 自律性が必要な状況下での想定外の環境変化への対応

などが期待される。

強化学習を使用するにあたり、すでに提案されている手法の中から本論文で提案するファジィ行動選択強化学習に適した学習手法を選定する必要がある。

3.1 Q-Learning

Q-Learningは、TD学習（時間的差分学習）の発展形として提案されたものである（Watkins,1989)[1]。最も簡単な形式は、1ステップQ学習と呼ばれ、式(1)のように定義される。

$$Q(s_t,a_t) \leftarrow Q(s_t,a_t) + \alpha[r_t + \gamma \max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1},a_{t+1}) - Q(s_t,a_t)] \quad (1)$$

ここで、αは学習率であり、$0 \leq \alpha \leq 1$である。学習率は、過去の知識を受け継ぐ割合を表す。γは減衰係数で$0 \leq \gamma \leq 1$である。減衰係数は現在の行動が将

来にどの程度影響を及ぼすのかを決める。

強化学習における状態遷移は以下のようである。

1. エージェントはステップ t において環境の状態 (state) の表現 $s_t \in S$(S は状態の集合) を受け取る。
2. 状態に基づき行動 (action) $a_t \in A(s_t)$ を選択する。
3. エージェントの行動により環境は s_{t+1} へ状態遷移し、環境は状態遷移に応じた報酬 r_t をエージェントに与える。
4. 時刻を $t+1$ に進めて 1 へ戻る。

人間が報酬という形で間接的に達成させたいタスクを指示すれば、エージェントは達成への過程を試行錯誤により自動的に獲得する。

3.2 Profit Sharing 法

Q-Learning では報酬が得られた場合、1 エピソード中に 1 段階しか伝播しないので学習速度が非常に遅い。Profit Sharing 法 (PS 法) [2] は経験強化型学習であり、エピソードで使用された感覚入力と行動の組の履歴を一括して強化する学習方法である。報酬の流れを図 1 に示す。

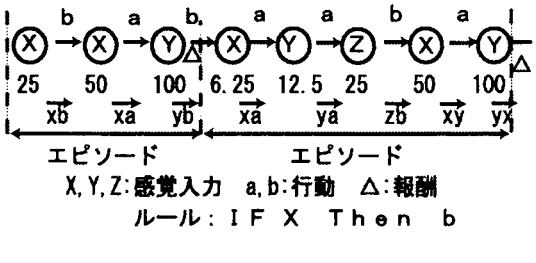


図 1: エピソードにおける報酬

状態 s で選択した行動 a の組をルール、報酬までの状態遷移により得られたルールのつながりをエピソードという。報酬は最新のルールから過去のルールに向かって等比減少関数により値を減らしながら与えられるので、学習の進行は比較的早い。また、PS 法の学習率を学習の進行とともに小さくすることにより、学習後期において Q-Learning となり最適性が期待できる。設定する問題によっては環境同定型か、経験強化型かの選択が重要となる。

3.3 インタラクティブ強化学習

インタラクティブ強化学習は人間が適応的に報酬と罰を与える強化学習法である [3]。Q-Learning や PS 法では一般的に報酬や罰はある状態に達したときのみ与えられるが、その状態に達しなくても行動の価値により人間がリアルタイムで報酬や罰を与えることが出来る。それにより、学習初期において報酬を与えることが出来、学習時間の短縮につながる。リアルタイムで行う学習なのでシミュレータにより学習環境を構築しなくても実機による学習を可能としている。

4 ファジィ行動選択強化学習

本研究で提案するファジィ行動選択強化学習は、従来の Q-Learning、PS 法、インタラクティブ強化学習における行動をファジィ推論により記述するものである。ファジィ推論に環境状態やタスクを入力として与え、報酬を得られやすい行動を取らせることを目的としている。以下に考えられる特徴を示す。

1. 学習初期における学習率の向上

人間の記述するファジィ推論は行動の基準を達成させたいタスクを基準に書かれているため、報酬とは別にファジィという形で間接的にタスクを指示している。異なる方法でタスクを指示することにより副報酬などを設定する必要がなく、特に学習初期における学習の効率化が期待できる。

2. 状態分割の簡略化

実環境を想定した学習は、シミュレータによる学習と比べると状態分割を細かく出来ない。センサにノイズが含まれている可能性が高く、正確な状態認識をさせることが出来ないからである。しかし、行動がファジィであれば状態分割を粗く設定しても行動を補間させることが可能となる。

3. 汎用性のある行動記述

従来の行動は一般的に前進や後退などを記述し、同じ行動で段階的に速さを変えるようにするとその段階分だけ行動数が増えてしまい、学習率向上の妨げになってしまう。ファジィ行動選択では強化学習によりファジィルールを評価するので、動作の強弱はすべて 1 つのルールのなかに記述することが出来る。

5 シミュレーション実験

提案する手法の有効性を検証するためにサッカーシミュレータによる実験を行った。将来的にはシミュレーション結果を実機に搭載する予定である。今回製作したシミュレータの機能は

- 記述したファジィルールの視覚的評価
- 実行中にルールの切り替え
- 学習結果を 1 ステップごとや設定したステップごとの評価
- 学習結果の保存、読み込み

であり、シミュレータ上には主にロボット、ゴール、ボール、壁が存在する。

5.1 仮想ロボットの環境

ロボットは独立 2 輪駆動を想定している。状態認識には全方位視覚センサによる情報のみとし、図 2 のように状態を分割した。ロボットにはシュート機構はついておらず、ドリブル機構によりボールを押すことでシュートとドリブルを実現している。

5.2 仮想ロボットの行動

簡略化ファジィ推論を使用し、以下の 4 種類の行動を構築した。

- ボールを追いかける
- ボールの周りをまわる (回り込み)

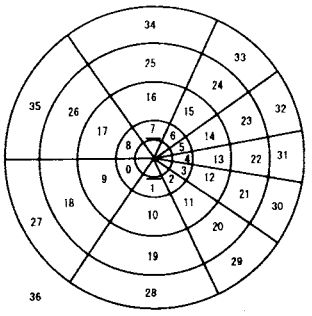


図 2: ロボットの状態分割

- ボールを捉えた状態でゴールに入れる (ドリブル)
- ゴールの方向を向き、前進する

入力情報はロボットから見た相対的なボールやゴールの角度や距離を使用している。制御出力は左右のモータの回転数であり、ルールは 2 つずつ記述している。

5.3 実験方法

タスク設定はボールをゴールに入れる事とし、達成すると報酬を与える。以下に示す学習手法を適用し、比較検討を行った。

- ファジィ行動を使用した Q-Learning による学習
- 10 状態前までの行動に対して報酬を与える学習
- 20 状態前までの行動に対して報酬を与える学習

それぞれに対して、パラメタを $\alpha = 0.5, 0.9$、$\gamma = 0.5, 0.9$ と変化させた。報酬を与えた後のボールとロボットの位置はランダムに配置している。

5.4 実験結果

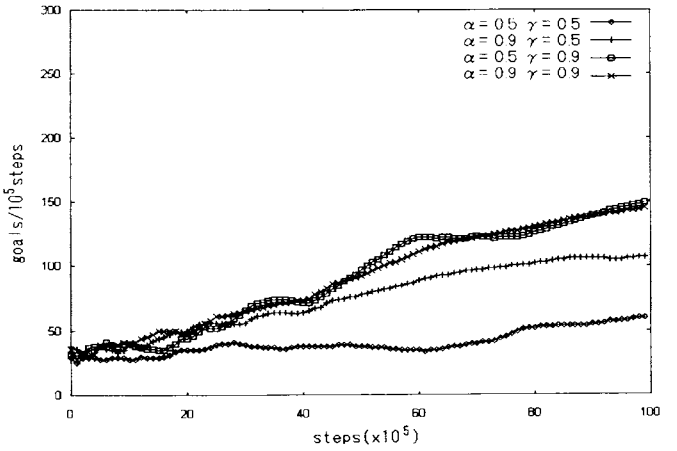
図 3 は、各強化学習の下でのファジィ行動選択の学習結果であり、10 万ステップごとのゴール回数をプロットしたものである。

図 3(a) のように、報酬を 1 つの行動のみしか与えない学習では学習初期のゴール回数が伸びていない。これはステップごとの報酬が伝播しにくいからである。しかし、従来の Q-Learning では報酬を得るまでに長いエピソードを必要とし、学習が進まないといったことがあるのに対し、提案する手法を適用すると確実にステップごとのゴール回数を伸ばしている。

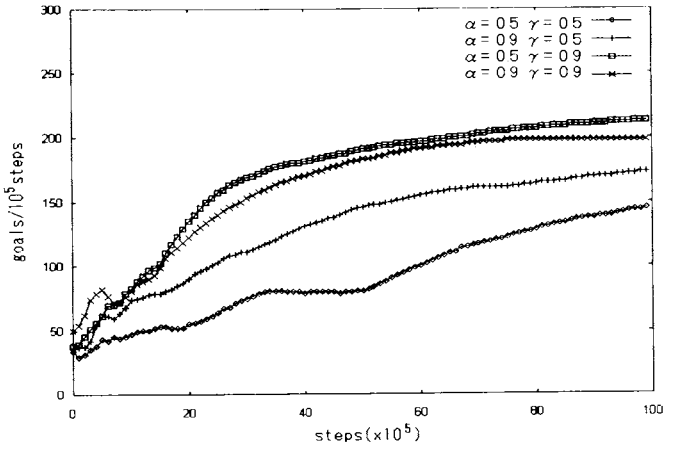
そして、図 3(b)、図 3(c) では、報酬を過去にも与えているため、学習初期のゴール回数が高い割合で伸びている。そして学習後期には学習の収束を見せている。これにより、同じステップ数で学習を収束させることのできる PS 法は有効な手段であることが分かる。しかし、図 3(a) では学習が収束していないため、ステップ数を重ねれば PS 法より優れた結果を得る可能性が有る。

6 実機実験

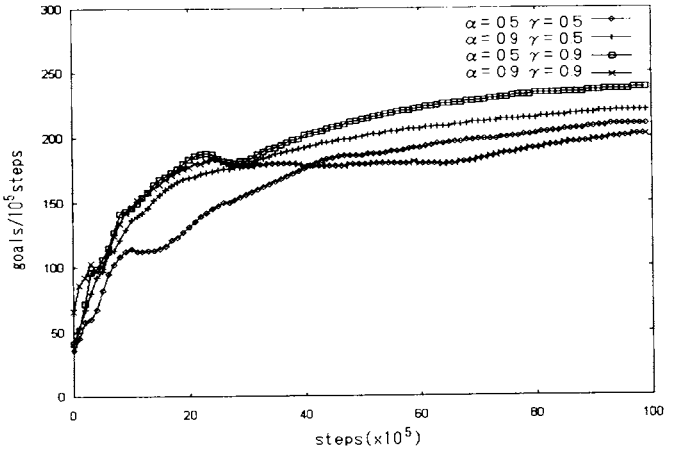
当初の目的ではシミュレータ実験において獲得された行動を実機に移植し、ファジィ推論を実機に適応するように調節して、モデル化誤差を少なくしようと考えていた。しかし、シミュレータ環境と実環境との違いを埋めるには不十分であった。たとえばシミュレー



(a): Q-Learning の下での学習結果



(b): PS 法の下での 10 状態前まで報酬を与えた場合の学習結果



(c): PS 法の下での 20 状態前まで報酬を与えた場合の学習結果

図 3: 各強化学習の下でのファジィ行動選択の学習結果

タ上でボールに対する回り込みのファジィ推論は適当に記述しても実現できるが、実環境ではタイヤと地面の摩擦、機体の慣性、取得できる画像の速度などを考慮しなくてはならず、作り込まれたシミュレータでなければ単純な移植は困難であることが分かった。また逆に、実機による試行で得られたファジィ推論はシミュレータ上では期待した動作を得られないことも分かった。そこで、これらの問題点を解決するために実機においてはインタラクティブ強化学習を使用した。

6.1 実機ロボットの行動

実験に使用したロボットは独立2輪駆動となっており、センサには全方位カメラと電磁コンパスを搭載している。全方位カメラからの情報を図2のように分割し、状態を認識させている。ロボットに学習信号を与えるために無線LANにより通信を行い、別に用意されたノートパソコンで報酬や罰、移動などの信号を送ることが出来る。他にドリブル・シュート機構が装備されている。

ロボットはあらかじめ予備実験により得た動作の確認されている4つの行動をとることが出来、以下に示す動作は簡略化ファジィ推論を使用し構築されている。

- ボールに右方向から回り込み
- ボールに左方向から回り込み
- ドリブル
- シュート＋前進

それぞれのルールを左右のモータについて記述した。学習アルゴリズムにはPS法を使用し、行動選択は95%の確率でQ値が最大のものを選ばせるようにした。実験環境は新潟で開催されたRoboCupJapanOpen中型機リーグの会場である。

6.2 実験結果

6.2.1 行動の学習

・学習初期

ボールの周りでのランダムな行動をし、ボールへのアプローチもゴールとは関係のない方向にはじくなどの行動が目立った。

・学習中期

ゴールを意識した行動をとらせることが出来、ゴールに向かってドリブルをさせることが出来た。しかし、ドリブル時のゴールへの方向修正が十分出来ていない。

・学習後期

ややゴールの正面へ大きく回りこむが、ボールをゴールの正面からドリブルさせることが出来た。学習終了までに要した時間は2時間程度である。

我々はRoboCupJapanOpenにおいて、以下の4チームと対戦した。

6.2.2 試合結果

対 Orient 戦、対 Trackies 戦

試合は実験環境とは違い、ボールが常に見えているとは限らず、常に動的に変化している。その状態において得点を挙げるのは難しく、それぞれ0対3、0対2で敗退した。

対 MuratecFC 戦

前回、前々回と得点を入れることが出来なかったので、ボールとゴールの相対角が30°以内ならドリブルをさせるような行動を追加して挑んだ。結果は0対12と惨敗した。原因はボールを挟んでの押し合うようになったがボールをフォローさせる行動が十分ではなかったからであると考えられる。

対 FH.Musashi 戦

前述の行動でドリブル時の制御出力を上げてボールをなるべく相手ゴールに持っていくように改良した。前半は0対1でリードされたが、後半3点を入れることが出来た。しかし結果は3対4で敗退した。

7 おわりに

本研究ではファジィ行動選択強化学習を提案し、RoboCup中型機を対象としたシミュレーション、実機実験を行い有効性を検証した。ファジィ行動を使用することにより学習初期においてボールへのアプローチを可能とし、効率の良い学習を行うことが出来た。そして、RoboCup中型機リーグで初めて得点を入れることが出来た。しかし、当初予定していたシミュレータを使うことが出来ず、また純粋にファジィ行動選択強化学習のみを使用して得点を入れたわけではなく、多くの問題があることが分かった。

最後に、今回の実機実験における問題点を述べる。RoboCupではマルチエージェントによる協調行動がテーマとして上げられているが、実験環境の構築、複数台のロボットの構築、操作などの問題があり、実機による実験は物理的な限界がある。そして、今回はボールとゴールの状態を入力情報としているが、ここに敵の状態や味方の状態を考慮すると、状態数が膨大になってしまい、今回のように数時間では学習が終了しない可能性がある。このような問題から、シミュレータによる学習環境の構築が必要不可欠であると考える。

今後の課題はハードウェアを改良し、パラメタ設定の容易なロボットシステムの構築、物理的制約を加えたシミュレーション環境の構築などが挙げられる。

8 参考文献

[1] S.Sutton and G.Barto：強化学習, 森北出版, 2000

[2] 宮崎和光, 木村元, 小林重信 : Profit Sharing に基づく強化学習の理論と応用, 人工知能学会誌 Vol.14, pp.800-807, 1999

[3] 北山功 ： インタラクティブ強化学習によるサッカーロボットの行動獲得, 大阪電気通信大学 修士論文, 2002

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

動的マルチエージェント環境におけるオンライン学習
Online learning in a dynamic multi-agent environment

有働 昌代 Masayo Udo
中島 智晴 Tomoharu Nakashima
石渕 久生 Hisao Ishibuchi

大阪府立大学 大学院工学研究科
Department of Industrial Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract: In this paper, we propose a reinforcement learning method based on fuzzy Q-learning where an agent determines its action using fuzzy inference. We apply the proposed method to an autonomous agent that learns to intercept a passed ball in a RoboCup Soccer Simulation environment. In the proposed method, the state space is represented by internal information of the learning agent such as the relative velocity and the relative position of the ball to the learning agent. We divide the state space into a number of fuzzy subspaces, each of which is specified by fuzzy partitions of each axis of the state space. It is shown through computational experiments that the learning agent finally obtains an efficient positioning skill in a trial-and-error manner.

1 はじめに

強化学習[1]は，自律エージェントの最適な行動獲得の手法として，ますます重要な研究分野になりつつある．最も有名な強化学習の１つに Q 学習がある．連続した状態空間や行動空間を Q 学習において扱うために，ニューラルネットワークやタイルコーディングなどを用いた拡張が提案されている．

本論文では，連続した状態空間と行動空間を扱うファジィ Q 学習を提案する．提案手法において，Q 値は，与えられた環境からファジィ推論を用いて計算される．提案手法をパスされたボールのインターセプトを学習するエージェントに適用する．エージェントは他のエージェントがパスしたボールを捕らえようとする．この手法において，状態空間はエージェントとボールとの相対速度や相対位置といったエージェントが持つ内部情報によって表される．ファジィ分割された状態空間において，各ファジィ部分空間がファジィ状態として取り扱われる．エージェントはファジィ推論により算出された Q 値に応じて次の行動を決定し，うまくインターセプトできたときに報酬を得る．数値実験の結果から，エージェントがうまくインターセプトするスキルを学習することを示す．

2 ボールインターセプト問題

本論文で扱う問題は，ボールインターセプト問題と呼ばれ，RoboCup Soccer Server をテストベットとしている．これを図１に示す．この問題において，インターセプトを行うエージェントは，体の向きに対して前後ろにのみ動くことができるので，インターセプトを行うときの決定的な意思決定は，turn を行うか dash を行うかである．turn を行うと，エージェントは行きたい方向へ正確に向くことができるが，速度を落とすことになる．また，turn と dash は同時に行うことはできないので，turn を繰り返すことは，インターセプトするための時間を浪費することになる．この問題の目的は，turn と dash のどちらを行うかをうまく決め，ボールをインターセプトするまでの時間を最小化することである．

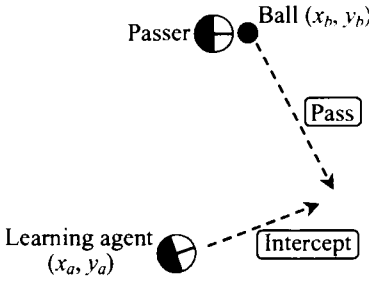


図１． ボールインターセプト

3 ファジィ Q 学習

ファジィ Q 学習をボールインターセプト問題に適用するために，本論文では以下の形式のファジィ If-Then ルールを用いる．

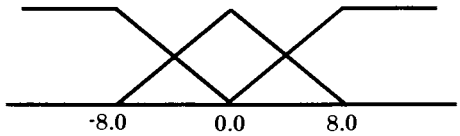
$$R_j: \text{If } x_r \text{ is } A_{j1} \text{ and } y_r \text{ is } A_{j2} \text{ and } v_{rx} \text{ is } A_{j3} \text{ and } v_{ry} \text{ is } A_{j4} \text{ then } \textit{turn} \text{ with } w_{j1} \text{ and } \textit{dash} \text{ with } w_{j2}, \quad j=1,\ldots,N \quad (1)$$

ここで，(x_r, y_r) と (v_{rx}, v_{ry}) はそれぞれ学習エージェントに対するボールの相対位置と相対速度である．また，w_{j1}, w_{j2} はそれぞれ *turn* と *dash* に対する重みである．従って，以下の等式が成立する．

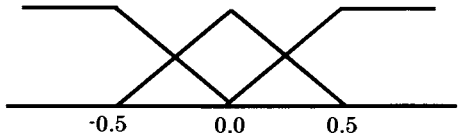
$$x_r = x_b - x_a, \quad y_r = y_b - y_a \quad (2)$$

$$v_{rx} = v_{bx} - v_{ax}, \quad v_{ry} = v_{by} - v_{ay} \quad (3)$$

各々の状態変数に対して，本実験では図 2 に示す三角型ファジィ分割を用いる．４個の状態変数が３分割されるので，ファジィルールの数は $N = 3^4 = 81$ 個となる．



(a) Fuzzy partition for x_r and y_r



(b) Fuzzy partition for v_{rx} and v_{ry}

図 2. ファジィ分割

学習エージェントは状態ベクトル $\mathbf{s}=(x_r, y_r, v_{rx}, v_{ry})$ を観測後, 以下のようなファジィ推論手法を用いることによって各行動（*turn*, *dash*）の支持度を計算する.

$$W_k = \frac{\sum_{j=1}^{81} w_{jk} \cdot \mu_j(\mathbf{s})}{\sum_{j=1}^{81} \mu_j}, \quad k = 1,2 \qquad (4)$$

$\mu_j(\mathbf{s})$ はファジィ If-Then ルール R_j と状態ベクトル $\mathbf{s}$ との適合度であり，以下の積演算により定義される.

$$\mu_j(\mathbf{s}) = \mu_{j1}(x_r) \cdot \mu_{j2}(y_r) \cdot \mu_{j3}(x_{rx}) \cdot \mu_{j4}(x_{ry}) \qquad (5)$$

ここで，$\mu_{jk}(\cdot)$ は前件部ファジィ集合 A_{ji} におけるメンバシップ関数である.

最終的な行動の決定は，W_k の大きさに応じたルーレット選択により決められる.

エージェントがボールをうまくインターセプトできたとき，結論部重みベクトル w_{j1}, w_{j2} は以下の等式によって更新される.

$$w_{jk}^{new} = (1-\alpha'_{jk}) \cdot w_{jk}^{old} + \cdot \alpha'_{jk} \cdot (r + \gamma \cdot W_k), k = 1,2 \qquad (6)$$

ここで，γ は割引率，r は学習エージェントに対する報酬，α'_{jk} は学習率であり以下の等式に従って決められる.

$$\alpha'_{jk} = \alpha \cdot \frac{\mu_j(\mathbf{s})}{\sum_{l=1}^{81} \mu_l(\mathbf{s})} \cdot \frac{W_k}{\sum_{m=1}^{2} W_m} \qquad (7)$$

ここで，α は報酬を表す.

4 数値実験

RoboCup Soccer Server ver.9.2.0 をテストベットとし，数値実験を行った. 学習エージェントがボールをインターセプトできた瞬間，もしくは，最大タイムステップ数に達したときに 1 回の試行を終了する. 各パラメータの値は，学習率 $\alpha = 0.9$，割引率 $\gamma = 0.9$，報酬 $r = 5$，最大タイムステップ $t_{\max} = 250$ とした.

図 3 は, 学習回数 330 回に対する成功回数におけるヒストグラムである. 図における "The early stage", "The middle stage", "The final stage" は，それぞれ学習回数 0～110, 111～220, 221～330 の学習結果を表している. 横軸はサイクル数（時間）を示し，縦軸はそのサイクル数の間に成功した回数を示す. 図より，学習が進むにつれ, より短い時間でボールをインターセプトできるようになることがわかる.

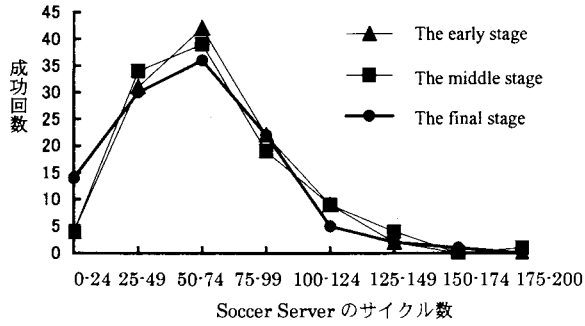


図 3. 成功回数におけるヒストグラム

図 4 は試行中における学習エージェントとボールの軌跡を示す.

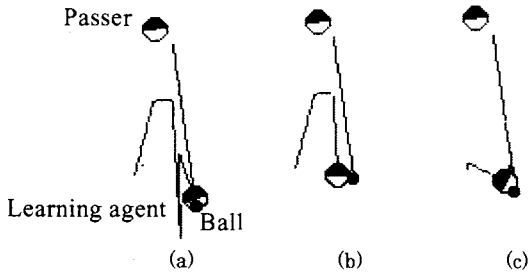


図 4. 学習エージェントとボールの軌跡 ((a)The early stage, (b)The middle stage, (c)The final stage)

5 結論

本論文では, 連続した状態空間と行動空間を扱うファジィ Q 学習を提案した. 数値実験では，提案手法をボールインターセプト問題に適用した. 学習を行うにつれてエージェントがより短い時間でボールをインターセプトできることを示した.

参考文献

[1] R.S.Sutton and A.G.Barto, Reinforcement Learning: An Introduction, MIT Press, 1998.

連絡先：〒599-8531
大阪府堺市学園町 1 － 1
大阪府立大学 工学部 経営工学科 中島智晴
TEL：072-254-9351 FAX：072-254-9915
E-mail：nakashi@ie.osakafu-u.ac.jp

段階的な視界をもつマルチエージェントにおける強化学習について(その2)

—方向による視界の変化について—

Reinforcement Learning of Multi-Agents by a Staged View in Distance and Direction(2)

—Change of View by Angle —

山村 忠義 Tadayoshi Yamamura　馬野 元秀 Motohide Umano　宇野 裕之 Yushi Uno　瀬田 和久 Kazuhisa Seta　岡田 真 Makoto Okada

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科

Department of Mathematics and Information Sciences

College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

Abstract In the previous research, we used a staged view in distance and direction where an agent receives accurate information in neighborhood but only rough information in near and middle-distance areas. We showed by numerical experiment for a pursuit game, a multi-agent's benchmark problem, that the agent using Q-learning learns effectively in such a situation. In this research, we improve a view by changing how to measure relative distance of other agents by relative coordinates and angles to approach an actual situation. As a result, we show by numerical experiment that the agent learns more realistic and more effectively.

1. はじめに

従来のマルチエージェント研究では、各エージェントが情報を獲得できる範囲の広さ(視界)は一定で、視界内では環境に対する正確な情報が得られるが、視界外では情報がまったく得られないという設定であった。

前の研究で、距離と方向に応じて見え方が変わり、段階的に大雑把な情報しか得られない視覚をもつエージェントでも、効果的な学習が行われることを示した [1]. この報告では、"方向" について更に考察した。

2. 環境とエージェントの設定

2.1 追跡問題

2次元格子上に4つの青エージェントと1つの赤エージェントがいて、各エージェントは、この格子上を縦横方向に一度に1マスずつ移動するか、その場に留まる。青エージェントの目標は図1のように赤エージェントを四方から取り囲むことである [2].

2.2 エージェントの設定

青エージェントは自分から見て前方180°しか見えておらず、対象物との距離と角度によって "見え方" が変わるので、得られる情報が異なる。

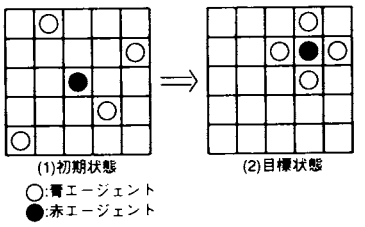


図 1: 追跡問題

(1) 基本的なエージェントの設定

(a) 距離情報

青エージェントは自分のいる場所を原点とし、横方向を x 軸、前方向を y 軸とした相対座標をもつ。これを用いた相対距離 d を

$$d = |x| + |y|$$

とする (単位は "マス" を用いる) [1]. そして、距離を考慮した "見え方" を以下のとおりとする。

- 近傍 (距離が1〜4マス) : 各エージェントの識別 (赤, 青1, 青2, 青3, 青4) ができ、相手エージェントとの距離 d (1〜4) と座標 (x, y) と角度 θ ($-90°$〜$+90°$) が明確に分かる。
- 近距離 (5〜8マス): エージェントの色 (赤, 青)

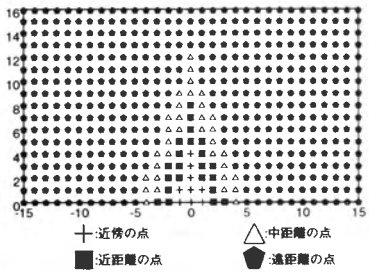


図 2: 段階的視覚 (1)

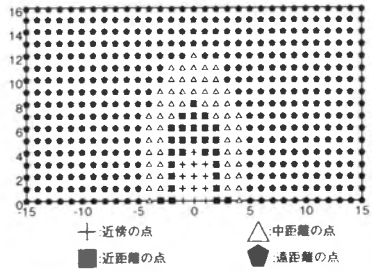


図 3: 段階的視覚 (2)

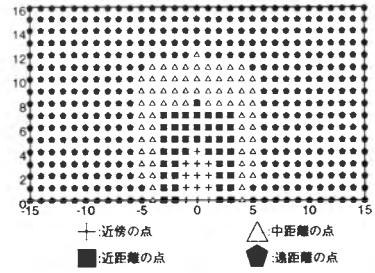


図 4: 段階的視覚 (3)

表 1: 各視覚の角度パラメータごとの近傍の状態数

各段階的視覚	角度パラメータ						
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
(1)	24	14	12	8	8	6	4
(2)	22	18	14	12	12	10	10
(3)	24	18	18	12	12	12	12

は分かるが個体の識別はできない。また相手エージェントとの距離は大雑把に近距離であることしか分からず、方向は {左, 左前, 前, 右前, 右} のいずれかであることが分かる。

- 中距離 (9 マス～12 マス)：エージェントの存在、相手エージェントとの距離は大雑把に中距離であることと方向が {左, 左前, 前, 右前, 右} のいずれかであることが分かる。
- 遠距離 (13 マス以上)：見えない。また、盤面の端も見えないとした。

(b) 角度情報

青エージェントは方向により見え方が異なる。相対距離 d の計算の x に角度パラメータ k の重みをつけることで水平方向を長くみせかけている。角度による "見え方" の差を考慮した相対距離 d は次の式のようになる。

$$d = k \cdot |x| + |y|$$

これを段階的視覚 (1) と呼び、$k = 2.5$ の例を図 2 に示す。

(2) エージェントの設定の改良

段階的視覚 (1) による角度パラメータ k のみでは、前方の左右がよく見えないのに比べて、横方向が見えすぎていて現実的ではない。また、k の値が大きくなるほど、視界が前方向一直線になってしまう。

(a) 角度情報の改良

エージェントから見た方向の角度 θ ($-90°$ ～ $+90°$) を用いて、"見え方" を考慮した相対座標 d の式を次のように定義する。

$$d = k \cdot |\sin\theta| \cdot |x| + |y| \quad (-90° \leq \theta \leq +90°)$$

ここで、θ は前方が 0° で、左側が $-90°$、右側が $+90°$ である。これを段階的視覚 (2) と呼び、このときの "見え方" は $k = 2.5$ のとき図 3 のようになり、段階的視覚 (1) のときよりも "見え方" は自然で、前方の左右が見えにくいという問題がある程度、解消されている。

(b) 距離情報の改良

角度は段階的視覚 (2) を用いて、距離にユークリッド距離を用いる。"見え方" を考慮した相対座標 d の式は次のようになる。

$$d = \sqrt{(k \cdot |\sin\theta| \cdot |x|)^2 + y^2} \quad (-90° \leq \theta \leq +90°)$$

これを段階的視覚 (3) と呼び、$k = 2.5$ のとき "見え方" は図 4 となる。このとき段階的視覚 (2) よりも更に前方の左右の視界が広がり、横方向の視界が若干狭くなっている。この変更で、より自然に近いエージェント視覚に近づいた。

2.3 エージェントの学習

本研究では、赤エージェントはランダムに行動し、青エージェントは独立して学習を行うが、学習アルゴリズムとして Q-learning[3] を基にした方法を用いる。Q-learning は、与えられる報酬に基づいて、各状態と行動の組で記述されるルールに対する評価値 (Q 値) を学習する。

ルールは基本的には赤エージェントの状態についてのみ考慮しているので、状態は $x_t = (d, \theta)$ = (赤エージェントとの距離, 赤エージェントとの角度又は方向) で、行動は a_t = {前, 後, 左, 右, 止} となる。

すべての状態 x_t と行動 a_t の組合わせに対する Q 値を入れた Q テーブルの大きさ (ルール数) は、次のとおりである。近傍では、視覚の角度パラメータを変えたときの状態数は表 1 のようになり、また、それぞれの状態に対して行動 a_t が 5 つあるので、ルール数は (各状態数) × 5 となる。近距離では、状態 x_t の組合わせの数が 5、行動 a_t の数が 5 であるから、25 となる。

中距離では赤エージェントか青エージェントかの区別がつかない。したがって、中距離のときは近傍や近距離とは異なった処理が必要になる。そこで、中距離については、次の 2 種類の方法を考えた [1].

(a) 赤エージェントをランダムに選択

見えているエージェントのどれか1つを、ランダムに赤エージェントと見なす。「(中距離, 方向) → 行動」というルールを用いており、ルール数は25となる。

(b) 方向別個数

エージェントの個数を自分から見た方向別に分類する方法で、{左, 左前, 前, 右前, 右} の5方向とする。状態の数は x_t の0〜4の個数を5方向に振り分ける場合の数で125で行動 a_t の数が5より、ルール数は625となる。

2.4 エージェントの行動

エージェントの行動は現在の視覚情報を基にして、状態に適合する複数のルールをQテーブルから取り出し、その中からQ値が最大であるルールを選択し、実行する。ただし、Q値が最大のものが複数あるときは，その中からランダムに選択する。

3. 実験

15 × 15の2次元格子上に各エージェントをランダムに配置する。試行回数は1ゲームにつき500ターンで、500ターンを超えると青エージェントは赤エージェントを見逃したものとし、報酬は獲得できず、Q値はそのままの状態で次のゲームに進む。10000回のゲームを1セットとする。

3種類の視覚をもつエージェントの中距離ルール2種類についての比較実験を行い、角度パラメータ k による学習への影響について調べた。まず、1セット10000ゲームのうち9000ゲーム以降のゴールまでのターン数の最小値、最大値、平均値とその標準偏差の10セット分の平均値を表2に示す。これは、学習がほぼ収束した状態での性能と考えることができる。この値が小さい程、性能がよく、早くゴールに辿りつくという意味になる。このとき、各パラメータの値はゴール報酬=1とし、Q-learningにおけるパラメータは、学習率 α=0.001、割引率 γ=0.9、Q値の初期値=0.1とした。

次に図5〜7に中距離ルールがランダムの場合に対する、視覚ごとの k に対する100ゲームごとの平均ゴール回数を示し、図8に各視覚と2種類の中距離ルールに対するターン数が最小となる k の値(図中に記述)における100ゲームごとの平均ゴール回数を示した。ただし、ゲームの中盤以降、学習進度に大きな変化が見られないことから、3000ゲーム以降のグラフは省略している。

また、図9に各視覚と中距離ルールがランダムになる場合の9000ゲーム以降のゴールまでの平均ターン数の k による変化を示した。このとき、縦軸は100ターン〜200ターンとの間を拡大してとり出してあるので注意されたい。

表2: k による各視覚と中距離ルールでの9000ゲーム以降の平均ターン数の比較

	段階的視覚 (1)				
	k	min	max	平均	標準偏差
(a) ランダム	1.0	126.90	154.07	138.56	8.02
	1.5	117.34	135.46	125.96	6.10
	2.0	123.62	134.25	128.83	3.30
	2.5	109.80	135.91	122.32	8.94
	3.0	117.87	135.22	126.34	5.85
	3.5	104.21	124.17	111.16	5.68
	4.0	106.85	142.86	123.64	12.6
(b) 方向別	1.0	115.49	128.48	122.05	4.11
	1.5	109.28	117.14	113.62	2.45
	2.0	112.69	125.98	118.29	4.69
	2.5	110.15	127.24	119.57	5.59
	3.0	119.42	133.56	126.48	3.75
	3.5	107.83	147.82	120.11	12.3
	4.0	113.28	131.49	123.32	6.75

	段階的視覚 (2)				
	k	min	max	平均	標準偏差
(a) ランダム	1.0	127.94	160.96	146.24	11.14
	1.5	111.82	134.69	124.51	6.71
	2.0	109.83	126.96	119.30	4.96
	2.5	114.13	125.04	119.97	4.27
	3.0	114.52	140.68	128.36	6.90
	3.5	117.80	146.95	132.97	8.12
	4.0	143.06	177.80	154.52	9.66
(b) 方向別	1.0	125.08	139.49	131.36	4.62
	1.5	109.74	120.48	115.75	3.65
	2.0	108.07	119.56	112.80	4.21
	2.5	102.00	114.72	107.80	3.13
	3.0	106.27	118.24	113.07	3.80
	3.5	111.64	119.41	115.78	2.91
	4.0	110.91	126.65	118.54	4.07

	段階的視覚 (3)				
	k	min	max	平均	標準偏差
(a) ランダム	1.0	134.74	165.11	152.10	10.2
	1.5	120.33	149.33	133.03	8.71
	2.0	117.21	134.51	124.33	5.83
	2.5	107.52	121.41	111.70	4.34
	3.0	107.55	128.38	116.51	6.32
	3.5	126.63	154.12	134.08	7.85
	4.0	124.74	148.35	132.62	7.36
(b) 方向別	1.0	130.83	150.28	140.17	5.83
	1.5	111.84	124.43	117.71	3.71
	2.0	111.47	121.87	116.23	2.96
	2.5	98.06	121.91	107.81	7.74
	3.0	95.17	110.21	104.44	5.07
	3.5	99.25	117.17	108.06	4.66
	4.0	102.47	119.27	110.22	5.05

・結果と考察

表2より、視覚は、どちらの中距離ルールを用いても、段階的視覚(3)の性能が一番良く、(2)、(1)の順となる。これは、視界の前方左右方向の広がりの差に依存しているものと考えられる。また、図5〜7よりどの視覚を用いても、k が小さいほど良い結果が得られる。これは、k が小さいほど視界が広くなり、観測情報が多くなるからである。

図8より、段階的視覚(1)では、(a) ランダムが k = 3.5、(b) 方向別は k = 1.5のとき、学習後の性能が良くなり、(2)では (a) が k = 2.0、(b) は k = 2.5のとき、(3)では (a) が k = 2.5、(b) は k = 3.0のときに学習後

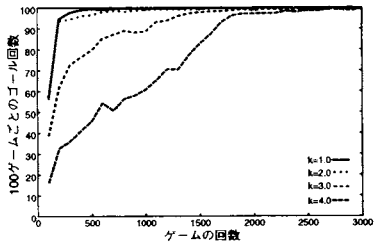


図 5: 段階的視覚 (1) で k に対する 100 ゲームごとの平均ゴール回数

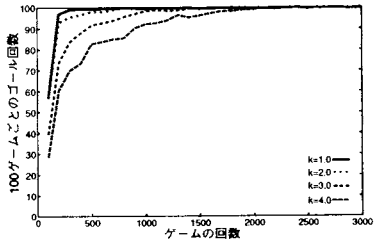


図 6: 段階的視覚 (2) で k に対する 100 ゲームごとの平均ゴール回数

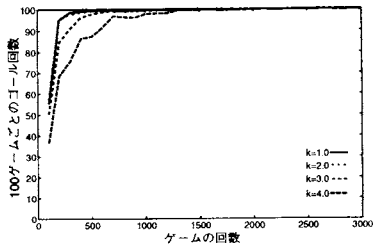


図 7: 段階的視覚 (3) で k に対する 100 ゲームごとの平均ゴール回数

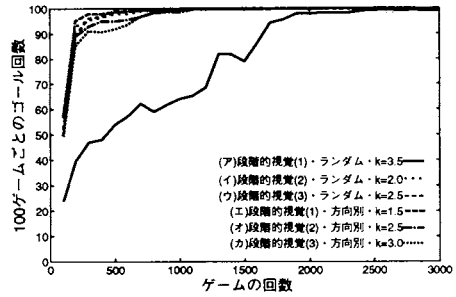


図 8: 各視覚と中距離ルールに対するターン数が最小となる k における 100 ゲームごとの平均ゴール回数

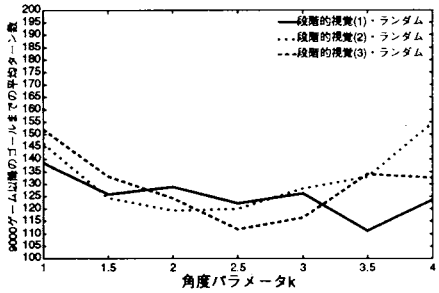


図 9: 各視覚と中距離ルールでの 9000 ゲーム以降の平均ターン数

の性能が良くなった。

次に、中距離ルール別に考えると、図 8 より (a) は (1) については、序盤の学習の進み方がさほど早くはないが、図 9 よりどの視覚でも k を中くらいにとるとき、学習後の性能が良くなる。(b) は段階的視覚が改良されて視界が広くなるにつれ、k の値がある程度大きいと学習後の性能が良くなる。これは、(1) では k が大きくなると極端に視界が狭くなって観測情報が入りにくくなるからであり、改良された段階的視覚が (2)、(3) となると、k が大きくなり状態数が減っても (1) とは異なり、一定の視界が維持され、必要な観測情報が得られるからであると考えられる。

さらに、序盤の学習のみを考えると k を小さくしたときが、学習後の性能としては k を中くらいの値が良い。これは、学習の序盤はできるだけ多くの詳しい観測情報を集める方が問題解決に対して効果的なルールを得るのに有利であるが、終盤は状態数が多いことから、Q テーブルの更新が進みにくく、学習が進みにくいと考えられる。逆に k が大きいときは状態数が少なすぎるために、必要な観測情報が得にくくなり、学習が進みにくい。この結果、状態数が多くなりすぎない、k の値が程度の視界をもつ中ぐらいの視界の方が学習後の性能が良い。これは、視界が狭くなり、状態数が少なくなっても適切な角度パラメータの設定をすれば、効果的な学習が可能であることを示している。ただし、学習全体の性能と中盤の学習の性能については、さらなる検討が必要である。

4. まとめ

マルチエージェント環境下の強化学習について、人間のものに近い視覚について考えた。これは、距離が遠く、左右方向にあるほど観測情報の大雑把さが段階的に増すようになっている。本研究では、特にこの "左右方向" について注目し、新たな視覚を導入した。これらを用いたシミュレーションにより、段階的な視覚をもとにした大雑把な情報でも、効率的な学習が可能であることを示した。

今後の課題としては、距離、角度などをより現実的に実数値として取り扱うこと、状況に応じた学習を行うために角度パラメータや中距離ルールの動的な切り替えなどがある。

参考文献

[1] 山村, 馬野, 瀬田, 岡田: "段階的な視界をもつマルチエージェントにおける強化学習について," 第 18 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.73-76 (2002)

[2] M. Benda, V. Jagannathan and R. Dodhiawalla: "On Optimal Cooperation of Kowledge Sources," *Technical Report BCS-G2010-28*, Boeing AI Center (1985)

[3] C. J. C. Watkins and P. Dayan: "Q-learning," *Machine Learning*, Vol.8, pp.279–292 (1992)

[問い合わせ先]
〒599–8531 堺市学園町 1 – 1
大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
山村 忠義
TEL: 072–254–9675
FAX: 072–254–9930
Internet: yamamura@jazz.cias.osakafu-u.ac.jp

マルチエージェント技術のセルオートマトンモデルへの応用

－ 交通システムにおける渋滞状況緩和への適応 －

Cellular Automata Model Based on Multi-Agent Techniques

- Application to Congestion Control in Traffic Systems -

山口　大輔　　○ヤッサー　ハッサン　　田崎　栄一郎
Daisuke Yamaguchi　　Yasser Hassan　　Eiichiro Tazaki
桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科
Department of Control & Systems Engineering, Toin University of Yokohama

Abstract: This paper describes the modeling language for modular design of interacting hybrid systems in which we will build a new model of cellular automata based on the multi-agent technology. Problems approached by multi-agent systems are typically complex, and it is usually difficult to know at system design stage what each agent's role is and how the agents should interact to get optimal performance out of the group. We are interested in coordinating the local behavior of individual agents to provide an appropriate system-level behavior.

1 はじめに

人工知能分野の研究では、より効率良く結果得る方法として、様々な手法を組み合わせたシステムの研究開発を行っている。それらのシステムでは、異なる視点をもつ手法の組み合せによって、創発挙動の再現をし、高効率を上げている例も少なくない[1][2]。

本研究では、マルチエージェント技術とセルオートマトン技術を組み合せ、その創発挙動が再現可能であると考える。実際には、交通システム[3][4]に適応し、その有効性を検証した。

2 マルチエージェントとセルオートマトン

本論文では、マルチエージェントとセルオートマトンを以下のように定義する。

エージェントは、環境からの知覚と通信によって情報収集機能を備えたシステムを核として構成するモデルとする[5]。

その上で構造モデルには、デカルト座標{(i、j)、i=1, 2, ・・・Mおよびj=1, 2, ・・・Nで、セルx(i、j)}、(各セルは全体のエージェントと見なされます)のMxNの長方形の配列から生成する。それら１つのセルがエージェントとして配置されることによって柔軟に利用可能となるマルチエージェントになる。

そのため各エージェントは同じか異なる内部ルールを持ち、エージェント内部の状態によって学習を行なう。この中でセルのオートマトン[7]の非同一の場合だけを考慮、与えられた瞬間で、1つのルールだけがエージェントにとって活性化される。

その状態をセルのデータとして再度見た際に、ラングトン・ループ[7]を用いた複製を行い、セル全体の活性化を行なった。

3 学習エンジン

エージェントが使用する学習ルールは、遺伝的プログラミング[6]を用いた。

エージェント内部ルールは、木構造に変換された状態で保持、エージェント内部の各木がルールとして１つの機能を表す。

今回の学習ルールでは、各機能に１本の木を適応し、別の木構造が不変で、結果的には親から木構造を直接複製する状態で構造自体が変わらなく、内部機能だけを変化させる。

次のようなアルゴリズムとなり、エージェントの動作学習機能に用いた。

Step1:内部ルール全てを木に変換
Step2:各ルール上に突然変異を実行
Step3:ルール同士に対して交差を実行

Step4:その結果、主となる木構造に変換

4 交通システムへの応用

130×120 の長方形の配列セルのにおけるセルオートマトンをマップとし、そのデータを車とした交通システムにおける交通量の最適化を行なった。

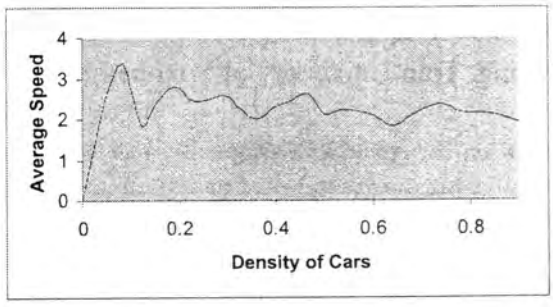


Figure 1: The relation of total average speed and density of cars.

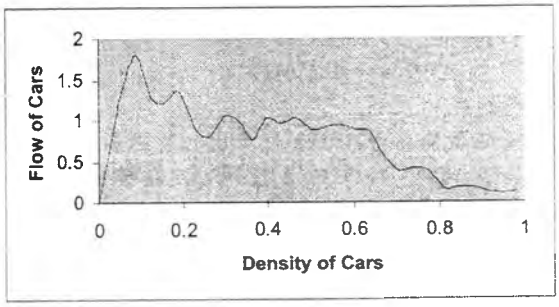


Figure 2: The varying of flow with the modification of density of cars.

その結果、車の移動速度及び車間距離と移動車台数の最適化の確認が出来た。

5 まとめ

今回車となるエージェントの交差点での動作を GP による学習を行い、長方形の配列セルの最適化によって、交通量の最適化と言う観点からのみの実験を行なった。

これには、エージェント個々に目的地の設定があり動作を学習させたわけではない。道路の混雑状緩和のみをルールとしたセルの最適化に留まっている。そのため、その他目的地到達までに関連する条件が加わった場合などの更なる実験を行ない、実社会システムとの関連を深めていく。

参考文献

[1] Abul, O., Polat, F., and Alhajj, R.: Multiagent Reinforcement Learning Using Function Approximation, IEEE Transaction on systems, man, and cybernetics-part c, application and reviews, Vol. 30, No. 4, pp. 485-497 (2000)

[2] Y. Hassan, and E. Tazaki,: Adaptive Behavior in Cellular Automata using Rough Set Theory, Applied Artificial Intelligence Journal, Vol. 17, No. 2, pp. 1-21, (2003)

[3] Chopard, B., Luthi, P., Queloz, P. : Cellular automata model of car traffic in a two-dimensional street network, Physica A, vol. 29, No. 10: pp 2325-2336 (1996)

[4] Gu, G. Chung, K. and Hui, P.: Two-Dimensional Traffic Flow Problems in Inhomogeneous Lattices, Physica A 217, pp. 339-347 (1995)

[5] Khosla, R., and Dillon, T.: Engineering Intelligent Hybrid Multi-Agent Systems, Kluwer Academic Publishers (1997)

[6] Koza, J.R.: Genetic Programming III Darwinian Invention and Problem Solving, San Francisco, CA, (1999)

[7] Sipper, M.,: Studying Artificial Life Using a Simple, General Cellular Model, Artificial Life Journal, vol. 2, No. 1: pp 1-35 (1995)

[問い合わせ先]
〒225-8502 神奈川県横浜市青葉区鉄町 1614
桐蔭横浜大学 工学部 制御システム工学科
田崎 栄一郎
TEL:045-974-5070 FAX:045-978-1311
E−mail:tazaki@intlab.toin.ac.jp

マルチエージェント技術による時系列データ特徴抽出の順位付け

Ranking of Characteristic Properties Extracted from Time Series Data using Multi-Agent Techniques

○山口　大輔[1]　　ケネス J. マッキン[2]　　田崎　栄一郎[1]
Daisuke Yamaguchi　　Kenneth J. Mackin　　Eiichiro Tazaki
[1] 桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科
Department of Control & Systems Engineering, Toin University of Yokohama
[2] 東京情報大学総合情報学部情報システム学科
Department of Information Systems, Tokyo University of Information Sciences

Abstract : In order to retrieve useful information from large time sequence data, agent technology is often used for the data analysis. Due to the autonomous characteristics of agent technology, it is possible not only to search for optimum solutions, but agent technology can withdraw information hidden in various data. For this research, each agent extracts features or characteristics from the time sequence data individually. Using multiagent technology, different solution extraction methodologies were compared and ranked. An experimental system was applied to verify the validity of the proposed method.

1 はじめに

膨大な連続データから、様々な情報を取得し、そのデータ解析にはエージェント技術が用いられていることが多い[1]。エージェント技術の自律性は、最良解決法の検索だけではなく、様々なデータに隠れた情報を引き出すことも可能である。

本研究では、マルチエージェント技術を用いて、単体のエージェントそれぞれが引き出した時系列データから特徴抽出を行い、複数の問題解決手法を順位付けする事が可能であると考え、その有効性を検証した。

2 エージェント

エージェントは、本来与えられた仕事をこなす「代理人」を意味する。本研究では、動的な環境の中に置かれた計算機システムで、自律的に環境を知覚して行動することで、自分に与えられたゴールを達成するものである[2]。

前述のエージェントが、協調や交渉などの相互作用によりエージェント個々の機能を生かし、新しい機能を創出して行く中で、その状態やエージェント群が疑似的な知性を映し出すエージェントの集合としてマルチエージェントが提案されている。

3 データの特徴抽出と順位付け

前述のエージェントは、与えられている時系列データからの特徴抽出を行う事が可能で

ある。その際、エージェントの自律的な能力に基づき、基準値が求める事が可能である。

データ項目数が多い場合、人であったとしても、その着目点は、それぞれ異なる事が多い。そのため、エージェントであったとしても、その特徴は同様に再現できなくてはならないと考えられる。

そこでエージェントには、初期段階として、異なる着目点の設定を与えておく。設定された着目点に対して、データの期待値及び偏差を求め、偏差によってデータの特異点の抽出を行なう。その着目点の異なるエージェントを集め、特異点がそれぞれの交渉データとなり、他のエージェントと交渉可能状態とする。

それらのエージェントが集まり構成されたマルチエージェントは、統合的交渉プロトコル[3]に基づき、妥協点を求めていく。

妥協点までの変動が一番少なかったものを上位とする順位付けを行う。そのため、エージェントは与えられた着目点に対して、如何に有効なデータを検索できるかにかかってくる。つまり、それまでにエージェントが学習してきた過程において、検索精度が異なる学習方法を与えなくては、これらの再現は非常に困難である。

様々な学習法があるが今回エージェントには、事前に与えられた全データからの強化学習を行なう方法を適応した。その理由として、期待値を目標としたエージェントの行動学習において、用いられる事が多いためである[4]。

4 おわりに

今回マルチエージェントモデルの検証データには、日立造船株式会社のごみ焼却炉[5]のデータを元に、特徴抽出を行なった。焼却炉システムの内圧や空気量、温度、焼却量から統計データを作成した。そのデータを元に、エージェントは、様々な関連性から着目点をあたえ、協議を行なわせた。しかし、エージェントの妥協点の算出において、どれも差が無い変動をするという問題点に直面していた。その理由の１つとしては、データの荒れに問題があるのではないかと考えている。

今後、特徴抽出におけるデータの抽出方法、エージェントの強化学習の目標などを含めた様々な点から再検討を行なっていく。

参考文献

[1]住田一男、三池誠司：知的情報検索の動向, 人工知能学会誌, Vol. 11, No. 1, pp. 10-15 (1995)

[2]金淵培：Agent 技術の現状と実用化, 人工知能学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 850-860 (1997)

[3]大沢英一：マルチエージェント環境における交渉のモデル, 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 690-696 (1995)

[4]山村雅幸、宮崎和光、小林重信：エージェントの学習, 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 683-689 (1995)

[5]藤吉誠、福島龍太郎、桝谷道治：ごみ焼却炉制御のインテリジェント化, 日本ファジィ学会, 第 18 回ファジィシステムシンポジュウム講演論文集, pp. 25-28 (2002)

[問い合わせ先]
〒225-8502 神奈川県横浜市青葉区鉄町 1614
桐蔭横浜大学 工学部 制御システム工学科
田崎 栄一郎
TEL:045-974-5070 FAX:045-978-1311
E−mail:tazaki@intlab.toin.ac.jp

ファジィ環境評価型強化学習によるはさみ将棋の戦術獲得に関する研究

A Tactics Acquisition of Hasami-Shogi by Fuzzy Environment Evaluation Reinforcement Learning

○日高　洋志
Hiroshi Hidaka
立命館大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering
Ritsumeikan University

星野　孝総
Yukinobu Hoshino
立命館大学理工学部
Computer Science
Ritsumeikan University

亀井　且有
Katsuari Kamei
立命館大学理工学部
Computer Science
Ritsumeikan University

Abstract The number of states in the game environment is very huge. In the game environment, it is difficult to estimate every state by using the ordinary Reinforcement Learning. However, Fuzzy Environment Evaluation Reinforcement Learning(FEERL) proposed in our past works can tackle the rise in the number of rules and raise the learning efficiency. The paper applies FEERL to Hasami-Shogi and acquires the tactics of it.

1　はじめに

状態数が巨大な対戦型ゲームにおける手の決定には，ゲーム途中の盤面を評価することによって最良手を決定する必要がある．しかし，最良と思われる手を指しても，ゲーム途中の盤面を評価しているので，選択された手が必ずしも最良手とはいえない．

強化学習 [3] を盤面の評価に適用することで，過去の盤面経験を生かした評価を行うことが可能である．しかしながら，全ての盤面を評価し，保存することは，状態数の多いゲーム環境において困難である．

本研究ではファジィ環境評価型強化学習 [2][4] を用いることで，ルールの急増を抑え，学習効率を上げることを目的とし，ファジィ環境評価型強化学習のはさみ将棋への適用方法を提案し，その有用性を検証する．

2　ファジィ環境評価型強化学習

状態と行動を対として評価する Q-learning[3] は，状態数の多いゲーム環境に適用するのは困難である．そのため，本研究では，状態に対する評価値を強化する TD 法 [3] を応用したファジィ環境評価型強化学習 (FEERL)[2][4] を用いる．

2.1　ファジィ環境評価ルール

将棋やチェスといった対戦型のゲームにおける手の決定には，ゲーム木 [1] を作成して，探索先の盤面を評価する．ファジィ環境評価型強化学習における入力環境 $\boldsymbol{q}$ を N 次元ベクトルで与える．

$$\boldsymbol{q} = (q_1, q_2, q_3, ..., q_j, ...q_N) \tag{1}$$

次に，ルール i の環境評価ルール R_i を式 (2) で与える．

$$\begin{aligned} R_i:&\ \text{if } \boldsymbol{q} \text{ is } \boldsymbol{p}_i \text{ then } E \text{ is } w_i \\ &\boldsymbol{p}_i = (p_{1i}, p_{2i}, ..., p_{ji}, ...p_{Ni}) \\ &i = 1, 2, ..., M; M \text{ はルール数} \end{aligned} \tag{2}$$

式 (2) において，入力環境 $\boldsymbol{q}$ が状態 $\boldsymbol{p}_i$ であるとき，環境評価値 E が w_i であることを表している．

2.2　ファジィ推論

ファジィ環境評価型強化学習において，評価値 E は以下の式によって算出する．

$$E = \begin{cases} \dfrac{\sum_i (w_i \cdot \mu_i)}{\sum_i \mu_i} & (\text{ただし} \sum_i \mu_i > 0) \\ 0 & (\text{ただし} \sum_i \mu_i = 0) \end{cases} \tag{3}$$

μ_i は，入力環境 $\boldsymbol{q}$ とルール R_i の類似度である．

3　はさみ将棋

図 1 の示すように，4 × 4 の盤面において，先手，後手が交互に駒を動かし，自分の駒が相手の駒を縦あるいは横に挟んだときに取ることができる．駒の移動例を図

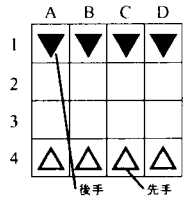


図 1 初期盤面

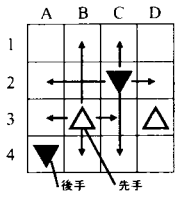


図 2 駒の移動例

2 に示す．駒は縦，横に盤面の端まで移動することができる．ただし，途中に敵味方の駒がある場合はその手前までしか移動できない．また，この実験での 1 試行の終了条件は以下の 3 つである．

1. 先手の駒が 2 枚以下になる (後手勝利)
2. 後手の駒が 2 枚以下になる (先手勝利)
3. 1 試行の最大ステップ数である 50 ステップを経過する

3.1 ルール設計

盤面の状態は図 3 に示すように手番，実際の 4×4 の盤面 16 マス，先手・後手の死駒キューがそれぞれ 4 マスの計 25 個の要素で表現される．死駒キューとは，先手・後手が相互に駒を取り合うことによって盤面に存在しない駒を格納するための配列である．盤面の状態の各要素を入力環境のベクトル要素と対応させ，25 次元のベクトルで与える．ファジィ推論は入力環境とルールベースの各ルールの手番が一致した場合のみに行う．手番が一致しない場合は，類似度を 0 とする．

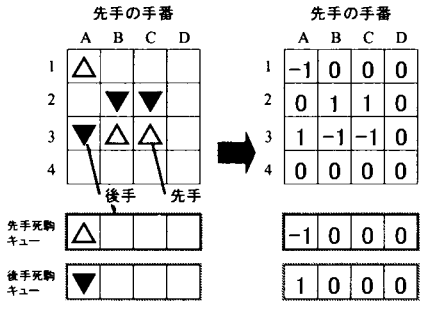


図 3 ルール設計

3.2 類似度の算出

入力環境 $\boldsymbol{q}$ とルール R_i の前件部 $\boldsymbol{p}_i$ から，式 (4) のようなメンバシップ関数を用い，各ベクトル要素 q_j と p_{ji} との適合度を算出する．

$$\mu_{ji} = \begin{cases} 1 - \dfrac{|q_j - p_{ji}|}{l} & 0 \leq |q_j - p_{ji}| \leq l \\ 0 & l < |q_j - p_{ji}| \end{cases} \tag{4}$$

次に適合度の総和 m_i を式 (5) で算出する．

$$m_{i_i} = \sum_{j=1}^{n} \mu_{ji} \tag{5}$$

式 (5) で算出した m_i を用いて，$\boldsymbol{q}$ と $\boldsymbol{p}_i$ の類似度を式 (6) で定義する．

$$\hat{\mu}_i = \begin{cases} \left(1 - \dfrac{N - m_i}{L}\right)^{pp} & L \geq N - m_i \\ 0 & L < N - m_i \end{cases} \tag{6}$$

L は不感帯を決定するパラメータ，pp は感度 [4] をあらわすパラメータである．感度パラメータを大きくすると，図 4 に示すように，わずかな m_i の変化によって類似度が大きく変化し，m_i が N に近い部分ほど類似度が反映されるようになる．

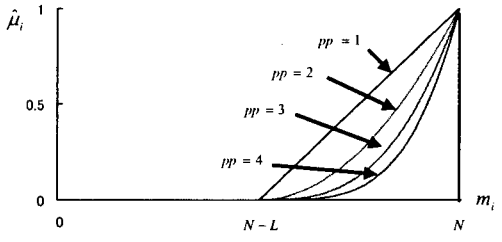


図 4 感度パラメータによる類似度の算出

4 評価値の更新

4.1 強化済みフラグ付報酬分割型 TD 法

強化済みフラグ付報酬分割型 Q-learning[5] は，従来の環境同定型手法である Q-learning と，経験強化型手法である Profit Sharing の長所を取り入れた学習手法である．本研究で用いている FEERL は，状態とそれに対する評価値を同定した TD 法を応用したものである．よって，強化済みフラグ付報酬分割型 Q-learning を TD 法に特化して，適用する．

4.1.1 強化済みフラグ付報酬割り当て法

従来の Profit Sharing では，合理性定理の制約があり，公比を高く設定できない．したがって，報酬の伝搬効率が低く，エピソード初期では強化が弱体化する．これらの問題に対し，強化済みフラグ付報酬割り当て法 [5] では一度強化したルールに対し，強化済みフラグと呼ばれるフラグを立てる．この強化済みフラグを用いて無駄ルールの強化を避けることにより，公比を高く設定することが実現でき，Profit Sharing の利点を活かすことができる．

図 5 に強化済みフラグを用いた報酬割り当ての概念図を示す．環境の状態を X，Y，Z，各状態における選択可能な行動を a，b とする．G は終端状態とし，G に

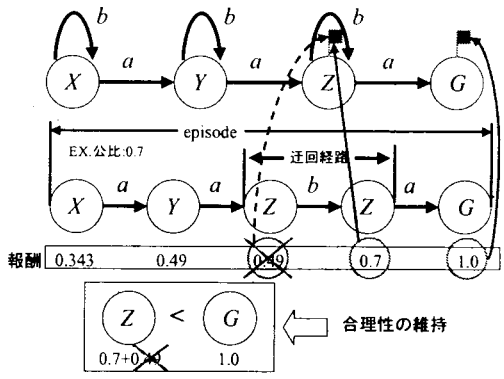


図 5 強化済みフラグ付報酬割り当て法の概念図

到達したときに報酬が与えられる．報酬が与えられた際，フラグが全てリセットされ，その後エピソードの終端から順に各ルールに報酬が分配される．各ルールは報酬を受け取る際，フラグの有無を調べる．フラグが立っていない場合は報酬を受け取り，フラグを立てる．フラグが立っている場合はそのルールは既に報酬を受け取っており，報酬の重複が生じるので新たな報酬を受け取らない．これらの処理により，公比を高く設定しても合理性が保たれる．

4.1.2 報酬分割型 TD 法

本研究では，報酬分割型 Q-learning[5] を TD 法に特化して適用する．この手法では，報酬と重みを比較し，適した報酬を伝搬することで，学習の効率化と最適政策の獲得を促している．概念図を図 6，更新式を式 (7) に示す．

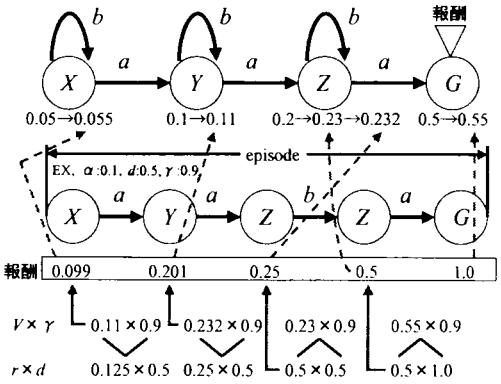


図 6 報酬分割型 TD 法の概念図

$$V_t \leftarrow (1-\alpha)V_t + \alpha r_t \tag{7}$$

$$r_t = \begin{cases} d^{episode-t}r \\ \quad (d^{episode-t}r \geq \gamma V_{t+1}) \\ \gamma V_{t+1} \\ \quad (d^{episode-t}r < \gamma V_{t+1}) \end{cases}$$

α，γ は学習率，割引率，d は Profit Sharing における公比である．また r はエピソード終了時に与えられる報酬，$episode$ はエピソード長である．この図では，先の説明と同様に，環境状態を X，Y，Z，行動を a，b，終端状態を G とし，状態 G に到達したときに報酬が与えられるものとする．エピソードの終端のルールには指定した報酬値 1.0 が与えられる．最初に状態 G の評価値を更新し，0.55 となる．状態 G の一つ前の状態 Z の強化では，$V \times \gamma = 0.55 \times 0.9 = 0.495$，$r \times d = 1.0 \times 0.5 = 0.5$ となり，式 (7) より $r_t = 0.5$ として強化される．同様にそれ以前のステップにおいても，報酬と重みを比較することで，与えられる報酬値が決定する．比較は報酬をもとにルールを強化した後に行われる．また，FEERL におけるルールの環境評価値 w_i の更新式を式 (8) に示す．

$$w_i \leftarrow (1-\alpha\hat{\mu}_i)w_i + \alpha\hat{\mu}_i r_t \tag{8}$$

$$r_t = \begin{cases} d^{episode-t}r \\ \quad (d^{episode-t}r \geq \gamma E_{t+1}) \\ \gamma E_{t+1} \\ \quad (d^{episode-t}r < \gamma E_{t+1}) \end{cases}$$

$\hat{\mu}_i$ は入力環境とルール R_i の類似度である．E_t は t ステップの環境評価値である．

4.2 評価値の伝播

対戦型ゲームにおいては，手を指すごとに盤面の状態が大きく変化するので，それに対する評価値も図 7 に示すように振動しながら，変化する．よって，エピソードの 1 ステップ間ではなく数ステップ間で評価値を伝播することによって，行動連鎖を表現する．この概念を図 8 に示す．

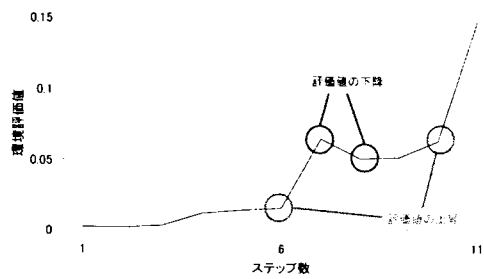


図 7 環境評価値の遷移

$interval$ は評価値の伝播するときのステップ間隔である．また，ステップ t の時に用いたルールの環境評価値 w_i の更新式を式 (9) に示す．

$$w_i = (1-\alpha\hat{\mu}_i)w_i + \alpha\hat{\mu}_i\gamma E_{t+interval} \tag{9}$$

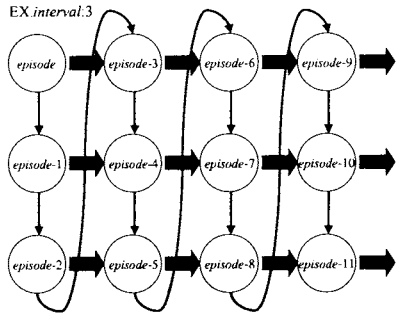


図 8 数ステップ間の評価値の伝播

5 対戦相手の戦術の利用

本研究では，対戦相手の戦術の利用を FEERL に取り入れる．図 9 のように，自分と対戦相手を取替えた盤面を入力環境 $\boldsymbol{q}$ として扱い，その盤面の評価を行う．

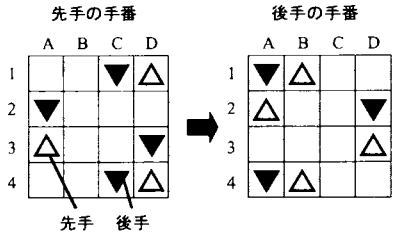


図 9 盤面の変換

6 対戦実験

先手は FEERL，後手はスコア法による盤面評価と α-β 探索 [1] を用いた対戦実験を行った．FEERL は，ファジィ環境評価ルールを用い，MinMax 探索 [1] によって，探索先の盤面を評価し，これを各候補手の評価値とする．次に，候補手の評価値から確率的ルーレット選択を用いて，指す手を決定する．

総試行回数は 4000 試行であり，先手の 1902 勝 964 敗 1134 引分であった．この実験の 500 試行あたりの勝率の変化を図 10 に示す．

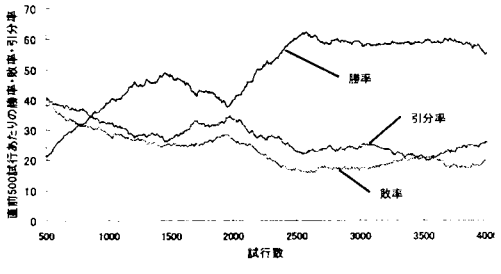


図 10 直前 500 試行あたりの勝率，敗率，引分率の変化

図 10 より，4000 試行終了時の直前 500 試行あたりの勝率は 55.2 %，敗率は 19.2 %，引分率は 25.6 %となった．次に勝ちゲームにおける FEERL のとった戦術例を図 11 に示す．盤面 a，b，c，d の評価値は 0.038694，0.111117，0.178571，0.255033 と評価値が増加している．

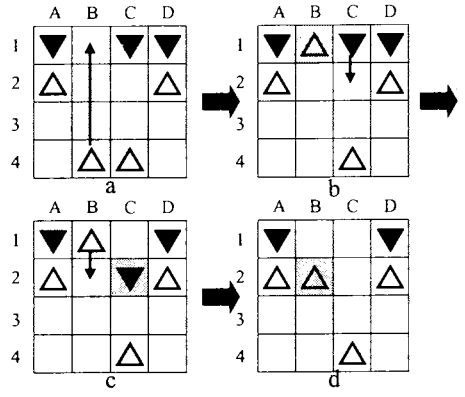


図 11 ファジィ環境評価型強化学習による先手の戦術

7 おわりに

本研究では，ファジィ環境評価型強化学習を，はさみ将棋の戦術獲得に適用し，良好な結果を得ることができた．

今後の課題としては，今回の実験で獲得されたルールの拡大した盤面への適用である．

参考文献

[1] 松原仁:最近のゲームプログラミング研究の動向, 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 6, pp. 3–13(1995)

[2] 星野孝総, 亀井且有:ファジィ環境評価ルールを用いた強化学習の提案とチェスへの応用, 日本ファジィ学会誌,Vol. 13, No. 6, pp. 626–632(2001)

[3] 山村雅幸, 宮崎和光, 小林重信:強化学習の特徴と発展の方向, システム/制御/情報, Vol. 39, No. 4, pp. 191–196(1995)

[4] 星野孝総, 亀井且有:ファジィ環境評価型強化学習の LightsOut ゲームへの応用と探索における迂回行動の回避, システム制御情報学会論文誌,Vol. 14, No. 8, pp. 395–401(2001)

[5] 星野孝総, 大橋雄史, 亀井且有:強化フラグ付報酬分割型 Q-Learning の提案とその応用, 第 47 回システム制御情報学会研究発表講演会論文集, pp. 611–612(2003)

[連絡先]
住所 : 〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1
立命館大学理工学部情報学科亀井研究室
口高 洋志
Tel : 077-561-2807
Fax : 077-561-2861
e-mail : hidaka@spice.cs.ritsumei.ac.jp

一般化相関ルールに基づくファジィ相関ルールの抽出

Fuzzy Rule Extraction Based on the Mining Generalized Association Rules

○渡邊 俊彦
Toshihiko Watanabe
大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University

中山 万希志
Makishi Nakayama
(株)神戸製鋼所
Kobe Steel, Ltd.

Abstract: In data mining approach, the quantitative attributes should be appropriately dealt with as well as the Boolean attributes. This paper describes a fuzzy rule extraction method based on the mining generalized association rules from database. The objectives of the method are to improve the computational time of mining and the accuracy of the extracted rules for the actual application. In our approach, we construct a hierarchical taxonomic fuzzy sets structure in each attribute. Two algorithms are shown based on the structure and the Apriori algorithm. We propose a multistage fuzzy rule extraction algorithm and a multiscan algorithm. From the results of numerical experiments, our methods are found to be effective in terms of computational time.

1 はじめに

近年、大規模データベースから知識やルールを獲得するデータマイニング技術の研究が進められ[1-5]、主にマーケティング分野での実用化が試みられている。一方、製造業におけるプラントや工程で収集されている製造実績データからの知識抽出を考える際には、2値属性や名義尺度属性だけでなく、連続値属性を如何に扱うかが重要な課題である。

連続値属性を含むデータベースからのマイニング方法として一般化相関ルール手法が提案されている[1][2]。この方法では、連続値属性を区間値に分割し、それをもとに区間表現された相関ルールを Apriori アルゴリズムを適用して抽出する。また、連続値属性をファジィ集合により分割し、ファジィ相関ルールを抽出する方法が提案されている[3-5]。これら連続値属性のマイニング手法では、通常の2値属性の場合と比較して、格段に計算時間が増加する。データベースの属性数とレコード数だけでなく、ファジィ分割数が多くなるに従って計算時間が増大する。また、抽出対象であるルール数も多くなるため、適切な抽出規範の設定も課題となる。

本研究では、ファジィ相関ルール抽出にあたって主として計算効率の向上を目的とし、ファジィ集合の分類階層構造に基づく一般化相関ルール抽出手法を提案し、数値例によりその有効性を示す。

2 データマイニングのためのファジィ集合の分類階層構造

各属性値のファジィ分割に基づいてファジィルールを抽出するファジィ相関ルール手法ではファジィ分割数を多くすると計算量が増える。相関ルール抽出における主要な処理は、データベースのスキャンとサポート度の計算であり、これらの計算量を減少させることが課題である。

本研究では、各属性のファジィ集合に分類階層構造を導入し、マイニング処理の効率化を図る。連続値属性の情報を扱う基本処理単位(information granularity)として各属性がファジィ分割されていると仮定する。マイニングのための item となるファジィ集合をこの基本ファジィ集合から合成演算と言語ヘッジにより生成する。図1にファジィ集合の分類階層構造の例を示す。

ファジィ集合 X,Y から以下の演算によりファジィ集合を生成する。ここで、μ をメンバーシップ関数とする。

(1) *AND* 演算

ファジィ集合「*X AND Y*」は通常のファジィ集合の積演算により、次式で生成する。

$$\mu_{X\ AND\ Y} = \mu_X \cdot \mu_Y \tag{1}$$

(2) + 演算

通常のファジィ集合の和演算ではなく、隣接したファジィ集合を情報検索の観点で合成するため、「$X+Y$」演算を次式により導入する。

$$\mu_{X+Y} = \min\{1, \mu_X + \mu_Y\} \tag{2}$$

(3) 言語ヘッジによる生成

言語ヘッジ「*Very X*」による生成を次式により行う。

$$\mu_{very X} = \mu_X^2 \tag{3}$$

これらの演算により、ユーザー定義の基本ファジィ集合から相関ルールを記述するためのファジィ集合を自動的に生成する。生成されたファジィ集合は次式に示す包含関係に関して半順序関係をなす。

$$X \subseteq Y \Rightarrow \mu_X(a) \le \mu_Y(a), \quad \forall a \in U \tag{4}$$

ここで、U は全体集合である。この半順序関係が構成する概念階層が相関ルール抽出問題における領域知識として活用できる。

3 ファジィ相関ルール抽出アルゴリズム

3.1 ファジィ相関ルール

ファジィアイテム集合 F を異なる属性上のファジィ集合の任意の数の組合せ集合とする。アイテム集合 F のサポート度を次式で定義する。

$$s(F) = \frac{\sum \mu_F(x_p)}{m} \tag{6}$$

ここで x_p はデータベースのトランザクションを表す。$\mu_F(x_p)$ はトランザクションに対するアイテム集合 F の要素(item)であるファジィ集合のメンバーシップ値の積とする。また、m はデータベースのトランザクションの総数である。

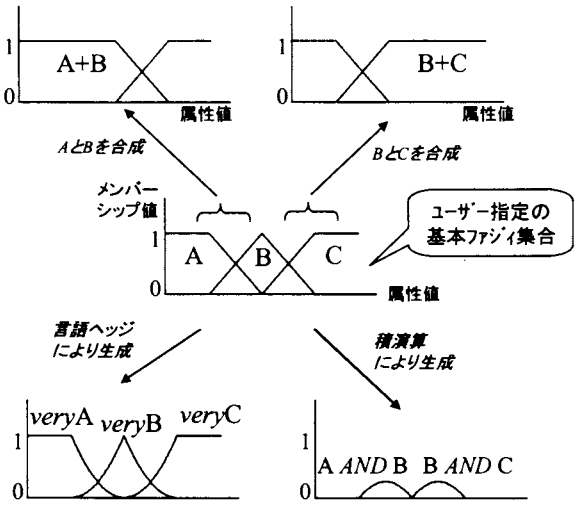


図1 ファジィ集合の分類階層構造

ファジィ相関ルールの確信度 c を次式で定義する。

$$c(G \Rightarrow H) = s(G \cup H)/s(G) \qquad (7)$$

ここで G と H はファジィアイテム集合である。また、$s(G \cup H)$はファジィ相関ルールのサポート度である。

ファジィ相関ルールの抽出の基本的な考え方は、最小サポート度と最小確信度の2つの閾値を予め設定しておき、各値がこれらの閾値を上回るルールを抽出するものである。ここで、サポート度が最小サポート度よりも大きいアイテム集合を頻出アイテム集合と呼ぶ。

相関ルールの抽出アルゴリズムでほとんどの処理時間を占めるのが頻出アイテム集合の探索である。

3.2 Apriori アルゴリズム

Apriori アルゴリズムは頻出アイテム集合の抽出を効率良く行う重要なアルゴリズムである。その基本的な考え方は、頻出アイテム集合の任意の部分集合は頻出アイテム集合になるというものである。これを利用して頻出アイテム集合の組合せから別の頻出アイテム集合を生成することを繰り返すことにより頻出アイテム集合を見出す。

k-アイテム集合を要素数が k のアイテム集合とする。L_k を頻出 k-アイテム集合の集合とする。また、C_k を頻出 k-アイテム集合の候補集合とする。アイテム数1の頻出アイテム集合 L_1 をまず計算して求めておき、次の手順を k=2 から繰り返すことにより頻出アイテム集合を見出す。

A1) C_k を L_{k-1} に属する2つのアイテムの和集合として求める。

A2) C_k に属するアイテム集合のうち、その要素数 $(k-1)$の部分集合が L_{k-1} に存在しないものは削除する。

A3) データベースをスキャンし、C_k の各アイテム集合のサポート度を計算し、頻出アイテム集合を求め、L_k を決定する。

このアルゴリズムは2値属性の場合と同様にファジィアイテム集合の場合にも同様に適用できる。ただし、A2)において、同じ属性のファジィ集合が候補アイテム集合にならないよう処理を追加する必要がある。

4 分類階層を持つファジィ集合に基づくファジィ相関ルールアルゴリズム

大規模データベースからのファジィ相関ルールの抽出にあたっては、データベースへのクエリ回数だけでなく、サポート度の計算回数も減少させる必要がある。そこで、分類階層を持つファジィ集合の性質を利用した2つのアルゴリズムを提案する。まずその基礎となるファジィアイテム集合の部分集合の概念の拡張について述べる。

連続値属性 G 上にファジィ集合 A と B が定義されており、次式の包含関係が成立していると仮定する。

$$\mu_A(a_i) \le \mu_B(a_i), \quad \forall i, \forall a_i \in G \qquad (8)$$

ここで、a_i は i 番目のトランザクションの属性 G の値である。すなわち、ファジィ集合 B が分類階層構造上ファジィ集合 A の上位にあると仮定する。そして別の属性 H 上にファジィ集合が定義されており、ファジィアイテム集合{B,C}が次式で示すように頻出アイテム集合でなかったと仮定する。

$$\sum_i \mu_B(a_i) \cdot \mu_C(c_i) < \beta, \quad a_i \in G, c_i \in H \qquad (9)$$

ここで、c_i は i 番目のトランザクションの属性 H の値である。(8)(9)式より、次式が成立する。

$$\sum_i \mu_A(a_i) \cdot \mu_C(c_i) \le \sum_i \mu_B(a_i) \cdot \mu_C(c_i) < \beta \qquad (10)$$

この関係は、属性 H を任意のアイテム集合に置き換えても成立することは明らかである。このようにアイテム集合の各要素で同じ包含関係が成立している場合をファジィアイテム部分集合の関係にあると呼ぶこととする。この例の場合、ファジィアイテム集合{A, C}はファジィアイテム集合{B, C}のファジィアイテム部分集合となっている。

この関係を活用すれば、相関ルール抽出のためのサポート度の計算回数の削減と消費メモリの低減が可能となることが期待できる。

4.1 マルチスキャンアルゴリズム

頻出 k-アイテム集合を探索する際に、まず分類階層構造において上位レベルのファジィ集合だけを使ってサポート度を計算し、その結果を利用してもう一度探索を行う場合の計算回数を低減させるマルチスキャンアルゴリズムを提案する。L'_k を分類階層で上位のファジィ集合だけで算出した頻出アイテム集合とし、C'_k を L'_{k-1} から合成により求めた候補集合であるとする。次の手順で処理を行う。アイテム数1の頻出アイテム集合 L_1 をまず求めておき、次の手順を k=2 から繰り返すことにより頻出アイテム集合を見出す。

C1) L_{k-1}から分類階層で上位のファジィ集合だけから構成されているアイテム集合を選択し、L'_{k-1}とする。
C2) C'_kをL'_{k-1}のアイテム集合を合成して求める
C3) C'_kに属するアイテム集合のうち、その要素数*(k-1)*の部分集合がL'_{k-1}に存在しないものは削除する。
C4) データベースをスキャンし、C'_kの各アイテム集合のサポート度を計算し、頻出アイテム集合を求め、L'_kを決定する。
C5) C_kをL_{k-1}に属する2つのアイテムの和集合として求める。
C6) C_kに属するアイテム集合のうち、その要素数*(k-1)*の部分集合がL_{k-1}に存在しないものは削除する。また、C_kに属するアイテム集合のうち、L'_kの何れかの要素のファジィアイテム部分集合でない要素を削除する。
C7) データベースをスキャンし、C_kの各アイテム集合のサポート度を計算し、頻出アイテム集合を求め、L_kを決定する。

このアルゴリズムによれば、サポート度計算回数の低減と消費メモリの低減が期待できるが、複数回のデータベーススキャンが必要となる。そこで処理時間を低減させるため、文献[2]で提案されているようなサンプリング法を適用し、スキャン時間の低減を行う。即ち、C4とC7のデータベースのスキャンを一部のトランザクションをランダムにサンプリングして行う方法である。これによりデータベースのスキャン時間の増大は抑制できるが、抽出されたルールは近似となる。仮にC4とC7でもデータベース全体をスキャンしたとすると、このアルゴリズムで得られる結果(頻出アイテム集合)は従来の結果と完全に一致する。

4.2 マルチステージアルゴリズム

マルチスキャンアルゴリズムが頻出アイテム集合の抽出を分類階層を利用して多段に行うのに対して、ルール抽出を他段階に行うマルチステージアルゴリズムを提案する。

分類階層上で上位のファジィ集合は、属性の大まかな情報を表しており、これらの集合だけで表現される相関ルール自体にも利用価値はある。まず、分類階層で上位のファジィ集合のみを使って全ての頻出ファジィアイテム集合を求め、最小確信度の制約からファジィ相関ルールを抽出する。抽出されたファジィ相関ルールに対応する頻出アイテム集合をL''とする。次に全体のファジィ集合を用いたファジィ頻出アイテム集合を次の手順で抽出する。

S1) C_kをL_{k-1}に属する2つのアイテムの和集合として求める。
S2) C_kに属するアイテム集合のうち、その要素数*(k-1)*の部分集合がL_{k-1}に存在しないものは削除する。また、C_kに属するアイテム集合のうち、L''の何れかの要素のファジィアイテム部分集合でない要素を削除する。
S3) データベースをスキャンし、C_kの各アイテム集合のサポート度を計算し、頻出アイテム集合を求め、L_kを決定する。

このアルゴリズムによれば、各段階でのサポート度の計算回数が削減できるが、前出と同様にデータベーススキャン回数が増える。このため、サンプリング法を適用する。

5 数値実験結果

提案したアルゴリズムを実装したマイニングシステムを開発し、数値実験を行った。対象データベースとして、UCI Machine Learning Repository (http://www.ics.uci.edu/~mlearn/MLRepository.html) で提供されている「abalone data」を用いた。データは9属性で4177件のデータを含んでいる。属性のうち1つは名義尺度属性であるが、簡単のため数値化し、全ての属性を連続値属性として扱う。アルゴリズムを評価するため、ファジィ分割の範囲は意図的に分布状況よりも広く設定した。ファジィ分割の数は11程度とした。本数値実験では、各属性の分類階層を「+」演算のみで構成される2段階とした。この数値実験では、アルゴリズムの効率を評価するため、ルールのpruningなどは行わないこととしている。

通常のAprioriアルゴリズムによる結果を図2に示す。4-アイテム集合の計算時に頻出とならなかった計算(結果的に不要)が多く行われていることがわかる。図3にサンプリングを行わないマルチスキャンアルゴリズムによる結果を示す。階層のレベルを2段階に分けて実施した。図3は2回目のスキャン時におけるサポート度の計算回数の減少の割合を示している。計算回数が低減できていることがわかる。

次にサンプリングを行わないマルチステージアルゴリズムによる結果を図4に示す。1回目のマイニングでは、上の階層のファジィ集合のみを用いてルール抽出を行っている。図4は2回目のルール抽出におけるサポート度の計算回数の減少の割合を示している。計算回数が大きく低減できていることがわかる。なお、サンプリングを行わない場合は、抽出される相関ルールは通常の結果と一致する。また、この方法では、データベーススキャン回数が増えるが、上位階層のファジィ集合のみを用いた相関ルールが抽出できるため、ユーザーと対話的にマイニングを進めることも可能である。

このようにマルチステージアルゴリズムでは、計算回数が大きく低減できることから、サンプリング法を適用し、スキャンコストを少なく抑えた場合の効率を調べた。サンプリングを行うため、最終的に抽出されるルールは全件を用いた場合と必ずしも一致しない。そこで得られたルールの一致度を調べた。図5に一段階目のマイニング実行時にだけサンプリングを行った結果を示す。全トランザクションに対するサンプリングサイズの割合を変化させて抽出されたルールの一致度を調べた。サンプリング率0.4以上であれば、高い一致度となっていることがわか

る。次に両方の段階でサンプリングを行った結果を図6に示す。ここでサンプリングサイズパラメータ α を導入し、一回目のマイニングではそれぞれ α の割合のトランザクションを用い、二回目のマイニングでは $1-\alpha$ の割合のトランザクションを用いる。この設定によれば、データベーススキャンにかかる計算コストは従来の方法とほぼ等しくなる。抽出されたルールの一致度はパラメータ値が 0.4 ～0.7 で高い一致度を示している。このようにマルチスキャンアルゴリズムによれば、計算回数の大幅な低減が可能となる。また、その構造から対話的なマイニングシステム構築も可能となる。

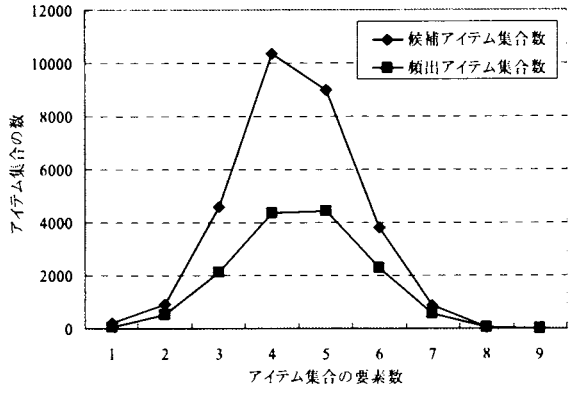


図2 Apriori アルゴリズムによる結果

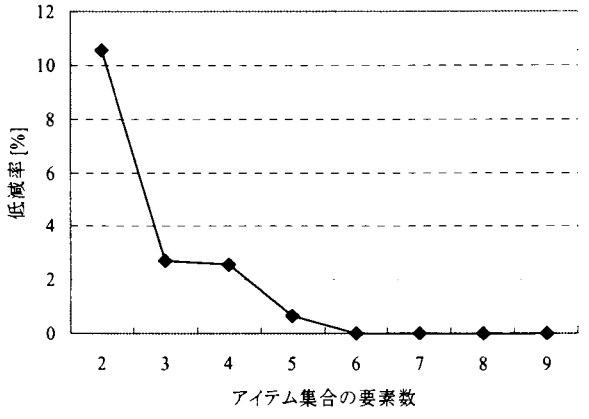


図3 マルチスキャンアルゴリズムによる結果

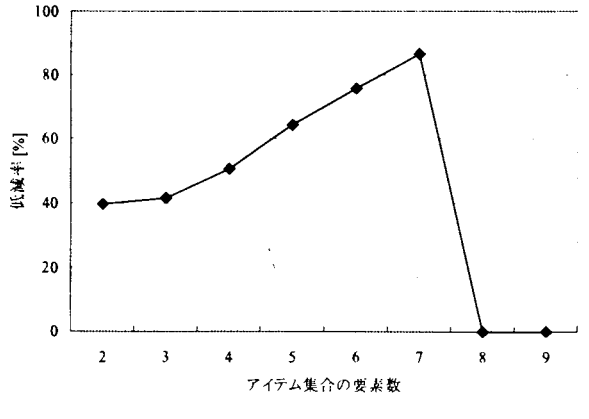


図4 マルチステージアルゴリズムによる結果

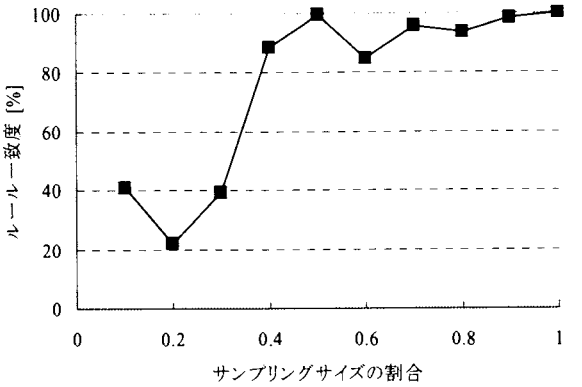


図5 1段目の処理にサンプリング法を適用

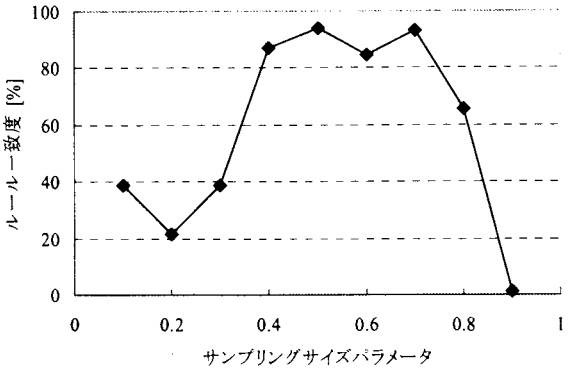


図6 両方の処理にサンプリング法を適用

6 おわりに

本研究では、連続値属性で構成されたデータベースからの一般化相関ルールに基づくファジィ相関ルールの抽出について検討した。アイテムを構成するファジィ集合を分類階層表現し、それに基づき頻出アイテム集合の抽出を多段階で行うマルチスキャンアルゴリズムとマルチステージアルゴリズムを提案した。数値実験を行い、これらのアルゴリズムの有効性を示した。

参考文献

[1] R. Srikant and R. Agrawal, "Mining Generalized Association Rules," *Proc. of the 21st VLDB Conf.*, pp.407-419, 1995.

[2] R. Srikant and R. Agrawal, "Mining Quantitative Association Rules in Large Relational Tables," *Proc. of the ACM Conf. on Management of the Data*, pp.1-12, 1996.

[3] G. Chen and Q. Wei: "Fuzzy Association Rules and the Extended Mining Algorithms," *Information Sciences*, Vol.147, pp.201-228, 2002.

[4] H. Ishibuchi and T. Yamamoto: "Fuzzy Rule Selection by Data Mining Criteria and Genetic Algorithms," *Proc. of Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 399-406, 2002.

[5] Y. Hu, R. Chen, and G. Tzeng, "Discovering Fuzzy Association Rules Using Fuzzy Partition Methods," *Knowledge-Based Systems*, Vol. 16, pp.137-147, 2003.

連絡先：

〒572-8530
大阪府寝屋川市初町 18-8
大阪電気通信大学 工学部第一部電子工学科
渡邊俊彦
電話: 072-824-1131(代表) FAX: 072-824-0014(代表)
Email: t-wata@isc.osakac.ac.jp

量限定子を持つファジィルールの抽出手法の改良

Improvement of Extraction Method of Fuzzy Rules with Fuzzy Qualifiers

馬野 元秀 Motohide Umano　村上 真一 Shin-ichi Murakami　宇野 裕之 Yushi Uno　瀬田 和久 Kazuhisa Seta　岡田 真 Makoto Okada

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
Department of Mathematics and Information Sciences
College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

Abstract We proposed a method to extract knowledge about associations between attributes of data by fuzzy sets and fuzzy qualifiers. The knowledge is expressed in a form of natural language and is easy for a human to understand the meaning about the data. In this paper, we improve an evaluation method of the conventional one and describe a simulation result for iris classification problem by R.A. Fisher.

1. はじめに

データベースに蓄えられた大量のデータには有用な知識が含まれている．これを取り出して有効に利用しようというのがデータマイニングである [1].

しかし，データベースのデータには誤りやノイズが多く含まれており，きちんとした形の知識として抽出するのが難しいことが多い．また，抽出された知識は人間にとって理解しやすい形で表現することが重要である．

我々は以前,「属性 A の値が大きいほとんどのデータはクラス C_1 である」のような自然言語に近い形で知識を抽出する手法を提案した [2].「大きい」や「小さい」等のファジィ集合と,「ほとんどの」や「だいたい半分以上の」などのファジィ量限定子を用いることにより，データの不確しかさと人間にとっての分かりやすさに対処している．

本論文では，従来の手法を見直し，その変更・改良を行った．

2. 抽出される知識について

まず本手法で抽出される知識とその抽出法について，表 1 のデータ及び図 1 のファジィ集合を用いて説明する．いま，表 1 のデータのクラス C_2 を説明する知識を抽出したいとする．No.1～5 のデータを図 1 の middle で限定し，図 2 のように左側に A_1 = middle であるデータを，右側に $A_1 \neq$ middle であるデータを集める．このとき，A_1 = middle により限定されたデータ D_1 においてクラス C_2 が現れる割合 p は

$$p = \frac{0.5 + 0.6}{0.32 + 0.04 + 0.5 + 0.6 + 0.41} = 0.588$$

となる．したがって，このときクラス C_2 を説明する知識として

58.8% of data $\{A_1 = \text{middle}\}$ are C_2

という知識を抽出できる．

いまは 58.8%という具体的な数値を用いて知識を表現した．しかし，ファジィ集合 middle はあいまいさを含んだ概念であり，このような具体的な数値による割合の表現は適切ではないと考えられる．

表 1: Fisher のアヤメのデータ（一部抜粋）

No.	A_1	A_2	A_3	A_4	class
1	5.1	3.5	1.4	0.2	C_1
2	4.7	3.2	1.3	0.2	C_1
3	7.0	3.2	4.7	1.4	C_2
4	6.9	3.1	4.9	1.5	C_2
5	7.1	3.0	5.9	2.1	C_3

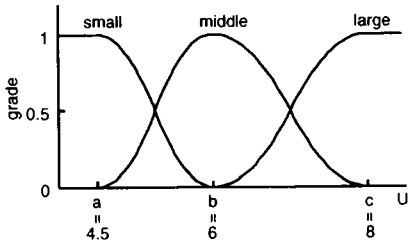


図 1: 属性 A のファジィ集合

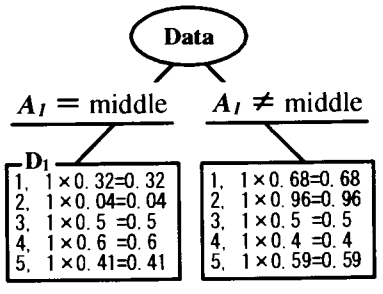


図 2: データの限定

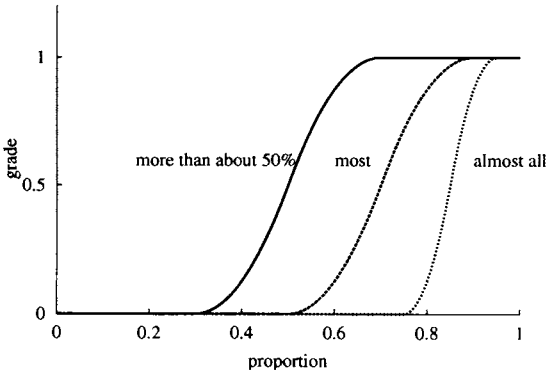


図 3: ファジィ量限定子のメンバーシップ関数

そこで，このデータの割合に対してファジィ量限定子 most，almost all，more than about 50% などの割合上で定義されたファジィ量限定子を用いて表現する．

ファジィ量限定子が図 3 のように定義されているとすると，先ほどの知識は，例えば，more than about 50% を用いると

More than about 50% of data $\{A_1 = \text{middle}\}$ are C_2

のように表現できる．

このようにファジィ集合とファジィ量限定子を用いることによりデータについての情報を自然言語に近い形で表現でき，ユーザにとって理解しやすくなると考えられる．また，ファジィ集合とファジィ量限定子で表現された知識は緩い制約での記述となっているので，データにノイズや誤りが含まれていたり，データが不完全な場合にも対処できる．

この例では，$A_1 = \text{middle}$ を限定する条件と考えたが一般的には，限定する条件としてどの属性のどのファジィ集合を使用するのがよいかを決める必要がある．また，どのファジィ量限定子を用いるのがよいかを決めなければならない．

さらに $A_1 = \text{middle}$ で限定されたデータ集合 D_1 を別の属性のファジィ集合でさらに限定した方がよいかも知れない．複数の条件で限定する場合，その条件の組合せを決める必要がある．このように

(1) どの属性のどのファジィ集合を用いて何段階の条件で限定を行なうか

(2) どのファジィ量限定子を用いるのがよいか

について考える必要がある．

3. ファジィ量限定子を用いた知識の抽出

どの属性のどのファジィ集合を何段階組合せて限定するのがよいかについて考える．このようなファジィ集合の組合せは非常に多くなるので全探索は行えない．以前の手法はファジィID3 をもとにしており，獲得情報量が最大となるファジィ集合の組合せを用いていた [3]．

今回の手法では，以下のような評価を用いて，限定するファジィ集合の組合せを決定する．

3.1 ファジィ集合の組合せの評価

評価は次の 3 つの項目によって行う．このとき，説明したいクラスを C_Y とする．

1. クラス C_Y の出現率 p
2. クラス C_Y のカバー率 c
3. 限定するファジィ集合の数 L

第一の評価項目は，ファジィ集合の組合せにより限定されたデータ集合 D_i 内にクラス C_Y が現れる割合を示す．これは，

$$p = \frac{\sum_{d \in D_i} (\mu_{D_i}(d) \times \mu_{C_Y}(d))}{\sum_{d \in D_i} \mu_{D_i}(d)}$$

と計算される．ここで，$\mu_{D_i}(d)$ はデータ集合 D_i のデータ d の確信度，$\mu_{C_Y}(d)$ は説明したいクラス C_Y に対するデータ d の一致度である．

第二の評価項目は，全データ D_0 中のクラス C_Y であるデータに対して，ファジィ集合の組合せにより限定されたデータ集合 D_i 内でクラスが C_Y であるデータの割合を示す．これは，

$$c = \frac{\sum_{d \in D_i} (\mu_{D_i}(d) \times \mu_{C_Y}(d))}{\sum_{d \in D_0} \mu_{C_Y}(d)}$$

と計算される．ここで，$\mu_{D_i}(d)$ はデータ集合 D_i のデータ d の確信度，$\mu_{C_Y}(d)$ は説明したいクラス C_Y に対するデータ d の一致度である．

第一，第二の評価項目の値は，高い方が望ましく，低いものは有効でないと考えられるので，それぞれ閾値 θ_p, θ_c を設定する．この 2 つの値が主な評価項目となる．

第三の評価項目は，知識がユーザにとってわかりやすいかどうかを示す．限定に使用するファジィ集合が多いほどデータは厳密に分類される．しかし，ユーザに分かりやすく説明することを目的とすると限定する条件が多いのは適当ではない．したがって，限定に使用するファジィ集合の数 L を次式 $\mu(L)$ を用いて評価し，少ないファジィ集合で表現された知識の評価を高くする．

$$\mu(L) = \begin{cases} 1 & L = 1 \\ 0.9 & L = 2 \\ 0.6 & L = 3 \\ 0.4 & L = 4 \\ 0.2 & L = 5 \\ 0 & L \geq 6 \end{cases}$$

上記の 3 つの評価項目を用いて，ファジィ集合の組合せの評価値 E を次式のように定める．

$$E = w_1 \times p + w_2 \times c + w_3 \times \mu(L) \qquad (1)$$

w_1, w_2, w_3 は各要因を考慮する重みである．

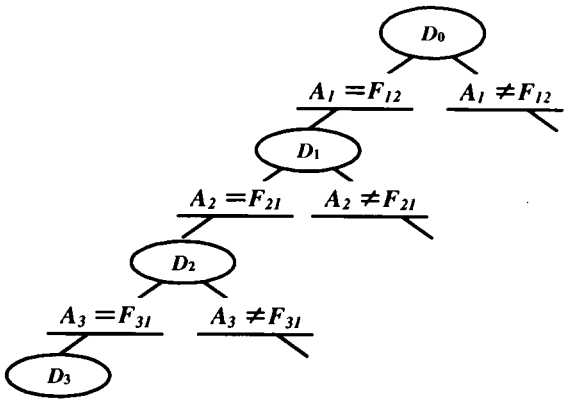


図 4: ファジィ集合の組合せの例

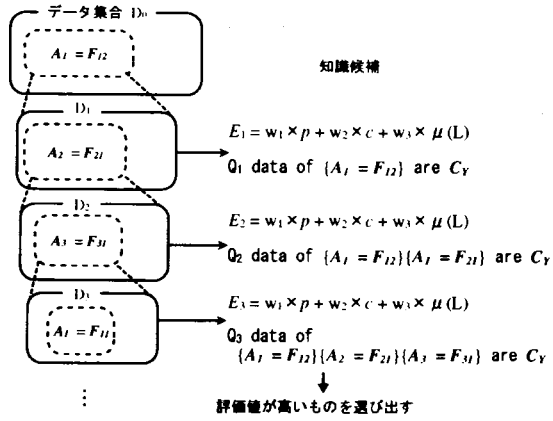


図 5: ファジィ集合の組合せの決定

以前のファジィID3 に基づく手法では獲得情報量を用いてファジィ集合を選択しており，それは出現率だけを利用しているのと同じで，カバー率については閾値を用いるのみであった．これでは，カバー率が閾値以上のものならば出現率のみでファジィ集合が決まってしまう．今回はカバー率に対して重みを与えることで，カバー率も考慮することができる．

3.2 ファジィ集合の組合せ

ここでは，式 (1) で定義した評価値 E を用いて限定に使用するファジィ集合の組合せを決定する．

図 4 のような，ファジィ集合の組合せにより限定していく場合について考えよう．このとき，限定を重ねるにつれ，D_i における C_Y が割合を増加するようにデータを限定している (明らかにカバー率 c と限定するファジィ集合の数 L に対する評価 $\mu(L)$ は減少する)．例えば，図 5 のように，最初のノードで D_0 を $A_1 = F_{12}$ で限定したデータ D_1 は，あるファジィ量限定子 Q_1 を用いて，

$$Q_1 \text{ data of } \{A_1 = F_{12}\} \text{ are } C_Y$$

という形で表現できる．さらに，この集合 D_1 を $A_2 = F_{21}$ について限定したデータ D_2 は，あるファジィ量限定子 Q_2 を用いて，

$$Q_2 \text{ data of } \{A_1 = F_{12}\}\{A_2 = F_{21}\} \text{ are } C_Y$$

と表現できる．このような組合せから出現率が閾値 θ_p 以上となるものの中で評価値 E が最大となるものを知識候補とする．

以上のことを行なうアルゴリズムは次のようになる．

1. 知識として説明したいクラスを C_Y とし，各属性が持つすべてのファジィ集合の集合を A とする．
2. データ集合 D に対して，集合 A に含まれるすべてのファジィ集合に対して評価値 E を算出し，C_Y の出現率が限定前に比べて増加し，カバー率が閾値 θ_c 以上のファジィ集合の中で，E が最大となるものを求める．これが次に限定するファジィ集合になる．そして，D を限定したデータ集合を新たに D とする．
3. 停止条件を満たした場合は終了し，そうでなければ，2 において使用した属性の持つファジィ集合を A から削除し 2 へ戻る．

停止条件は次のものを用いる．

a. クラス C_Y の出現率が 1 となったとき
b. 限定条件の数がユーザが定めた値を超えたとき
c. クラスを説明するためにすべての属性を使用したとき
d. 限定後に C_Y の出現率が増加しなくなったとき

3.3 ファジィ量限定子の決定

ここでは，抽出されたファジィ集合の組合せにより限定されたデータ D_k をどのファジィ量限定子を用いて表現するのが良いかを考える．これは

1. ファジィ量限定子の確信度 μ_q
2. ファジィ量限定子の評価 E_q

の 2 つを用いて評価し，使用するファジィ量限定子を決定する．

第一の評価項目は，使用するファジィ量限定子に対するデータ D_k におけるクラス C_Y 出現率 p の確信度を示す．図 3 の more than about 50%, most, almost all などに対するクラス C_Y の出現率 p のメンバーシップ値である．

第二の評価項目は，ファジィ量限定子自体に対する評価で，どのファジィ量限定子を用いた知識が有効かを評価するものである．図 3 の 3 つのファジィ量限定子の例では more than about 50% よりも most を，most よりも all most を使った方が望ましい．そこで，本論文ではファジィ量限定子を定義するメンバーシップ関数のメンバーシップ値が 0.5 となる値 E_q を採用する．図 3 のファジィ量限定子では more than about 50%, most, all most の E_Q は，それぞれ，0.5, 0.7, 0.85 となる．

この二つの評価値を用いて

$$E_Q = \mu_q \times E_q$$

が最大となるファジィ量限定子を用いて知識を表現する．

3.4 複数の知識の抽出

先程抽出した知識以外にもクラス C_Y を説明するのに有効な知識があると考えられる．図4の組合せの場合，最初に $A_1 = F_{12}$ を選択しているが，$A_1 = F_{12}$ の次に高い評価をもつファジィ集合で限定すればよい．そこで，図6のように最初に選択されたファジィ集合をファジィ集合の候補 A から除いて，ファジィ集合の組合せを決定し知識を抽出する．このようにして抽出された知識は一番目の知識とは別の観点から見た知識と考えられる．

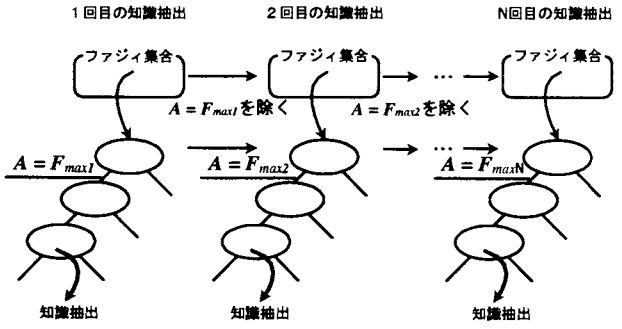


図 6: 複数の知識抽出の例

4. アヤメのデータによるシミュレーション

R.A. Fisher のアヤメのデータ [4] を用いてシミュレーションを行った．このデータは，3種類のアヤメについて4種類の属性を計測したもので，各種類50個ずつ，合計150個存在する．そして，4つの属性に対して，図1のようにファジィ集合 small，middle，large を定義した．ただし，図1におけるパラメータ a，b，c は表2のようにした．そして，図3のファジィ量限定子を用いて知識抽出を行った．ただし，p の閾値 $\theta_p = 0.5$，c の閾値 $\theta_c = 0.4$，E に対する重みは $w_1 = 0.4$，$w_2 = 0.2$，$w_3 = 0.4$ とした．その結果，

```
1. Almost all data of {Petal Length = small}
    are {class = C1} (Cf 1) (P 0.987) (C 0.946)
2. Almost all data of {Petal Width = small}
    are {class = C1} (Cf 1) (P 0.991) (C 0.901)
3. Most data of {Sepal Length = small}
    are {class = C1} (Cf 0.926) (P 0.823) (C 0.699)
-------------------------------------------------------------
4. Most data of {Petal Width = middle}{Petal Length = middle}
    are {class = C2} (Cf 0.926) (P 0.823) (C 0.878)
5. More than about 50% data of{Petal Length = middle}
    are {class = C2} (Cf 0.994) (P 0.634) (C 0.937)
-------------------------------------------------------------
6. Almost all data of {Petal Width = large}
    are {class = C3} (Cf 0.961) (P 0.922) (C 0.673)
7. Almost all data of {Petal Length = large}
    are {class = C3} (Cf 0.921) (P 0.910) (C 0.514)
```

の7つの知識が抽出された．ここで，Cf は使用するファジィ量限定子に対する確信度，P は出現率，C はカバー率である．

表 2: ファジィ集合のパラメータ

属性名	a	b	c
A_1 = Sepal Length	4.5	6	8
A_2 = Sepal Width	2	3	4.5
A_3 = Petal Length	1	4	7
A_4 = Petal Width	0	1.2	2.5

抽出されたこれらの知識から，アヤメは2つの属性により，種類の分類がほぼ可能であることが分かる．また，従来の手法と比較すると，アヤメのデータにおいては1，2の知識抽出の順番，そして3の知識ではデータを限定するファジィ集合の数に違いが現れた．

これは評価にカバー率を加えたことにより，ファジィ集合の知識抽出の際の優先度が変わったためで，1，2ではカバー率の差に比べて出現率があまり変わらなかったために知識抽出の順番が変わったと考えられる．また，3では，さらに限定したデータでは出現率は少し増加したが，カバー率が低下したため一つのファジィ集合のみで限定された知識が抽出された．

5. おわりに

本論文では，量限定子を持つファジィルール抽出法における評価値の変更・改良を行った．今後はカバー率が低い知識に対する対応を予定している．

参考文献

[1] G.P. Shaporo and W.J. Frawley: *Knowkedge Discovery in Database*, AAAI/MIT Press (1991)

[2] 馬野 元秀, 岡田 貴祐, 鳩野 逸生, 田村 坦之：「データベースからのファジィ知識の発見」, 第23回知能システムシンポジウム資料, pp.13–18 (1996)

[3] 馬野 元秀, 岡本 宏隆, 鳩野 逸生, 田村 坦之：「ID3に基づくファジィ・ルールの抽出とその推論法」, ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.857–860 (1994)

[4] R.A. Fisher:"The Use of Multiple Measuremants in Taxonomic Problems" *Annals of Eugenics*, Vol.7, No2, pp.107–188 (1936)

[問い合わせ先]
〒599–8531 堺市学園町 1 – 1
大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
馬野 元秀
TEL: 072–254–9675
FAX: 072–254–9930
Internet: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

区間型ルール集合による識別器とファジィ識別器との性能比較

Performance comparison between interval rules and fuzzy rules in classification systems

○難波　聡　　山本　隆　　石渕　久生
Satoshi Namba　　Takashi Yamamoto　　Hisao Ishibuchi

大阪府立大学　大学院工学研究科
Osaka Prefecture University

Abstract: This paper compares the performance of interval rule-based classification systems with that of fuzzy rule-based classification systems on real-world data sets. In this study, interval rules are generated using entropy measure. Each of the classification systems is designed by our genetic rule selection method. The rule selection method is a two-stage approach. First, a pre-specified number of candidate rules are extracted from numerical data using a data mining technique. Then, an evolutionary multiobjective optimization algorithm is used for finding non-dominated rule sets with respect to three objectives: to maximize the number of correctly classified training patterns, to minimize the number of selected rules, and to minimize the total rule length.

1　はじめに

学習システムを用いて識別器の設計を行う場合，学習用データに対する性能の最大化だけに重点を置くと，学習用データへの過剰適合によって識別器の汎化能力の低下を招くおそれがある．近年，このような過剰適合を防ぐために，識別器の性能と複雑性を同時に考慮した識別器の設計方法が研究されている．

Ishibuchi & Yamamoto[1] では，識別器の設計問題が正しく識別される学習用データの数の最大化，識別器を構成するルールの数の最小化，そしてルールの長さの総和の最小化の3目的最適化問題として扱われ，識別器の性能と複雑性に関するトレードオフをもつ非劣解集合が進化型多目的最適化手法によって探索されている．

本研究では，区間型ルールに基づく識別器とファジィルールに基づく識別器の性能比較を行う．本研究で扱う識別器は，文献[1] と同様の3目的ルール選択手法によって獲得される．また，区間型ルールの条件部で用いられる区間集合は，Elomaa & Rousu[2] における連続値属性に対する分割手法によって生成される．

2　識別システム

本研究では，以下の形式のルールを用いる．

$$\text{Rule } R_q: \text{If } x_1 \text{ is } A_{q1} \text{ and } \ldots \text{ and } x_n \text{ is } A_{qn} \text{ then Class } C_q \text{ with } CF_q \quad (1)$$

ここで，R_q はルールのラベル，$\mathbf{x}=(x_1,\ldots,x_n)$ は n 次元入力データ，$\mathbf{A}_q=(A_{q1},\ldots,A_{qn})$ はルールの条件部集合，C_q はルールの結論部クラス，CF_q はルールの確信度である．本研究では，条件部集合としてファジィ集合と区間集合の2種類を考えることにする．ルールの結論部クラスと確信度は，あらかじめ与えられている学習用データ集合 $\mathbf{x}_p$，$p=1,\ldots,m$ を用いて決定される．ここで，与えられるデータの全ての属性値は，一般性を欠くことなく，区間[0,1] に正規化されているものとする．また，ルールの条件部集合 $\mathbf{A}_q$ に対する入力データ $\mathbf{x}=(x_1,\ldots,x_n)$ の適合度を以下の積演算により定義する．

$$\mu_{A_q}(\mathbf{x})=\mu_{A_{q1}}(x_1)\cdot\ldots\cdot\mu_{A_{qn}}(x_n) \quad (2)$$

ここで，$\mu_{A_{qi}}(\cdot)$ は A_{qi} のメンバシップ関数である．

まず，ルールの結論部クラスを決定するために，次の式に従って信頼度を計算する．

$$c(\mathbf{A}_q \Rightarrow \text{Class } h)=\frac{\sum_{\mathbf{x}_p\in \text{Class } h}\mu_{A_q}(\mathbf{x}_p)}{\sum_{p=1}^{m}\mu_{A_q}(\mathbf{x}_p)} \quad (3)$$

ルールの結論部クラスは，式(3) の最大値を与えるクラスに決定する．

$$c(\mathbf{A}_q \Rightarrow \text{Class } C_q)=\max_{h=1,2,\ldots,M} c(\mathbf{A}_q \Rightarrow \text{Class } h) \quad (4)$$

ここで，M はクラスの数である．

次に，ルールの確信度は次の式により求められる．

$$CF_q=c(\mathbf{A}_q \Rightarrow \text{Class } C_q)-\sum_{\substack{h=1\\ h\neq C_q}}^{M} c(\mathbf{A}_q \Rightarrow \text{Class } h) \quad (5)$$

入力データ $\mathbf{x}$ は，適合度と確信度の積が最大となるルール R_W によって識別される．

$$\mu_{A_W}(\mathbf{x})\cdot CF_W=\max\{\mu_{A_q}(\mathbf{x})\cdot CF_q \mid q=1,\ldots,N\} \quad (6)$$

ここでNは識別器に含まれるルールの数である.

以下に，区間型ルールとファジィルールの条件部集合について説明する.

(1) 区間型ルール

本研究では，区間型ルールの条件部区間集合を生成するために，文献[2]の連続値に対する分割手法を用いて，属性ごとにエントロピーが最小となる閾値で学習用のデータ集合を分割する．分割数として2～5を用いるので，14種類の区間集合が生成される．本研究では，区間集合$\mathbf{A}_q=(A_{q1},...,A_{qn})$のメンバシップ関数を次のように定義する.

$$\mu_{Aqi}(x_i)=\begin{cases}1, & \text{if } T\le x_i\le T'\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases} \tag{7}$$

ここで，TとT'は区間A_{qi}の下限値と上限値である.

各属性に対して，14種類の区間と“*don't care*”を合わせた15種類の条件部集合をルールの条件部に用いる.

(2) ファジィルール

全ての属性に対して，図1に示す4種類のファジィ分割から生成される14種類の三角型ファジィ集合を用いる．これに“*don't care*”を合わせた15種類の集合をルールの条件部として用いる.

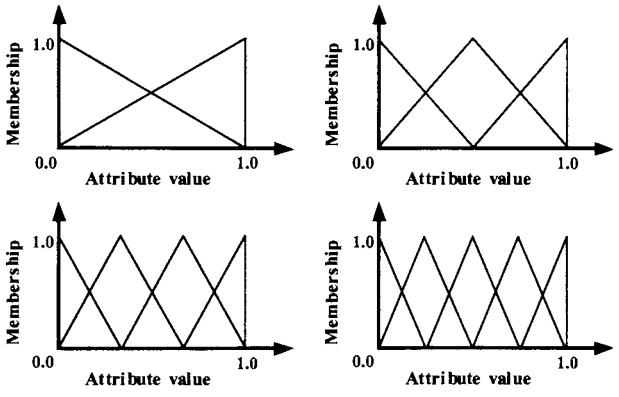


図1　4種類のファジィ分割

3 多目的遺伝的ルール選択

3.1 候補ルールの生成

一般に，n次元データの各属性に対してK種類の条件部集合を用いる場合に生成可能なルールの総数はK^n通りである．このため，高次元のデータ集合に対して全ての組合せを調べることは効率的ではない.

本研究で用いるルール選択手法では，高次元データの識別問題にも適用できるように，識別に関係しない属性の条件部に“*don't care*”を用いることで，少数の条件部を持つルールのみ生成する．生成されたルールの中からデータマイニングの分野でよく用いられているルールの評価基準を用いて，結論部クラスごとに設定された数の候補ルールを選択する．本研究で用いるルール選択手法において，ルールの選択基準は次の式で与えられる.

$$f_{\text{SLAVE}}(R_q)=s(\mathbf{A}_q\Rightarrow\text{Class } C_q)-\sum_{\substack{h=1\\h\neq Cq}}^{M}s(\mathbf{A}_q\Rightarrow\text{Class } h) \tag{8}$$

ここで，$s(\cdot)$はルールの支持度であり，次の式で定義されている.

$$s(\mathbf{A}_q\Rightarrow\text{Class } h)=\frac{1}{m}\sum_{\mathbf{x}p\in\text{Class}h}\mu_{\text{A}q}(\mathbf{x}_p) \tag{9}$$

3.2 遺伝的ルール選択

候補ルールとしてN個のルールが選択されたとする．N個の候補ルールの部分集合は個体として扱われ，長さNのバイナリ記号列で表される.

$$S=s_1s_2...s_N \tag{10}$$

ここで，s_iはi番目のルールが選択されているか否かを表す0-1変数である.

ルール選択手法では，進化型多目的最適化アルゴリズム[3]に2つのヒューリスティック操作が加わる．1つは，個体が選択するルールを減らす方向へバイアスを加えた突然変異操作である．もう1つは，個体に含まれる不必要なルールを削除する操作である．この操作では，どの学習用データに対しても識別に用いられないルールを削除する.

4 数値実験

UCI ML Repositoryから入手可能であるデータ集合に対して，区間型識別器とファジィ識別器の性能比較を行った．表1に本研究で用いた6種類のデータ集合を示す.

以下のパラメータ値を用いて遺伝的ルール選択を行い，3.1節の候補ルール生成法により得られたN個の候補ルールによって構成されるルール集合から，3目的ルール選択問題に対する非劣解集合の探索を行った.

表1　数値実験に用いたデータ集合

データ集合	属性の数	データの数	クラスの数
乳ガン	9	683*	2
糖尿病	8	768	2
ガラス	9	214	6
心臓病	13	297*	5
ソナー	60	208	2
ワイン	13	178	3

*欠測値を含まないデータの数

終了条件	: 5000 世代	
個体群のサイズ	: 200	
個体の長さ	: $300\times M$	
交叉確率	: 0.8	
突然変異確率	: 0.1	$(1\rightarrow 0)$
	$1/N$	$(0\rightarrow 1)$

ここで，M はクラスの数である．

異なるデータ分割での10 回繰り返し10CV 手法を用いて，各データに対する識別性能の評価を行った．

5 実験結果

図2 に乳ガンデータに対する識別結果を示す．評価用データに対して，区間型はルール数が増加するにつれて識別器の汎化能力が向上しているが，ファジィではそれほど変化が見られなかった．しかし，ルール数が2 のファジィ識別器により評価用データに対して誤識別率3.46% が得られたのに対し，区間型ではルール数が増えても，誤識別率は4.23% であった．

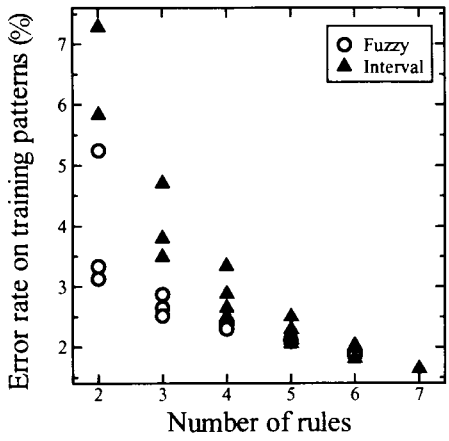
次に，糖尿病データに対する識別結果を図3 に示す．この図から，学習用データに対しては区間型識別器がかなり良い性能を示していることがわかる．また評価用データに対しても，より多くのルールからなる区間型識別器で，ファジィ識別器よりも低い誤識別率が得られることがわかる．さらに，区間型ではファジィよりも多数の識別器が得られた．

ガラスデータに対する識別結果を図4 に示す．ガラスデータに対しては，糖尿病データに対する結果とほぼ同様の結果が得られた．

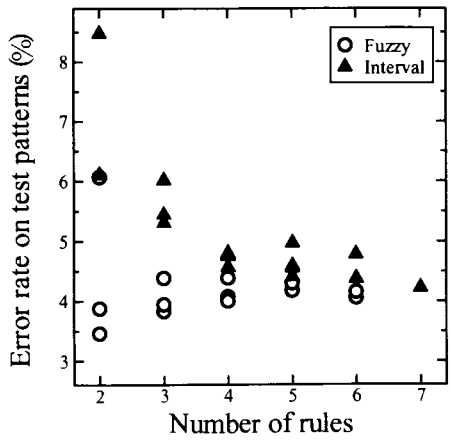
図5,6,7 はそれぞれ，心臓病，ソナー，ワインデータの評価用データに対する誤識別率を示している．紙面の都合により，学習用データに対する識別結果は省略する．これらのデータ集合に対して，区間型識別器はファジィ識別器に誤識別率とルール数の両方の点で劣っていた．

6 おわりに

本研究では，識別器の精度と複雑性を同時に考慮したルール選択手法によって得られるファジィ識別器と区間型識別器の性能を比較した．ファジィルールの条件部ファジィ集合として三角型ファジィ集合を用いた．一方，区間型ルールの条件部には，エントロピーの最小化に基

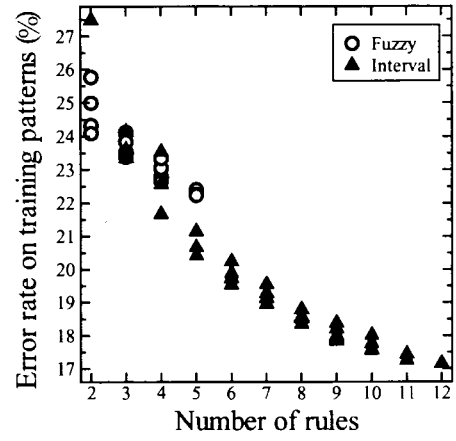


(a) 学習用データに対する誤識別率

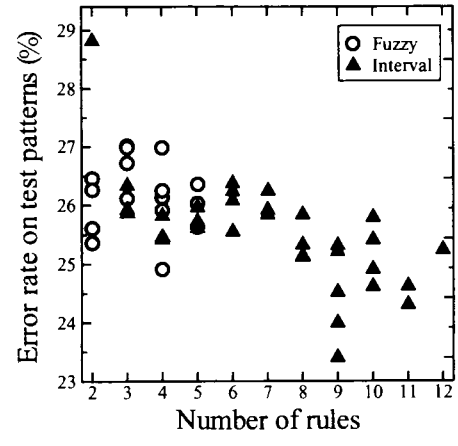


(b) 評価用データに対する誤識別率

図2 乳ガンデータに対する識別結果



(a) 学習用データに対する誤識別率

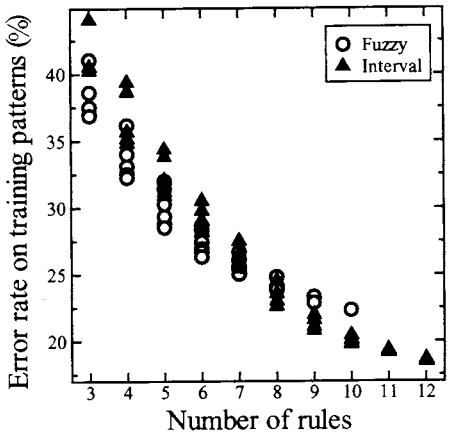


(b) 評価用データに対する誤識別率

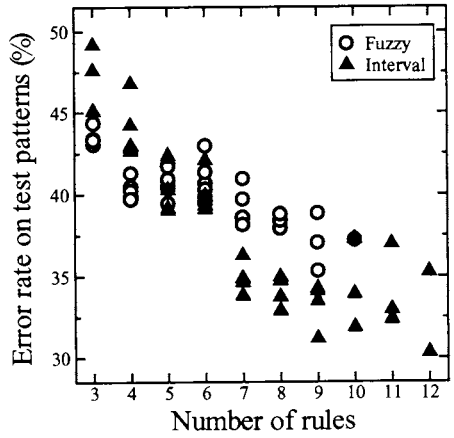
図3 糖尿病データに対する識別結果

づいて分割した区間集合を用いた．実データ問題に対して数値実験を行った結果，一部のデータ集合に対して区間型識別器がファジィ識別器よりも良い性能を示すことがわかった．しかし同時に，複雑性の点で区間型識別器がファジィ識別器より少し劣ることが示された．

また，6種類のデータ集合に対する数値実験を通して，ファジィ識別器よりも区間型識別器の方が非常に多数の識別器を獲得できることを示した．



(a) 学習用データに対する誤識別率



(b) 評価用データに対する誤識別率

図4　ガラスデータに対する識別結果

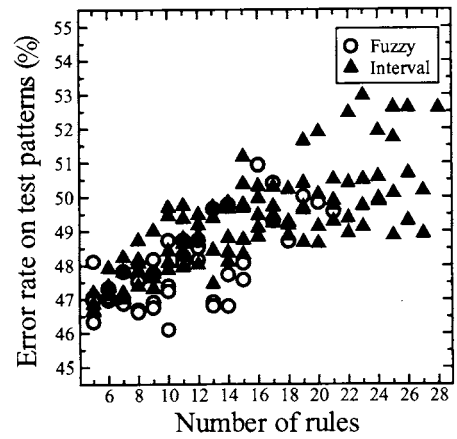


図5　心臓病データに対する識別結果（評価用）

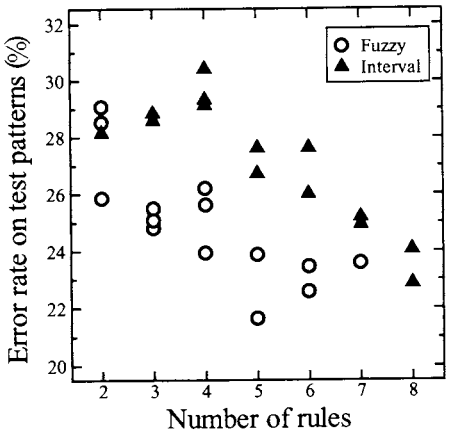


図6　ソナーデータに対する識別結果（評価用）

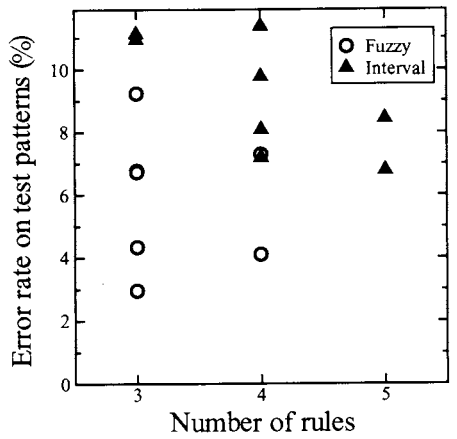


図7　ワインデータに対する識別結果（評価用）

参考文献

[1] H. Ishibuchi and T. Yamamoto, "Effects of Three-Objective Genetic Rule Selection on the Generalization Ability of Fuzzy Rule-based Systems," *Proc. of 2nd International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, pp. 608-622, April 8-11 (2003).

[2] T. Elomaa and J. Rousu, "General and Efficient Multi-splitting of Numerical Attributes," *Machine Learning*, vol. 36, pp. 201-244 (1999).

[3] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A Fast and Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 6, pp. 182-197 (2002).

[問い合わせ先]
〒599-8531　堺市学園町 1-1
大阪府立大学　大学院工学研究科
石渕　久生
TEL: 072-254-9350
FAX: 072-254-9915
E-mail: hisaoi@ie.osakafu-u.ac.jp

ファジィ決定木による製品の使いやすさと魅力の解析
- ゴルフクラブの打ちやすさと好みに関するルールの抽出 -

Fuzzy Decision Tree Analysis To Investigate What Has An Influence on Facility and Preference with Products
- Making Up The Rules for Ease-Of-Hitting and Preference of Golf Club -

徳丸 正孝　村中 徳明　今西 茂
Masataka Ttokumaru　Noriaki Muranaka　Shigeru Imanishi

関西大学 工学部
Faculty of Engineering, Kansai University

Abstract: In recent years, a constructor is required to develop a product which is not only highly efficient and functional, but also attractive and easeful for users. It is difficult for constructors to investigate which part and element of product is closely related to attraction and ease-of-use with products. So we propose a method to investigate that relation with Fuzzy C4.5 decision tree. In this paper, we examined variation in sensitivity of player's hitting golf balls with variable golf clubs. They answered the feeling of hitting with a golf club with SD method and we got some rules to judge the ease-of-hitting and preference with golf club.

1. はじめに

近年，製品の企画や設計において，定量的に評価できる性能値のみでなく，その魅力や使いやすさが重要視されるようになった．このため，魅力ある製品の分析や，使いやすい製品の設計を行うための工学的技術，すなわち魅力工学や人間工学に基づいた製品設計手法が盛んに行われてきた．これらの手法では，既存の多くの製品について，被験者が魅力的に感じるか，あるいは使いやすく感じるかなど，被験者の感性に関わる評価をアンケートにより調査し，それらの回答と製品の様々な物理量との関係を解析している．著者らは文献[1]において，C4.5決定木により製品の使いやすさと魅力を分析する手法を提案し，適用例としてゴルフクラブの「打ちやすさ」について分析を行った．さらに本研究では，堀ら[2]が提案したファジィC4.5を用いて，アンケートの回答に内在する曖昧性を考慮した，より詳細な分析を行う．

2. ゴルフクラブの試打実験

本実験では，市販されているゴルフクラブについて，クラブの特徴を表す36種類の物理量を計測し，なるべくスペックが異なるようにして選出した11本のドライバー（1番ウッド）を用いて試打アンケートを実施した．今回の調査では，なるべく正確な評価が行われるようにするため，ゴルフ上級者20名を被験者とした．試打アンケートは屋外ゴルフ練習場にて実施した．被験者は各ドライバーについて，実際に数回球を打ち，そのドライバーの印象についての感性評価を7段階のSD法で回答してもらった．

一般に試打によるゴルフクラブの感性評価では，打球という行為における一連の動作が全て関係していると考えられる．つまり，被験者は球を打つ瞬間の感触のみでなく，バックスイングや振りはじめの感触，さらには打球時の音質などの様々な要素によってクラブを評価していると考えられる．そこで，アンケートに用いた感性評価項目には，クラブの寸法に関連した「長さ（長い⇔短い）」や「重さ（重い⇔軽い）」，打球に直接関係する「インパクトのタイミング（取りやすい⇔取りにくい）」や「シャフトの剛性（しっかり感がある⇔頼りない）」などに加え，「打球音質（良い⇔悪い）」や「飛距離安定性（安定する⇔不安定）」など，打球という行為の結果生じる要素に関しても項目に採用した．アンケートに用いた感性評価項目は全部で24種類である．感性評価項目の中には，本研究の目的である製品の「使いやすさ」を調査するための項目も含まれている．今回実験に採用した製品であるゴルフクラブは，その用途は球を打つことであるので，「ゴルフクラブの使いやすさ」を表す指標として感性評価項目「打ちやすさ（打ちやすい⇔打ちにくい）」を採用した．

試打は，5分間自由に打球してもらい，5分後に24個の項目について回答してもらった．試打の順序や疲労による体力や評価能力の変化を考慮して，各被験者とも11本のドライバーのうち4本を2回試打してもらった．つまり，アンケート回答事例数は被験者20名×ドライバー15本の合計300事例である．これらの事例に基づいて，ゴルフクラブの「打ちやすさ」の解析を行う．

3. ファジィC4.5による「打ちやすさ」の解析

C4.5は，J.R.Quinlanによって提案された決定木作成アルゴリズムである[3]．本手法は，事例を分割した際の利得比が最大となる属性で事例を分割していくものであり，比較的シンプルな木が作成されることが知られている．いま，訓練事例の集合をT，属性をX_pとする．ある属性Aに着目し，属性Aとその他の属性との関連を調べるとき，属性Aを決定属性，その他の属性を評価属性という．例えば，本研究においては，「打ちやすさ」の解析の場合，属性「打ちやすさ」が決定属性，その他の感性評価項目が評価属性となる．決定属性Aの取りうる値がk個の場合，値iをと

る事例の集合をクラスC_i(i:1～k)とする．評価属性X_pの属性値がn個の値を取るとすると，訓練事例の集合Tは，評価属性X_pにより$T_1,T_2,...,T_n$の部分集合に分割される．アンケートにおける各属性の回答値は1～7の7段階であるので，任意の閾値により属性値を幾つかのクラスに分割する必要がある．C4.5による分析では，7段階の属性値を3個のクラスに分け，アンケートの回答値1～3を+，4を0，5～7を-と表現していた．例えば，評価属性「シャフトの剛性」においては，+が「しっかり感がある」，-が「頼りない」を意味し，0が「どちらでもない」を表していた[1]．しかし，この方法ではアンケートの7段階の回答が充分に反映されておらず，回答の曖昧性についても考慮されていない．この問題を解決するために，本研究ではファジィC4.5により各属性の分割クラスをファジィ集合化している．決定属性のクラス「打ちやすい」，「打ちにくい」，「どちらでもない」に対する各データの確信度は図1に示すメンバーシップ関数により求められる．つまり，属性「打ちやすさ」の回答値が2である事例は，クラス「打ちやすい」に属する確信度0.66の事例と，クラス「どちらでもない」に属する確信度0.33の事例という2個の事例として扱われる．

事例の集合Sについて，クラスC_iに属する事例の確信度の和を$freq(C_i,S)$とし，集合Sに含まれる事例の確信度の和を$|S|$と表す．このとき，集合Sのエントロピー$info(S)$は，次式で与えられる[3]．

$$info(S) = -\sum_{i=1}^{k}\left\{\frac{freq(C_i,S)}{|S|}\times\log_2\frac{freq(C_i,S)}{|S|}\right\}\ (bit) \quad (1)$$

したがって，訓練事例の集合Tについて(1)式を適用することで，集合Tのエントロピー$info(T)$が求まる．$info(T)$は，集合Tに含まれる任意の事例が属するクラスを特定するのに必要な情報量の平均値となる．

また，属性X_pによって事例が分割された場合のエントロピーを$info_{X_p}(T)$とするとき，部分集合上での荷重平均により次式で表される．

$$info_{X_p}(T) = \sum_{j=1}^{n}\frac{|T_j|}{|T|}\times info(T_j) \quad (2)$$

ただし，T_jがファジィ集合のとき，各事例が集合T_jに属する度合いは図1と同様にメンバーシップ関数で表される．このとき，事例の確信度は，各事例の分類前の確信度の値と属性値がT_jに属する度合いとの積で与えられる．

属性X_pで分割されることによる情報量利得$gain(X_p)$は次式で表される．

$$gain(X_p) = info(T) - info_{X_p}(T) \quad (3)$$

C4.5では，任意の事例が属するクラスを特定するための情報量ではなく，分割結果自体を伝達するために必要な情報量である利得比基準を採用している．属性X_pで事例の集合Tが分割された場合の分割情報量$split\ info(X_p)$は次式で表される．

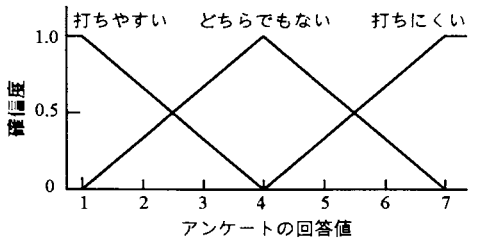


図1: 属性「打ちやすさ」のメンバーシップ関数

$$split\ info(X_p) = -\sum_{j=1}^{n}\frac{|T_j|}{|T|}\times\log_2\left(\frac{|T_j|}{|T|}\right)\ (bit) \quad (4)$$

これは，集合Tをk個の部分集合に分割したときの全情報量である．一方，情報量利得は，クラス分割に役立つ情報量の割合を表すので，情報量利得$gain\ ratio(X_p)$は次式で表される

$$gain\ ratio(X_p) = gain(X_p)/\ split\ info(X_p) \quad (5)$$

C4.5では，情報量利得$gain\ ratio(X)$を最大にする属性で集合Tを分割する．さらに，分割後の部分集合$T_1,T_2,...,T_n$のそれぞれについて，上位の枝において採用された属性以外の属性で分割し，同様の手順で分割属性を選出する．分割された部分集合に含まれる事例が属するクラスが，全クラスに対して一定の割合を占める場合に葉節点となる．

以上の手順により，ゴルフクラブの打ちやすさおよび好みについての解析を行った．解析には，無回答項目を含んでいないアンケートの回答273事例を用いた．葉節点の生成条件は，木節点の全クラスに対し，任意のクラスが70%以上を占めるときに，そのクラスの葉節点とした．この結果，クラス「打ちやすい」に関して20個のルールが作成された．

4. まとめ

本稿では，ファジィC4.5を用いて製品の使いやすさと魅力を解析する手法を示し，実例としてゴルフクラブの打ちやすさと好みについての解析を行った．

参考文献

[1] 徳丸 正孝 他:「決定木による製品の使いやすさと魅力の解析」，日本感性工学会 感性工学研究論文集，Vol.2, No.2, pp.65-72, 2002.

[2] 堀 和憲 他：「ファジィ決定木生成法 ファジィC4.5とその改良」，第15回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.515-518, 1999.

[3] Quinlan, J. R. : C4.5: Program for Machine Learning, Morgan Kaufmann Publishers, 1993.

[問い合わせ先]
〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-36
関西大学 工学部 電子工学科
徳丸 正孝
Tel: 06-6368-0883 , Fax: 06-6388-8843
E-mail : toku@ipcku.kansai-u.ac.jp

ラフ集合の種々の近似概念を用いた知識獲得及びファジィ判別分析

Knowledge Acquisition Using Several Approximation Concepts of Rough Set and Fuzzy Discrimination Analysys

○水口 不比等　　水本 雅晴
Fuhito MIZUGUTI　　Masaharu MIZUMOTO

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

Abstract

In this paper, we suggest a way of knowledge acquisition using several approximation concepts of rough set. And we apply it to diabetes diagnosis data, make fuzzy discrimination analysys and show that we obtained better results than the previous method.

1　はじめに

エキスパートシステムを構築する際に必要となる知識獲得において、データベースなどに蓄積された膨大なデータからいかに知識を抽出するかが重要な問題となる。ラフ集合理論は近年このような知識獲得の分野で注目されている手法の1つである。

従来までの研究ではファジィ判別分析に使用するルールを簡約するためにラフ集合理論に基づいた知識獲得手法によって極小解を導き出してきたが、未知データを判別する際、極小解では不十分であると思われる。そこで、本研究ではファジィ判別分析における正判別率向上のためにラフ集合の近似概念を利用した知識獲得方法を提案し、糖尿病診断データに応用したファジィ判別分析の結果を示す。

2　ラフ集合

ラフ集合 [1] (rough set) の概念は Z.Pawlak により、集合の分類あるいは集合の表現に関するあいまいさを取り扱うために提案されたものである。簡単にラフ集合に関する基本的な概念や性質の説明を行うと以下のようになる [2]。

全体集合 U が同値関係 $R(R \subseteq U \times U)$ により、k 個の同値類 $E_1, E_2, \cdots, E_k$ に直和分割されているとする。このとき、$\tilde{U} = (U, R)$ を近似空間、E_i を基本集合と呼ぶ。また、有限個の基本集合の和集合を定義可能集合と呼ぶ。いま全体集合 U の部分集合 X が与えられたとき、X を近似することを考える。このとき、X の上からの近似 $\mathrm{Apr}^*(X)$ と下からの近似 $\mathrm{Apr}_*(X)$ が次のように定義される。

$$\mathrm{Apr}^*(X) = \{E_i : E_i \cap X \neq \phi\} \quad (1)$$

$$\mathrm{Apr}_*(X) = \{E_i : E_i \subseteq X\} \quad (2)$$

$\mathrm{Apr}^*(X)$、$\mathrm{Apr}_*(X)$ をそれぞれ上近似 (upper approximation)、下近似 (lower approximation) と呼ぶ。$\mathrm{Apr}^*(X)$ は部分集合 X を包含する最小の定義可能集合であり、X の要素として類別され得る (possibly) 集合を表す。一方、$\mathrm{Apr}_*(X)$ は X に包含される最大の定義可能集合であり、X の要素として確実に (certainly) 類別される集合を表す。

また、これら二つの近似の概念には次の性質が成立する。

$$\mathrm{Apr}_*(X) \subseteq X \subseteq \mathrm{Apr}^*(X) \quad (3)$$

ラフ集合では、二つの近似の概念以外にも、種々の概念が定義されている。例えば、二つの近似の間の境界領域 (boundary region) $\mathrm{Bnd}(X)$、負領域 (negative region) $\mathrm{Neg}(X)$、正領域 (positive region) $\mathrm{Pos}(X)$ が次のように定義される。

$$\mathrm{Bnd}(X) = \mathrm{Apr}^*(X) - \mathrm{Apr}_*(X) \quad (4)$$

$$\mathrm{Neg}(X) = U - \mathrm{Apr}^*(X) \quad (5)$$

$$\mathrm{Pos}(X) = \mathrm{Apr}_*(X) \quad (6)$$

3　ラフ集合による知識獲得

ここではラフ集合の下近似の概念に基づいた知識獲得方法として極小決定アルゴリズム (minimal decision algorithm) の流れをまとめておく [3]。

1. 情報システムの矛盾を求める
   - すべての条件属性における属性値が同じかつ決定属性が異なるルールの検索
2. 条件属性の縮約を求める
   - 不要な条件属性の削除
3. 核値の計算を求める
   - ルールにおける不可欠な属性値を核値という。
4. ルールの縮約を求める
   - 無矛盾かつ独立（全ての属性が不可欠）であるルールの導出

4 ファジィ判別分析

ここでは通常のデータが与えられたとき、このデータからファジィIF-THEN ルールによって未知のデータを判別する方法について述べる。ファジィIF-THEN ルールによる判別分析をファジィ判別分析という [4]。

今、以下に示すような通常の3つの推論ルールがあるとする。

$$\begin{aligned} &\text{IF } q1 \text{ is } 1 \text{ and } q2 \text{ is } 1 \text{ THEN } X_1 \\ &\text{IF } q1 \text{ is } 1 \text{ and } q2 \text{ is } 3 \text{ THEN } X_1 \\ &\text{IF } q1 \text{ is } 2 \text{ and } q2 \text{ is } 3 \text{ THEN } X_2 \end{aligned} \tag{7}$$

この推論ルールを図示すると図1のようになる。

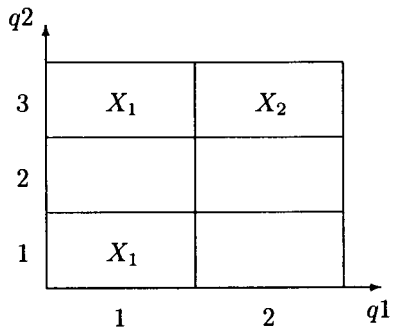


図 1: 3つのルール

3つのルールを2次元上に表示すると、明らかに図1から、ルールが存在しない空間が存在する。したがって3つのルールだけでは不十分である。そこで、ルールの前件部を図2に示す式 (8) の指数型メンバーシップ関数に置き換えて2次元空間全体を覆うことにする。

このように、区間をファジィ区間にすることによって、ルールが全空間を覆うことができる。式 (7) のルールがファジィ化され、次のように表すことができる。

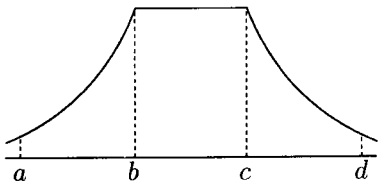


図 2: ファジィ区間のメンバーシップ関数

$$\mu(x) = \begin{cases} 10^{(x-b)/(b-a)} & (x < b) \\ 1 & (b \le x \le c) \\ 10^{(x-c)/(c-d)} & (c < x) \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} &\text{IF } q1 \text{ is } \tilde{1} \text{ and } q2 \text{ is } \tilde{1} \text{ THEN } X_1 \\ &\text{IF } q1 \text{ is } \tilde{1} \text{ and } q2 \text{ is } \tilde{3} \text{ THEN } X_1 \\ &\text{IF } q1 \text{ is } \tilde{2} \text{ and } q2 \text{ is } \tilde{3} \text{ THEN } X_2 \end{aligned} \tag{9}$$

そして、ファジィIF-THEN ルールに対する適合度を求め、ファジィ推論によって求められた推論値が属するクラスを判定することによって判別分析を行うのがファジィ判別分析である。

5 本手法による知識獲得

ここで、従来までの下近似による知識獲得手法とは異なり、上近似や通常の集合論を用いた知識獲得手法 [5] が考案されていることから、本研究においても同様に上近似や集合論を用いた知識獲得手法を提案する。

本研究ではルールの縮約において、独立であるルールの集合を近似することを考える。その上近似は独立であり得るルールの集合、つまり不可欠な属性が存在するルールの集合となり、下近似は確実に独立であるルールの集合、つまり従来までと同じすべての属性が不可欠であるルールの集合となる。

また、上近似と下近似が与えられると式 (4)、式 (5) より境界領域と負領域が計算できる。つまり、境界領域においては無矛盾かつ上近似の知識から下近似の知識を除いたルールの集合となり、知識の全体集合をルールの縮約を求める際に発生する全てのルールの集合と定義すると、負領域の知識は全体集合から上近似の知識を除いた知識、つまり矛盾もしくはすべての属性が不要であるルールの集合となる。

ここで、それぞれの近似空間に対応した知識をまとめると次のようになる。なお、正領域は下近似に等しいので、本研究では考慮しない。

- 上近似：無矛盾かつ不可欠な属性が存在するルールの集合
- 下近似：無矛盾かつ全ての属性が不可欠であるルールの集合
- 境界領域：無矛盾かつ下近似の条件を満たさない上近似のルールの集合
- 負領域：矛盾もしくは全ての属性が不要であるルールの集合

また、集合論の観点から、それぞれの近似空間の補集合に対する知識の獲得を考案した。本研究では、それぞれの近似空間に対する補集合の知識を以下のように定義した。

- 上近似の補集合：無矛盾かつ全ての属性が不要であるルールの集合
- 下近似の補集合：無矛盾かつ不要な属性が存在するルールの集合
- 境界領域の補集合：下近似もしくは負領域に属するルールの集合
- 負領域の補集合：無矛盾かつ不要な属性が存在するルールの集合（＝下近似の補集合）

以上のような知識をルールの縮約の計算で求めることが本研究で提案する知識獲得手法である。

6 糖尿病診断データへの応用

ここでは糖尿病診断データ [6] に対して、本手法による知識獲得方法を応用し、得られたルールによってファジィ判別分析を行った結果を示す。本研究で使用した糖尿病診断データは5変数、3群、データ数145個であり、変数の詳細を以下に示す。

- 相対体重 ：体重を理想体重で割った相対比として表したもので肥満の程度を表す。相対体重＝体重/理想体重 ×100%
- 空腹時血糖値：空腹時の血糖値
- ブドウ糖値：ブドウ糖を空腹時に負荷し、3時間の間に30分間隔で採血し、その血液中に含まれる血漿ブドウ糖値を記録する。そのデータから横軸方向に時間、縦軸に血漿ブドウ糖値の値を記録した折れ線グラフを書き、そのグラフの下方面積を求めた値。
- インシュリン値：ブドウ糖を空腹時に負荷し、3時間の間に30分間隔で採血し、その血液中に含まれる血漿インシュリン値を記録する。そのデータから横軸方向に時間、縦軸に血漿インシュリン値の値を記録した折れ線グラフを書き、そのグラフの下方面積を求めた値。
- SSPG：一定量のインシュリンとブドウ糖を静脈に注射し、平衡状態に達したときの血漿ブドウ糖値。

また、3群の判別は次のような基準に従い分けられている。

- 第1群：臨床的糖尿病群を示し、空腹時の血液中に存在する血漿ブドウ糖値が110mg/dl以上ある患者。データ数は33個。
- 第2群：化学的糖尿病群を示し、ブドウ糖を負荷し、1時間後に血液中に存在する血漿ブドウ糖値が185mg/dlかつ2時間後に140mg/dl以上ある患者。データ数は36個。
- 第3群：正常群を示し、健康な患者の群。データ数は76個。

本研究では73個のデータをルール獲得用の教師データとし、残り72個のデータをファジィ判別分析を行うための評価データとして使用した。そして、教師データに本提案手法による知識獲得を行い、得られたルールを使用し、評価データ、教師データに対してファジィ判別分析を行った結果を表1から表4に示す。なお、糖尿病診断データの情報システムは無矛盾になるように構築した。また、ルールの縮約に主眼をおいており、条件属性の縮約を考慮していない。これは条件属性を削除しても削除しなくとも、ファジィ判別分析の結果はさほど変化しないことが奈良 [7] により示されているためである。さらに、ファジィ推論において、メンバーシップ関数のパラメータは適当に決定し、全ての近似空間に同じメンバーシップ関数を用い、簡略化推論法によってファジィ推論を行った。なお、ラフ集合による知識獲得を行わずに73個のルールによってファジィ判別分析を行った場合、評価データに対して81.94%(59/72)、教師データに対して100.0%(73/73)の正判別率であった。

7 考察

表1から表4よりそれぞれの近似空間においてルール数、正判別率に違いがあることが分かる。正判別率については特に上近似や境界領域において、従来までの下近似による知識獲得手法よりも良好な判別結果を得ている。また、ルール数が多くなると下近似よりも正判別率が向上する傾向があるが、負領域や補集合のような我々の知的活動にそぐわないようなルールで判別分析を行った場合、正判別率は低くなっている。このようにファジィ判別分析を

表 1: 上近似、下近似のルール数と評価データ、教師データに対する正判別率

	上近似	下近似 (従来法)
ルール数	328	43
評価データ	94.44% (68/72)	86.11% (62/72)
教師データ	100.0% (73/73)	100.0% (73/73)

表 2: 境界領域、負領域のルール数と評価データ、教師データに対する正判別率

	境界領域	負領域
ルール数	285	376
評価データ	95.83% (69/72)	84.72% (61/72)
教師データ	100.0% (73/73)	95.89% (70/73)

表 3: 上近似、下近似の補集合に属するルール数と評価データ、教師データに対する正判別率

	上近似の補集合	下近似の補集合
ルール数	250	535
評価データ	84.72% (61/72)	93.06% (67/72)
教師データ	100.0% (73/73)	100.0% (73/73)

表 4: 境界領域の補集合、全体集合に属するルール数と評価データ、教師データに対する正判別率

	境界領域の補集合	全体集合
ルール数	419	704
評価データ	79.17% (57/72)	91.67% (66/72)
教師データ	95.89% (70/73)	100.0% (73/73)

行う際、推論を行うルールの集合が肝心であるといえる。

8 まとめ

本論文では、従来までの知識獲得方法にラフ集合の種々の近似概念を利用した知識獲得手法を提案し、その手法を糖尿病診断データに応用してファジィ判別分析を行った。その結果、従来までの知識獲得手法によるファジィ判別分析よりも良好な結果を示すことが明らかになった。

今後の課題として、それぞれの近似空間に対する他の知識の定義方法の提案、可変精度ラフ集合モデル [5] によるルール数の低減、遺伝的アルゴリズム等による情報システム、メンバーシップ関数の最適化などが挙げられる。これにより、極小解に近いルール数で、未知データに対する正判別率の向上が期待される。

参考文献

[1] Z.Pawlak： Rough Sets,*Int. J. of Information and Computer Sciences*, 11, 5, pp.341-356(1982)

[2] 水本 (編): 講座ファジィ「ファジィ集合」, pp.242-253, 日刊工業新聞社 (1992)

[3] 横森, 小林： ラフ集合と意思決定, リレー連載「ラフ集合-その理論と応用」第 3 回, 数理科学, No.375, pp.76-83(1994)

[4] 浅居, 田中 (編)： 講座ファジィ「ファジィOR」, pp.219-238, 日刊工業新聞社 (1993)

[5] 津本, 田中： ラフ集合と学習, リレー連載「ラフ集合-その理論と応用」第 5 回, 数理科学, No.377, pp.78-83(1994)

[6] D.F.Andrews and A.M.Herzberg： *Data - A Collection of Problems from Many Fields for the Students and Research Workers-*. Springer(1985)

[7] 奈良： ラフ集合を用いた糖尿病データに対するファジィ判別分析, 第 17 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.283-286(2001)

連絡先：

〒 572-8530
寝屋川市初町 18-8
大阪電気通信大学　情報工学専攻
水口 不比等
電話： 072-820-4569
Fax： 072-824-0014
Email： mizuguti@mzlab.osakac.ac.jp

カオス理論を用した脳統計解析における人工脳標本の臨床応用

Put the Software of cerebral statistical analysis ,which theory of Chaos into clinical practice

高橋　由武
Yoshitake Takahashi
大阪大学
Osaka University

吉岡　克則
Katunori Yoshioka
大阪大学
Osaka University

相馬　努
Tutomu Souma
大阪大学
Osaka University

村瀬　研也
Kenya Murase
大阪大学
Osaka University

松田　博史
Hiroshi Mathuda
国立精神・神経センター武蔵病院
National Center Hospital for Mental, Nervous, and Muscular Disorders, National Center of Neurology and Psychiatry

Abstract: We often use brain statistics analysis software, such as SPM(statistical-parametric-mapping) and eZIS(easy Z-score Imaging System), in the case of diagnosis, such as a denaturation disease Creation and the statistics design of a control group pose a problem in that case.
This time, we extracted the special feature of a control group and were taken as the category. It was assumed that the category followed the theorem of a two clause distribution. Establishment was determined from the assumption. In statistics, when the rate of danger is determined, average value and standard deviation value are determined. Chaos Methods was used for this theory.
Moreover, when there were few cases, the problem of standard deviation value corresponded using Bootstrap Methods.
Theory was not emitted although the simulation was carried out 16000 times by the Logistic mapping.
Therefore, when we used the above-mentioned theory, it discovered converging Histogram of a control group on a normal distribution.
The theory can be judged that the result which carried out clinical application can sufficiently be used.

1 はじめに

近年、脳臨床画像検査における撮像機器の進歩により、高分解能の Data を高信号で得られる様になり、客観的診断を臨床検査結果に導く、多くの脳高次機能評価ソフトが開発された。それらは、アルツハイマー病等の変性疾患の早期診断の分野に大きく貢献している。臨床に統計学を用いる時、選択するデザイン、統計手法や、正常群や患者群の症例数などが問題になる。臨床施設にて、コントロールデータを集める事は、倫理規定やコンプライアンスなどの、多くの問題をともない、多数のデーターを一度に、それも瞬間的に集める事は現実的に難しい。そこで、人工的に標準脳標本を開発し、臨床応用可能かを検討した。ソフトは eZIS(easy Z-score Imaging System)を用い、アルゴリズムは、個人の局所脳血流の情報を、標準脳のテンプレートに合わせこみ、SPM99 (statistical-parametric-mapping)のアルゴリズムで脳形態の解剖学的標準化を行い、その後、統計学的解析を実施した。eZIS は国立精神・神経センター武蔵病院で、作成された健常者データーベースが添付してある。それを参照データとした。また、データは健常者等であり、コントロールが高齢者の場合は、5 個のカテゴリーをクリアーする条件を持たした。複雑な患者背景は、カオス理論[1,2,3,4,5,6] (ロジスティック写像) を利用し、確立統計の危険率を模索し、最終的に、3 次写像 (以下ムーンヴュー法と呼ぶ) にて基礎解析を逐次し、標本内の危険率の発散性を検討した。 標本群の平均を含む階級の確率密度に、標準偏差確率密度を加算し、p とするなら、Q=1, P=0.95 となる。ここでカオス理論を応用する。ロジスティック方程式で、16000 回繰り返したが途中発散する事無く、十分収束したと言える。ア・プリオリな臨床を想定し、初期値を変化させたが、2 項分布を想定した、多階層カテゴリーに従う確率密度の定義では、周期点は 1 点であった。また、松田の臨床評価においても、一定の傾向を示唆した。

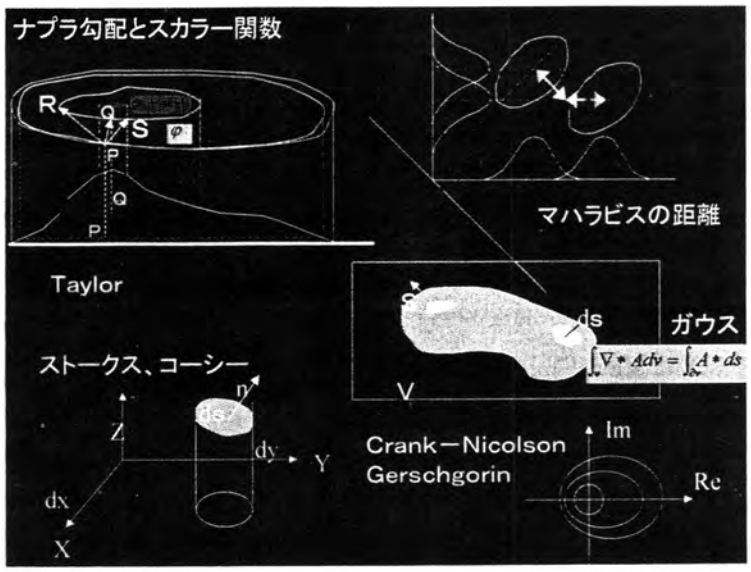
2 方法と仮定

脳統計解析ソフトは eZIS を利用した。SPECT 撮像条件収集時の健常者の状態：閉眼安静状態。収集条件　カメラ：シーメンス　マルチ SPECT3、コリメータ：LEHR ファン、薬剤：99mTc-ECD；555Mbq、撮像開始時刻　：投与 10 分後、ｴﾈﾙｷﾞｳｨﾝﾄﾞ　：140KeV20%、角度ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ：5 度 (24 方向*3 検出器)、収集方法：ステップ収集、収集時間：50 秒／方向、収集ﾏﾄﾘｸｽ：128*128、収集拡大率：1.45 倍　(ピクセルサイズ 2.46mm) 再構成構成条件、前処理ﾌｨﾙﾀ:Hanning(0.7cycle／cm)、再構成ﾌｨﾙﾀ:Shepp & Logan、散乱線除去：WSW、吸収補正：Chang　(補正係数＝0.12)。集合におけるカオス理論式[7]と検定方法は、標本群の平均を含む階級の確率密度と、優位性危険率 5%の両側の階級の確率密度をそれぞれ α、β、とし、標準偏差確率密度を p とするなら、Q=1,　2 p=0.95 となる。ここで正規性の理論値との (y＝aX+b)

線形式を利用し、ａとｂがある値を取った時、Ｘに、何かの値を入れると、ｙは必ず一つ決まるカオス理論を応用する。ロジスティック方程式の傾きを１世代（次層）で5%の危険率が加算される1.05、初期値は臨床的に多用される 0.05 として、ｒを変化させ、繰り返し検討した。 現象を数学的に、簡単に表現するためカオス理論を利用した。

群集合を捕らえる時、また写像する時は全単写であると仮定する。また、素は閉じた集合とする。

２a）想定集合（臨床コントロール群）はカテゴリ条件を満たした集合とする。①正常局所脳血流値に年齢階層を持たせる。②Mini Mental State Examination(MMSE)、長谷川式簡易知能評価スケール改訂版(HDS-R)正常。③(WMS-R),Wechsler-Memory-Scale-Revi 正常④(WAIS-R)Wechsler Adult Intelligence Scale=Revised が正常。⑤MRI で年齢相応の高信号が白質に T2 強調画像でみられるのみ。高血圧、糖尿病などの脳血管障害の危険因子がない。これらの条件にて P=0.03125（0.5^n）と仮定する。



展開は左図のように、ヒストグラムを級数で認識（Taylor の定理関数と級数）し、ナブラ勾配により楕円面積化、マハノビスの距離でベクトルと３次元化積分体積とする。（リサンプリングの揺らぎの十畳積分）ガウスの定理により面積素ベクトル化。次に、ストークスの定理により写像へ（全単写）、コーシの定理より正則高次関数積分値は一致（面積は一致） Gerschgorin の定理より固有点の存在補完後、Crank-Nicolson 法にて楕円方物型偏微分方程式化。最終的にカオス理論のロジスティック方程式にて収束性の確認する。

以上の流れである。各カテゴリー数は因子数を２項分布に定義し（因果性に時系列は加味しない）、階層と集合密度を算出し、危険率の初期値とする３次式を考案し（ムーンヴュー法）にて検討した。

ムーンビュー法の式：X_{n+1}=（１＋Xn）*Xn*(1-X)n

また、想定臨床応用数値を正規乱数と、均一、２項乱数にてシュミレートした。

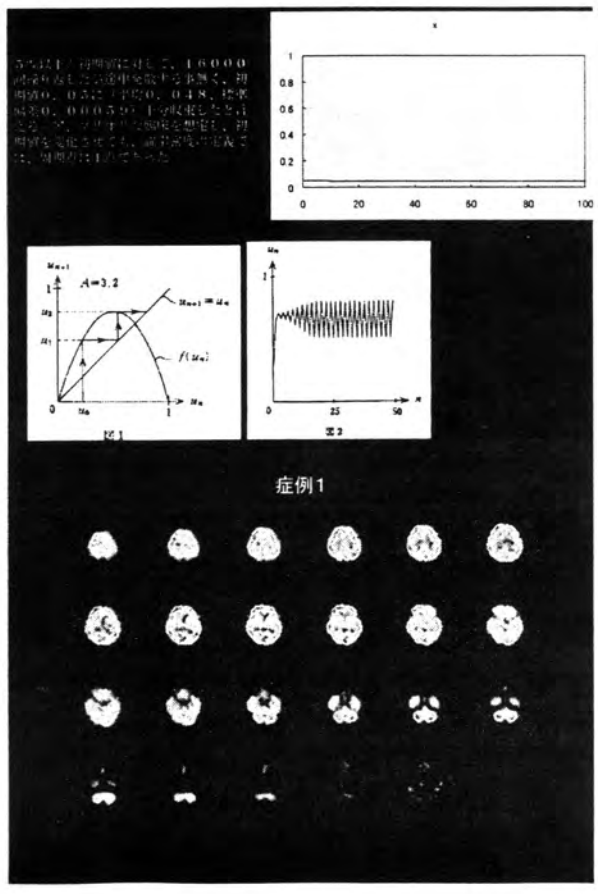
3　結果

ロジスティック写像の結果

右図のように、12000 例繰り返したが途中発散する事なく、初期値に収束した。（危険率 5%、平均 0.0476、標準偏差 5.78*10^-5：危険率 1%、平均 0.0099、標準偏差 6.24＊10^-7）また、ムービュー法による写像の結果

５階層カテゴリーにおける条件下の危険率の確率密度による、幾何学的密度の全単写をムーンビュー法でシミュレーションすると、ロジスティック写像と同じ結果であった。

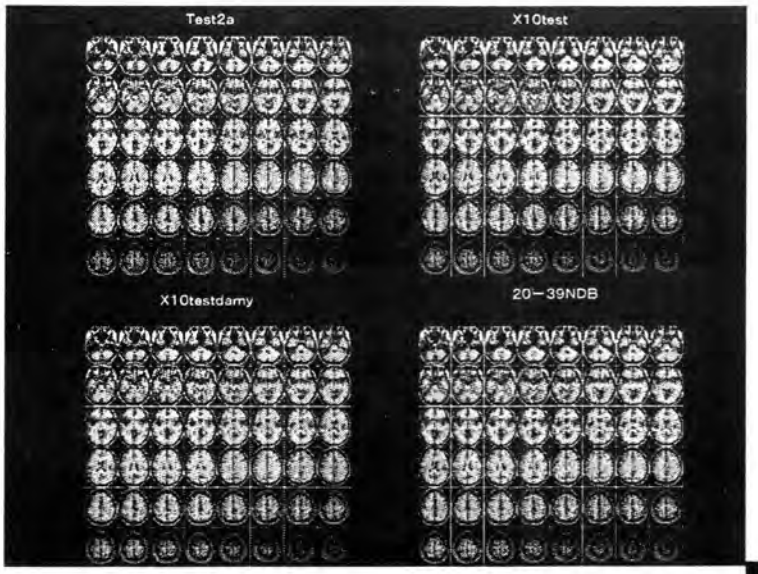
5%以下の初期値に対して、16000 回繰り返したが途中発散する事無く、初期値 0.05 に（平均 0.048、標準偏差 0.00059）十分収束したと言える。ア・プリオリな臨床を想定し、初期値を変化させても、２項分布の多階層カテゴリーに従う、確率密度の定義では、周期点は１点であった。



臨床における結果

右図は実際の臨床における局所脳血流画像である。特異的に脳血流値が低下した関心領域を確定するのは難しく、また、診断医における読影結果

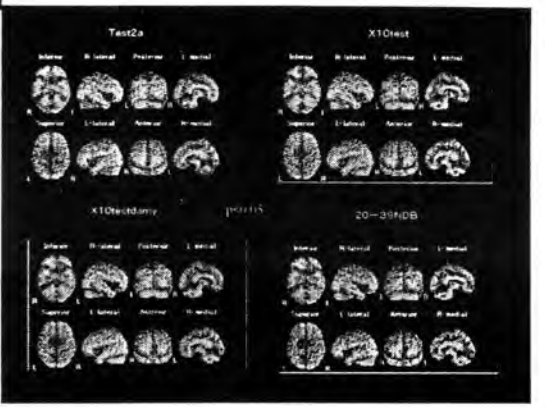
もばらつく事もある。アルツハーマー病などの初期における画像診断の難しさはだれもが認める事である。よって、ノーマルコントロールの局所脳血流値を対照群にし、症例を比較する事により、客観性に基づく診断が可能となる。この症例１を人工脳標本や実際に国立精神・神経センター武蔵病院にて作成されたコントロールデターベースと比較検討した。



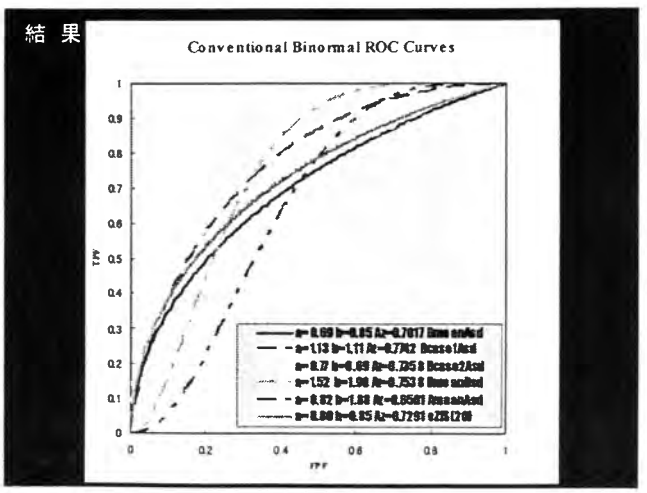
左図は、標準脳に合せ込んだ短軸断層像の臨床結果である。人工的に作成された脳標本との比較結果は、医療的によく用いられる 5%危険率にて、局所脳血流値の低下が異常と算出された関心領域が、十分に検討された比較用コントロール標本と同じ結果を算もたらす事がわかる。

下の図はＳＰＭの持つ、テンプレートの脳図譜に対して、垂線を求め、その垂線に対して、約 13㎜ の深部へピクセルの平均を求め、脳表に抽出した結果である。

臨床上の異常パターンが、脳図譜において同じ事が示唆される。



下の Fig は松田らが読影医における、診断のばらつきに関して他の施設と研究した ROC 解析結果である。この結果でも人工脳標本は十分に臨床応用可能である事を示唆した。カテゴリーの内容や段階を増やす事により、人口脳標本は、もっと検出精度が向上する可能性も合わせて示唆された。群の素の数が少数で、偽陽性と偽陰性を抑えたい場合は十分臨床応用できる検定と示唆された。これが、予測できない不規則な変動を規則的に導く、まさしく今回使用したカオスの定義となると考える。



4　考察

一定のカテゴリのもと作成された標本集合の場合、その要素１例を無作為に抽出されたξを標本の不動点とし、標本平均の代用に仮定し母平均を予測しても平均をつかさどる階級内要素特性は発散しないと示唆された。 一方、標準偏差を算出する際の標本集合が正規分布していない場合は ƒ （ｚ）関数に全単写をする際、想定標本集合の標準偏差の尖り度、や偏り度の影響は別の問題でかかわる。標準偏差もリサンプリング法を用いて検討の必要があり現在検討中である。変性疾患等、臨床パターンにより、また、手法に差があるか、現在検討中であり、詳細は別途報告する。集合論における、フラクタル性は、多次元において良い結果がえられそうなので別途報告する。

5　まとめ

局所脳血流測定には核医学が汎用されるが、各施設のＳＰＥＣＴ装置による画像情報のずれは現在避けられない。よって、各臨床施設が脳血流算出式に、関数をファントム実験により求め、補正対応するのが現状である。ノーマルコントロールデーターの施設間共同使用には、まだ緒問題が残っている。その事が、病気の早期検出を鈍らせたり、Ｓ／Ｎ比をばらつかせたりする。

今回のカオス理論を用いたカテゴリーを持つ人口脳標本はその問題を十分解決する可能性が示唆された。

参考資料

[1]Harvey, A.C., E. Ruiz and N. Shephard Multivariate stochastic variance model, Review of Economic Studies, 61, (1994)p247-264.

[2]Kitagawa, G. Non-Gaussian State-Space Modeling of Nonstationary Time Series (with discussion), Journal of the American Statistical Association, 82, (1987)p1032-1063.

[3]Kitagawa, G. Monte Carlo Filter and Smoother for Non-Gaussian Nonlinear State Space Models, Journal of Computational and Graphical Statistics, 5, (1996)p 1-25

[4]Kitagawa, G., and Gersch, W. A smoothness priors time varying AR coefficient modeling of nonstationary time series, IEEE trans. on Automatic Control, AC-30, (1985)p48-56.

[5]Kitagawa, G., and Gersch, W. Smoothness Priors Analysis of Time Series, Springer-Verlag, New York. (1996)

[6]北川源四郎, 佐藤整尚, 永原祐一, 非ガウス型状態空間表現による確率的ボラティリティモデルの推定、金融研究、日本銀行 18 巻, 1 号、p. 45-64、1999

[7]下條隆嗣：シミレーション物理学（6）カオス力学入門、㈱近代科学社、東京、1998、p18-52、(プログラム) p174-175

[8]高橋由武、核医学画像処理アプリケーションソフトの現状と将来、島根県放射線技師会雑誌、No. 80、Vol. 38-1、p11-17、2002. 3

[9]松田博史：新しい脳血流 SPECT の画像統計解析法 (eazy Z-score Imaging System:eZIS) の有用性、INNERVISION、11 月号：p97-103、2002

心拍変動のカオス解析に基づく爽快目覚ましシステム

Alarm Clock for Refreshing Sleep based on Chaos Analysis for Heart Rate Variability

○正　長谷川泰久*（名大）　湧田雄基*（名大）　正　福田敏男*（名大）
Yasuhisa HASEGAWA　Yuki WAKUDA　Toshio FUKUDA
正　新井史人*（名大）　川口三夫**（ダイトーエムイー(株)）
Fumihito ARAI　Mitsuo KAWAGUCHI (Daito ME co., LTD.)

Abstract: In this paper, we propose an algorithm to estimate sleep depth based on heart rate variability using chaos analysis. Currently, sleep state can be estimated by brain wave. However the brain wave cannot be measured by simple system. On the other hand heart rate can be measured by simpler one. For example pressure sensor, infrared sensor and so on. The estimation algorithm is determined by experimentally finding the relationship between maximum Lyapunov exponent and sleep depth.

Recently it is focused that some people make a mistake or cause an accident due to lost of regular sleep and homeostasis. This estimation system can inform pattern and depth of his daily sleep to a user and then the user can previously arranges his life schedule and pay much attention based on this awareness of sleep results.

1. 緒言

人は一生の約3分の1を睡眠状態にて過ごす．これは，覚醒状態と同じく生きていく上で非常に重要な生理現象である．しかし，現代人は睡眠時間や睡眠のサイクルが極めて不規則になりがちで，そのことに起因する疲労感や昼間眠気，概日リズムやホメオスタシスの破錠が起こり，居眠りや注意力の低下による仕事効率の低下や事故の発生原因となることが問題視されている．このことから，昨今，人の睡眠に関する研究が非常に注目されており，睡眠時の状態を監視する手法や，生体に最適な睡眠を与える手法の出現が期待されている．そこで本研究では，人の睡眠状態をモニタリングし，さらに必要に応じてその状態に求められる外部信号を与えることによって最適な睡眠周期を得ることのできる爽快システムの構築を目標とする．

2. 睡眠と心拍

人の睡眠を評価する項目として，睡眠時間，睡眠深度，睡眠深度の変動周期があげられる．つまり，単に長時間の睡眠をとるのではなく，これら評価基準に基づき，適切な深さと周期を持つ睡眠を得られなければ，充分な身体的回復が得られないことが知られている．さらに，起床後の爽快感を得る為には，起床タイミングも重要な項目となる．すなわち，人が十分な睡眠を得，また爽快な目覚めを得ることのできる爽快目覚ましシステム[1]を構成する為には，人の睡眠の深さを正確に推定することが求められる．

*名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻（〒464-8603　名古屋市千種区不老町）
**ダイトーエムイー株式会社

これまでは，人の睡眠状態を推定する手法としては，脳波中の周波数成分や波形によって推定されているが，その脳波計測には，高感度な装置を必要とし，被験者にも睡眠中の負担が大きい．また，現在問題視されている睡眠障害をはじめとした社会的問題では，より簡単な機器による各家庭での監視及び改善が必要であると考えられる．そこで，より手軽に取得可能な生体情報である心拍データに注目した．人の心拍状態は，睡眠時でも大きく変動することが確認されており[1][9]，本研究では，心拍を計測することによる，より簡単な計測手法によって睡眠状態を推定し，起床タイミングによって人の睡眠サイクルを制御する爽快目覚ましシステムの開発を目指す．

3. 睡眠状態の推定手法に関する実験

3.1 生体情報とカオス　生体信号の一つである心拍変動（R-R 間隔）にカオスダイナミクスの内在を提唱する研究者は多く，近年，生体信号への時系列カオス解析の適用を取り扱う研究が，盛んになされている[4][5][6]．本研究ではカオス解析としてデータの再構成に Takens の埋め込み定理[8]を用い，相関次元（Correlation dimension）と最大リアプノフ指数（Largest Lyapunov exponent）を，生体状態推定の指標とした．

3.2 実験環境　生体情報としての心拍データは，3電極タイプの心電位ピックアップを用い，携帯用心拍情報記録器（Activ-Tracer 日本光電社製）にデータを1kHzのサンプリングにて記録する．

3.3 実験　睡眠状態の推定基準として，睡眠深度に着目し，これを正しく推定することを目標とする．

一般的に，人間の睡眠状態は脳波の特徴の違いから，４つの睡眠ステージに分類され，第１段階においてREM睡眠が見られ，REM睡眠が発生しないその他の睡眠状態がNon-REMと呼ばれる．このうち，REM睡眠とNon-REM睡眠どちらが欠乏しても人は睡眠不足に陥り，最適な睡眠を得る為にはどちらの睡眠状態共バランスよく得ることが条件であると言われる．よって，本システムではこれら二つの睡眠状態を推定することによって，睡眠時のサイクルを推定することが必要となる．

睡眠時に発生する寝返り動作に注目すると，このうち粗体動（長）がREM睡眠（第１段階）の前後に発生し，局所体動（短）は第２段階で起こることが報告されている．そこで，睡眠時の様子をビデオカメラで撮影し，被験者の寝返り及び局所体動からその睡眠状態を推定し，同時にActiv-TracerによるRR間隔の取得も行うことによって，RR間隔からのカオス解析結果から推定された睡眠状態と，REM，Non-REM睡眠状態との比較を行う．

3.4 実験　体動が起きている時期をFig.1中の四角マーカ部で示す．このデータからREM睡眠時期の推定及び睡眠深度の特定を行い，その結果を，Fig.2中に示す．また，RR間隔からカオス解析によって得られたリアプノフ指数と相関次元をFig.2に示す．

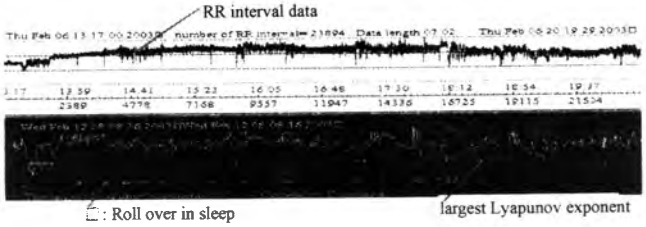


Fig. 1 カオス指標による睡眠状態推定結果

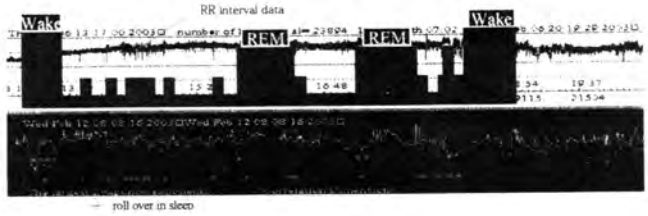


Fig. 2 体動に基づいて推定された睡眠ステージとの比較

ここで，それぞれの睡眠状態推定結果を比較すると，撮影された映像から決定した睡眠深度変動グラフとリアプノフ指数変動との間に関連性が見られる．例えば，体動が起きる第１段階と第２段階では，必ずリアプノフ指数の上昇が確認できる．すなわち，本実験から，リアプノフ指数の大きな変化によって，REM睡眠期とこれ以外の睡眠期の判別が可能であることが示された．

3.4 評価機器の製作　以上の推定手法を評価する為，この睡眠状態推定手法に基づいた爽快睡眠システムを開発した（Fig.3）．本システムでは，心拍センサーに反射型 LED を用いた指先センサーを使用し，H8マイコンによるCPUを搭載する．ここでは，上述の睡眠状態推定システムに基づいた覚醒タイミングを判定するアルゴリズムを搭載し，睡眠サイクルを阻害することの無い最適なタイミングにおいて起床信号を送信する．また，覚醒後にPCと接続することによって被験者の睡眠時の状態を各家庭においてモニタリングすることも可能である．

Fig. 3 評価用目覚ましシステム

4. 結論

本実験により，人の睡眠深度と，カオス解析の指標のひとつである最大リアプノフ指数との相関が得られた．このことから，心拍情報を用いたカオス解析による睡眠深度の推定が可能であることを示した．また，この手法に基づく爽快目覚ましシステムを製作した．

今後の課題としては，この睡眠状態推定手法に基づく睡眠制御システムの実用化が挙げられ，これには，さらに被験者による個人差を越えた定量的評価が行う必要がある．

文　献

[1] 爽快目覚まし時計システム　特願2002-247422，出願人：福田敏男，新井史人，長谷川泰久，ダイトーエムイー株式会社

[2] 心拍のカオス解析による人の状態推定(pp. 45-46)，FSS2002

[3] 合原一幸：カオス時系列解析の基礎と応用，産業出版社

[4] 井上政義：カオスと複雑系の科学，日本実業出版社

[5] 細田嵯一監修，笠貫　宏・大友詔雄編：生体時系列データ解析の新展開，北海道大学図書刊行会

[6] Yoshiharu Yamamoto：Time Series Statictical Analysis System(TSAS) Tokyo Univ. 1995

[7] Rainer Hegger,Holger Kantz,Thomas Schreiber：Nonlinear Time Series Analysis (TISEAN)

[8] F.Takens,Detecting strange attractors in turblence.L.S.Young (eds) Lecture Notes in Mathematics. Dynamical System and Turbulence. Springer Verlag,pp.366,1

[9] 林 博史：心拍変動の臨床応用，医学書院

連絡先

〒464-8603　名古屋大学大学院 工学研究科

マイクロシステム工学専攻　福田研究室

湧田 雄基

TEL：052-789-4481　E-mail：wakuda@robo.mein.nagoya-u.ac.jp

混合過程における伝播遅延時間を考慮した高精度ブラインド信号分離

Blind signal separation of high accuracy with the time delays in the mixing process of signals

畔津　忠博
Tadahiro Azetsu
山口県立大学環境デザイン学科
Yamaguchi Prefectural University

内野　英治
Eiji Uchino
山口大学理学部
Yamaguchi University

Abstract: We propose an enhanced method of independent component analysis (ICA) in the frequency-domain for blind signal separation (BSS) with time delays in the mixing process of signals. The proposed method makes use of time delays, which are extracted from the conventional frequency-domain ICA. The effectiveness of this method has been confirmed experimentally.

1　はじめに

信号処理の分野において, BSS は原信号の線形混合である観測信号から元の原信号を復元する重要な方法である. また, ICA は観測信号の独立成分を抽出することにより BSS 問題を解くための統計的な手法である [1]. 音声信号のように, 信号の混合過程において時間遅れを考慮する必要がある BSS 問題は, 周波数領域で ICA を用いると問題を単純化できることが知られている [2, 3]. しかしながら, 周波数 ICA は遅延時間が増大すると, 音声が不明瞭になる問題が生じる. 我々はこの問題を解決するため, 周波数 ICA から信号の遅延時間が推定できることを利用し, 高精度なブラインド信号分離法を提案する. 音声信号を用いたシミュレーションにより, 良好な信号分離が得られることを確認した.

2　周波数 ICA

信号の混合過程で遅延時間を含む BSS 問題は, 以下のように定式化される.

今, N 個の原信号がおのおの遅延を含んで線形的に混合され, N 個のセンサーで観測される場合を考える. このとき, k 番目の観測信号 $x_k(t)$ は以下の式で表される:

$$x_k(t) = \sum_{l=1}^{N} \alpha_{kl} s_l(t - \tau_{kl}) \quad (k = 1, \ldots, N). \tag{1}$$

ここで, s_l は l 番目の原信号, α_{kl} は減衰係数, τ_{kl} は l 番目の信号源から k 番目のセンサーまでの遅延時間である. 我々はこの信号分離問題に周波数 ICA を適用する. (1) 式をフーリエ変換し, それを行列で表すと次のようになる [2]:

$$\boldsymbol{x}(f) = \boldsymbol{A}(f)\boldsymbol{s}(f), \tag{2}$$

$$A_{kl}(f) = \alpha_{kl} e^{-j2\pi f \tau_{kl}}. \tag{3}$$

ここで, $\boldsymbol{x}(f)$ と $\boldsymbol{s}(f)$ は, $\boldsymbol{x}(t)(= (x_1(t), \ldots, x_N(t))^T)$ と $\boldsymbol{s}(t)(= (s_1(t), \ldots, s_N(t))^T)$ のフーリエ変換であり, $\boldsymbol{A}(f) = (A_{kl}(f))$ である. 実際には, 以下の近似式を仮定する:

$$\boldsymbol{x}(f, t_s) = \boldsymbol{A}(f)\boldsymbol{s}(f, t_s). \tag{4}$$

ここで, $\boldsymbol{x}(f, t_s)$ と $\boldsymbol{s}(f, t_s)$ はフレーム番号 t_s におけるおのおの $\boldsymbol{x}(t)$ と $\boldsymbol{s}(t)$ の短時間フーリエ変換 (STFT) である. (4) 式の各周波数ごとに ICA を適用する. $\boldsymbol{x}(f, t_s)$ は複素ベクトルであり, 分離行列 $\boldsymbol{W}(f)$ を用いて各周波数成分を以下のように分離する [2, 3]:

$$\boldsymbol{y}(f, t_s) = \boldsymbol{W}(f)\boldsymbol{x}(f, t_s). \tag{5}$$

ここで, $\boldsymbol{y}(f, t_s)$ は分離された周波数成分である. $\boldsymbol{y}(f, t_s)$ を短時間逆フーリエ変換 (ISTFT) して分離信号 $\boldsymbol{y}(t)$ を得る.

3　提案手法

分離行列 $\boldsymbol{W}(f)$ から遅延時間が特定できることに着目する. $\boldsymbol{y}(f, t_s)$ の各成分が互いに独立になるとき, $\boldsymbol{W}(f)$ の逆行列は混合行列 $\boldsymbol{A}(f)$ の推定値になるので, これを $\hat{\boldsymbol{A}}(f)$ とする. サンプリング周波数 F_s でサンプルした観測信号 $\boldsymbol{x}(t)$ に M 点 STFT を適用すると, (3) 式は $f = (F_s/M)n$ $(n = 0, \ldots, M-1)$ の離散形式になり, $A_{kl}(n)$ の ISTFT は以下のように与えられる:

$$\mathrm{ISTFT}(A_{kl}(n)) = \sum_{m=0}^{M-1} \alpha_{kl} e^{-j2\pi(F_s\tau_{kl} - n)m/M}. \tag{6}$$

この式から, $\mathrm{ISTFT}(A_{kl}(n))$ の実部は $n = F_s\tau_{kl}$ のとき最大値を取ることがわかる. そこで, この n を p_{kl} で置き換えると, 推定遅延時間 $\hat{\tau}_{kl}$ は p_{kl}/F_s で与えられる.

今, 簡単のため $N = 2$ の場合を考える. 周波数ICAの結果, 信号が完全に分離でき, $y_1(t) = ps_1(t)$, $y_2(t) = qs_2(t)$ になったとする. ここで, p,q はICAに関するスケール因子である [1]. このとき, $\hat{A}_{1i}(0) = \alpha_{1i}/p$, $\hat{A}_{2i}(0) = \alpha_{2i}/q$ $(i = 1, 2)$ となる. さらに, 音源1とセンサー1の距離と, 音源2とセンサー2の距離がほぼ等しいとき, 即ち (1) 式で $\alpha_{11} = \alpha_{22}$ を仮定すると, $p/q = \hat{A}_{22}(0)/\hat{A}_{11}(0)$ とできるので, 最終的な分離信号は以下の式で得られる:

$$z_1(t) = x_1(t) - \hat{A}_{12}(0)(\hat{A}_{22}(0)/\hat{A}_{11}(0))y_2(t - \hat{\tau}_{12}), \quad (7)$$

$$z_2(t) = x_2(t) - \hat{A}_{21}(0)(\hat{A}_{11}(0)/\hat{A}_{22}(0))y_1(t - \hat{\tau}_{21}). \quad (8)$$

4 シミュレーション

2つの音声信号を以下の式で混合させる.

$$x_1(t) = 0.6s_1(t) + 0.4s_2(t - 0.002), \quad (9)$$

$$x_2(t) = 0.5s_1(t - 0.001) + 0.6s_2(t). \quad (10)$$

原信号を図1に, 観測信号を図2に示す.

周波数ICAの結果から分離行列 $\boldsymbol{W}(f)$ を計算し, その逆行列より推定混合行列 $\hat{\boldsymbol{A}}(f)$ を得る. 虚部を0とした $\hat{\boldsymbol{A}}(f)$ の各行列要素にフーリエ変換を施し, その実部を図3に示す. 図3より, 正確に遅延時間を推定できることがわかる.

図4は従来の周波数ICAから得られた分離信号を示す. 本提案手法では, さらに, (7)(8) 式より最終的な分離信号が得られる. その結果を図5に示す. 本提案手法が原信号を良好に推定できていることがわかる. また, 実際に音声を聞いてみても, ほぼ完全に分離できていることが確認できた.

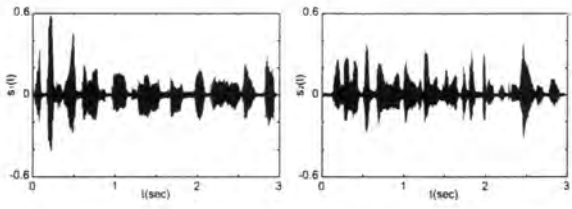


図 1: Source signals $\boldsymbol{s}(t)$

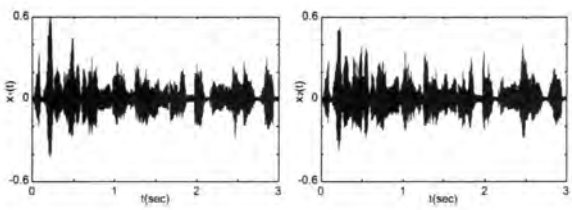


図 2: Observed signals $\boldsymbol{x}(t)$

5 おわりに

我々は, 音声信号のように, 信号の混合過程において時間遅れを考慮する必要がある BSS 問題を解くために, 周波数 ICA を改良した方法を提案した. シミュレーション結果より, 本提案手法を使って得られた分離信号の方が, 従来の周波数ICAのみの分離信号よりも高品質であることが確認できた. 今後の課題として, 信号源がセンサーに対して多い場合にも対応できるように, この手法を改良してきたい.

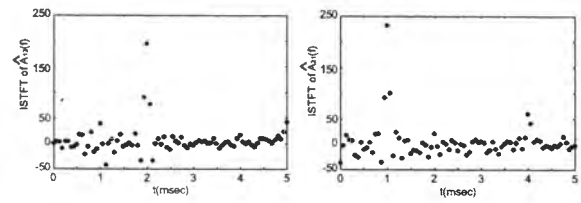


図 3: ISTFT of $\hat{A}_{kl}$

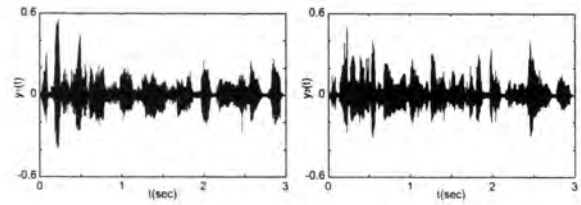


図 4: Separated signals $\boldsymbol{y}(t)$ by using the conventional frequency-domain ICA

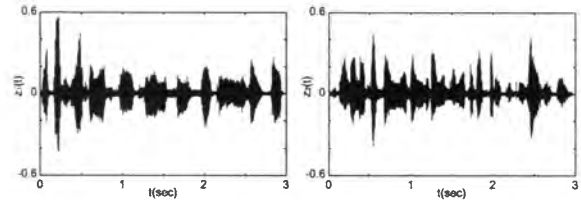


図 5: Separated signals $\boldsymbol{z}(t)$ by using the proposed method

参考文献

[1] S. Amari, A. Cichocki, and H. H. Yang, " A new learning algorithm for blind signal separation," Advances in Neural Information Processing Systems, Vol.8, pp.757-763, MIT Press, Cambridge MA, 1996.

[2] S. Kurita, H. Saruwatari, S. Kajita, K. Takeda, and F. Itakura, "Blind signal separation using directivity pattern," Technical Report of Japanese Society for Artificial Intelligence, pp.21-26, Nov. 1999.

[3] N. Murata and S. Ikeda, "An on-line algorithm for blind source separation on speech signals," Proc. of 1998 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Application (NOLTA'98), pp.923-926, 1998.

連絡先

内野英治

〒 753-8512 山口県山口市吉田 1677-1

山口大学理学部自然情報科学科

Tel/Fax: 083-933-5699, Fax: 083-933-5768

E-mail: uchino@sci.yamaguchi-u.ac.jp

ルールの生成法と推論法を変化させる学習の拡張
—切り換え手法の追加とその評価—

Extension of Learning by Switching Rule Generation and Reasoning Methods
—Introduction of New Switching Methods and Their Evaluation

馬野 元秀　藤丸 雅弘　瀬田 和久　宇野 裕之　岡田 真
UMANO Motohide　TOMARU Masahiro　SETA Kazuhisa　UNO Yushi　OKADA Makoto

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
Department of Mathematics and Information Sciences,
College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

Abstract: When we solve a problem, we firstly have no knowledge and gradually acquire some piece of knowledge by observing new data, and at last arrive at complete knowledge for solving the problem. We have a simple form of specific knowledge in the first stage but a complex form of general one in the final stage. To implement such kind of learning mechanism, we proposed a learning method of switching reasoning methods and rule generation methods, where we switched with the successive number of wrong reasoning results. In this paper, we propose to switch with the decreasing agree of correct ratio and compare it with the previous one.

1 はじめに

人間は、ある問題を解くための知識を、データを少しずつ得ながら作りあげて行く。このとき、始めは与えられたデータをそのままの形で記憶し、学習が進むとデータを基にしたルールの形で記憶する。このような仕組みを計算機上で実現するために、学習データが逐次的に与えられる状況においてルールの生成法等を切り換えていくような学習法を提案した [1] [2]。

今回は、推論法とルール生成法の切り換えやルール再構成を正解率から判断する方法と、切り換えを行う際、次に用いる知識表現や推論法をランダムに選択する方法を導入した。

2 学習法の概要

本手法はデータが逐次的に与えられていく状況において、それまでに得たデータを基にして生成したルールを用いて推論を行う。そのためのルール生成法や推論法を複数用意しておき、与えられた状況に応じて推論法の切り換え、ルールの再構成、ルール生成法の切り換えを行いながら推論を行う。

ルールにはさまざまな形式のものが存在し、それぞれの形式に応じたルールの生成法と推論法がある。ここでは、ひとつの生成法とそれに付随する複数の推論法からなるものを知識表現と呼ぶことにする [1]。

知識表現は常にひとつだけが用いられる。いま用いられている知識表現のルール生成法によってルールを生成し、生成されたルールを用いてその知識表現のもつ推論法の一つを使って推論結果を求める。そして、ある条件を満たすときに推論法の切り換え、ルールの再構成、知識表現 (ルール生成法) の切り換えを行う。なお、分類問題を考えているので、データは複数の属性と分類クラスからなるものとする。ルール生成法と推論法はルールの形式毎に、以下のものを用いる。

(1) 学習データと同じ形式のルール

[生成法]

- データ点をルールとする方法 (G_1)

今までに学習したデータをそのままルールであるとみなす。この方法ではルール数はデータ数に比例するので、学習データが多くなると多数の

ルールを保持しなければならない。

• クラスタリングを行い、その重心をルールとする方法 (G_2)

各クラスごとに全属性を用いてクラスタリングを行い、その重心となる点をルールとする。

[推論法]

• 距離が一番近いルールによる方法 (R_1)

推論するデータが与えられたときに、その点と各ルールの点との距離を計算し、最も近いルールのクラスを推論結果とする。

• 距離による重みを考慮する方法 (R_2)

推論するデータが与えられたときに、その点と各ルールの点との距離を計算する。次に、それらの距離を正規化し、各ルールのクラスに属する度合を求める。そして、クラスごとの度合の合計を求め、それが一番大きいクラスを推論結果とする。

(2) ファジィルールの形式

[生成法]

• 各属性ごとに一定数のファジィ集合を作成する方法 (G_3)

各属性ごとに一定数のファジィ集合を作成し、各属性のファジィ集合のすべての組合せからファジィルールを作る。

• クラスタリングを行い、それをファジィルールにする方法 (G_4)

全属性でクラスタリングを行い、各クラスタの重心となる点を中心としたファジィ集合を作り、そのファジィ集合を用いたルールを作る。

[推論法]

• ファジィ推論 (min-max 重心法) による方法 (R_3)

ファジィルールによる推論を min-max 重心法によって行う。

• ファジィ推論 (×-+ 重心法) による方法 (R_4)

ファジィルールによる推論を ×-+ 重心法によって行う。

(3) 決定木による形式

[生成法]

• ID3 を用いて決定木を生成する方法 (G_5)

ID3 を用いて決定木を作成し、それに基づいてルールを作成する [3]。連続値を取る属性に対しては、クラスタリングを行い 3 つのクラスタを作成し、隣り合うクラスタの重心の平均値を分割点とし、3 つの離散値とみなすようにする。

[推論法]

• 決定木を用いて推論を行う方法 (R_5)

ルート節点から出発して、各節点における属性値に応じて枝をたどっていき、葉節点におけるクラスを推論結果とする。

(4) ファジィ決定木による形式

[生成法]

• ファジィID3 を用いてファジィ決定木を生成する方法 (G_6)

ファジィID3 を用いてファジィ決定木を作成し、それに基づいてルールを作成する [4]。連続値をとる属性における分類の枝のラベルには、各属性ごとにクラスタリングを行って 3 つのクラスタを作り、クラスタごとに作成されたファジィ集合を用いる。

[推論法]

• ファジィ決定木を用いて推論を行う方法 (R_6)

ファジィ決定木による推論では、枝にラベル付けされたファジィ集合に対する度合いが正になる枝すべてをたどっていく。到達可能なすべての葉節点について、そこへ到達するまでにたどった枝のファジィ集合における度合いの積を求め、その葉節点に対する度合いとする。そして、葉節点におけるクラスの確信度に度合いを掛けたものをそれぞれ求め、それらの値をクラスごとに合計し、それが最も大きくなるものを推論結果とする。

以上のルール生成法と推論法の組合せから知識表現を表 1 のように定める。学習の開始時点では知識表現は K_1 を、推論法は G_1 を用いる。

表 1: 知識表現の種類

知識表現	生成法、推論法
K_1	G_1, R_1, R_2
K_2	G_2, R_1, R_2
K_3	G_3, R_3, R_4
K_4	G_4, R_3, R_4
K_5	G_5, R_5
K_6	G_6, R_6

3 知識表現や推論法の切り換えとルールの再構成

一般に、同じ知識表現、ルール、推論法により推論を続けていくと、もっているルールでは説明のつかないデータが入力されたり、知識表現や推論法が状況に適さない状態におちいると、正しい

推論が行えず、正解率が減少してしまう。そこで、より状況に適した状態にするために何らかの手段を取る必要がある。その手段として、推論法の切り換え、ルールの再構成、知識表現の切り換えの3つを考える。そのためには、それをいつどのように行うかを判断する方法が必要になる。ルール再構成については、その時点の知識表現のルール生成法を用いて、それまでに蓄えられたデータをからルールを作り直すだけでよいが、推論法と知識表現の切り換えについては、次に用いる推論法や知識表現を選択する必要がある。

そこで、切り換えの判断法と、次に用いるものの選択法について以下のような方法を考える。

(1) 判断法

- 不正解の連続する回数から判断する方法 [2]

推論の不正解が連続して起こったときを切り換えやルール再構成の機会とする。具体的には次のようにする。

m_1 回連続不正解: 推論方法の切り換え
m_2 回連続不正解: ルールの再構成
m_3 回連続不正解: 知識表現の切り換え

ここで、$m_1 < m_2 < m_3$ とする。

- 累積正解率の下降から判断する方法

推論の累積正解率 (学習の始めからその時点までに行った全推論に対する正解率) が下がったときを切り換えやルール再構成の機会とする。具体的には、前回の知識表現切り換え後の最大累積正解率と現在の累積正解率との差 p を求め、次のように判断する。

$p_1 \leq p < p_2$: 推論方法の切り換え
$p_2 \leq p < p_3$: ルールの再構成
$p_3 \leq p$: 知識表現の切り換え

ここで、$p_1 < p_2 < p_3$ とする。

(2) 選択方法

- 評価関数による最良選択方法 [2]

切り換えを行う時点で最良と思われる推論法、知識表現を選択する。評価は次の関数を用いて行う。

$$H(c_a, r_a) = c_a + \frac{\alpha}{r_a} \qquad (1)$$

ここで、c_a は学習方法 a の正解率、r_a は学習方法 a のルール数、α はパラメータである。

推論法切り換えの場合は、現在の知識表現のもつすべての推論法について、知識表現切り換えの場合は、すべての知識表現について、システムに保存されているデータに対して推論を行い、式(1)が最大となるものを選択する。推論法切り換えの場合は、同じ知識表現内のため、ルール数は同じであるので、正解率のみの比較になる。知識表現切り換えの場合は、正解率のみでなく、ルール数の少なさも含めた評価値の比較になる。

- ランダムに選択を行う方法

推論法の切り換えの場合は現在の知識表現が持つ推論法の中から、知識表現の切り換えの場合はシステムの持つ知識表現すべての中から、それぞれランダムに一つを選択し、新たな推論法・知識表現とする。

4 数値実験

本手法を用いて、R.A.Fisher のアヤメの分類データ [5] を用いて数値実験を行った。アヤメのデータからデータを無作為にひとつずつ取り出して、前節で述べた方法で推論を行い、各推論回における累積正解率とルール数を求める。未学習状態からデータがなくなるまでの推論学習を1ループとし、これをデータの順序を変えながら100回繰り返し、推論回毎に累積正解率とルール数の平均を求める。これを、切り換え判断法二種と選択法二種の組合せの四通りで試行した。ここで、パラメータは、次のように設定する。連続不正解数については $m_1 = 1$、$m_2 = 2$、$m_3 = 3$、累積正解率の下降については $p_1 = 0.01$、$p_2 = 0.025$、$p_3 = 0.05$、評価関数の α は1とする。また、クラスタリングは最短距離法を用いクラスタ数は3とし、ファジィ決定木における最大占有率は0.9とした。平均累積正解率と平均ルール数の推移のグラフを図1～4に示す。グラフにおいて、実線は累積正解率の、破線はルール数の、推論回毎の平均を表す。

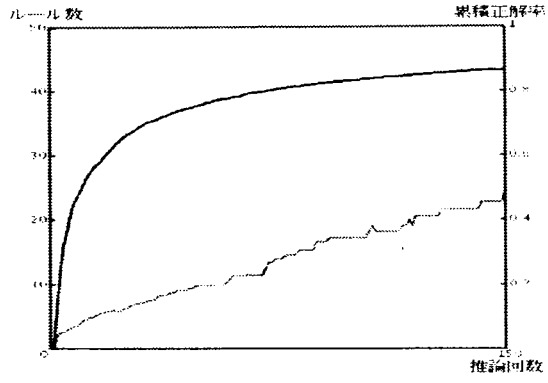


図 1: 100 ループの平均累積正解率とルール数
(連続不正解数による判断、 最良選択)

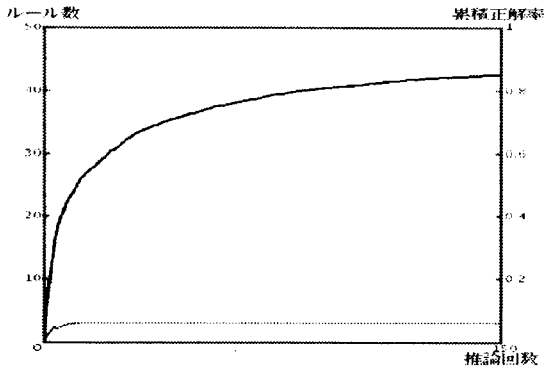


図 2: 100 ループの平均累積正解率とルール数
(累積正解率下降による判断、最良選択)

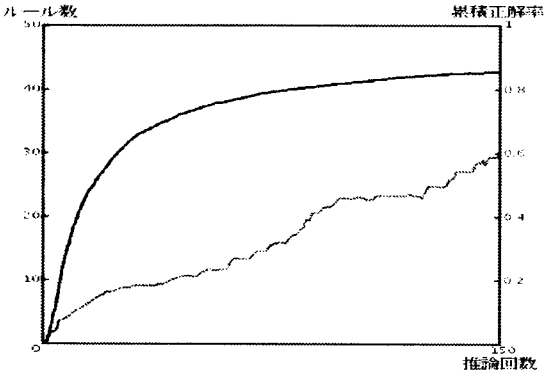


図 3: 100 ループの平均累積正解率とルール数
(連続不正解数による判断、ランダム選択)

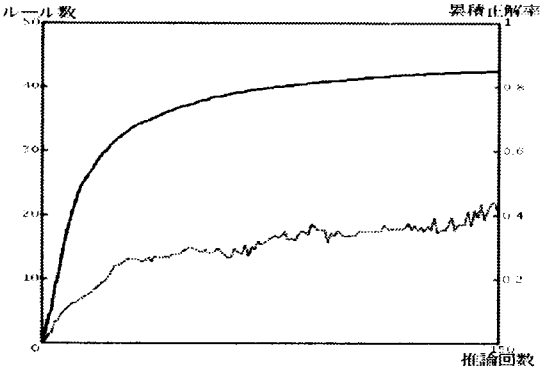


図 4: 100 ループの平均累積正解率とルール数
(累積正解率下降による判断、ランダム選択)

判断法による結果の違いは、累積正解率ではあまり変わらなかったが、ルール数では累積正解率下降による判断法が少なく抑えられている点である。累積正解率下降による判断法では、推論回数が多くなると、不正解が多少連続しても累積正解率があまり下がらないため、切り換えや再構成が起こりにくい。それに対して、連続不正解による判断法では、推論回数にかかわらず、不正解が続くと切り換えを行うため、推論回数を重ねても比較的切り換えが起こりやすい。そのため、学習の中盤以降でも切り換えが起こり、ルール数が増えることがあるため、上記のような違いがでると考えられる。

また、選択法による結果の違いをみると、正解率でもルール数でも最良選択法が優れていた。これは、ランダム選択では良い知識表現が選択されるまでに切り換えを多く繰り返さなければならないからである。しかし、ランダム選択では、1 ループの結果でみたときに最良選択よりも良い結果を得ることもあった。また、ランダム選択法は選択の際にかかる計算がかなり少なくて済む。そのため、どちらの選択法が優れているかを一概に判断することはできない。

5 おわりに

本稿では、データが逐次的に与えられる状況で、ルール生成法や推論法の切り換えを行いながら学習を行う手法において、切り換えの判断法や、推論法・知識表現の選択方法を変更して実験を行った。

今後の課題として、評価関数やクラスタリングなどで用いられるパラメータを状況に応じて自動的に変更できるようにしたい。

参考文献

[1] 馬野 元秀, 松本 裕二, 宇野 裕之, 瀬田 和久: ルールの生成法と推論法を変化させる学習の拡張, 日本ファジィ学会第 15 回ファジィシステムシンポジウム, pp.463–466, 2000.

[2] 馬野 元秀, 藤丸 雅弘, 瀬田 和久, 岡田 真: ルールの生成法と推論法を変化させる学習の拡張—ファジィ決定木の導入—, 日本ファジィ学会第 18 回ファジィシステムシンポジウム, pp.69–72, 2002.

[3] J.R.Quinlan: Induction of Decision Trees, Machine Learning, Vol.1, pp.81–106, 1986.

[4] 馬野 元秀, 中山 学, 鳩野 逸生, 田村 坦之: ファジィID3 に基づくファジィ決定木の生成とその評価, 日本ファジィ学会第 10 回ファジィシステムシンポジウム, pp.333–336, 1994.

[5] R.A.Fisher: The Use of Multiple Measurements in Taxoniomic Problems, *Annals of Eugenics*, Vol.7, No2, pp.170–188, 1936.

[問い合わせ先]
〒 599–8531 堺市学園町 1 – 1
大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
馬野 元秀
TEL: 072–254–9675
FAX: 072–254–9930
E-mail: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

ルールの生成法と推論法を変化させる学習の拡張
—複数の知識表現スレッドの導入—

Extension of Learning by Switching Rule Generation and Reasoning Method
—Introduction of Multiple Knowledge Representation Threads—

松本 裕二　　馬野 元秀　　瀬田 和久
MATSUMOTO, Yuji　UMANO, Motohide　SETA, Kazuhisa

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
Department of Mathematics and Information Sciences,
College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

Abstract When we solve a problem, we firstly have no knowledge. With observing data, we are forming knowledge for solving the problem and finally have complete one. The system has knowledge representations which have a rule set, a rule generation method and reasoning methods. If the result of reasoning is incorrect, the system may change a reasoning method to another, reconstruct the rule set, or switch a knowledge representation to another. In this paper, we introduce multiple knowledge representation threads and propose how to accept or reject a result from the threads. We implement a prototype of the system and apply it to Stefan Aeberhard's wine data.

1. はじめに

我々は以前に，ルールの生成法と推論法を変化させる学習を提案した [1]．これは人間の逐次的な学習の過程において，学習の初期の状態と学習が進んだ状態の2つの状態の間では，人間が内部に持っている知識の表現が異なっているであろうという考えに基づいている．例えば，学習の初めの状態での知識の表現は，単純にデータを前例としてそのまま覚えておくが，学習が進んだ状態での知識の表現は，それより複雑な形式で表現されていると考えられる．そのような知識の表現の変化を，我々は知識表現の切り替えによって表現しようと試みた．

以前のシステムでは常にひとつの知識表現だけが動作するようになっていたが，これを拡張して複数の知識表現が同時に動作することができるように実験システムの拡張を行った．

2. 学習法の概要

学習の過程を表現するために，ルール，ルールを生成する方法 (生成法)，ルールを用いて推論を行う方法 (推論法) をまとめた知識表現と呼んでいるものを利用する．

本学習法では人間の逐次的な学習過程と同様にデータがひとつずつ与えられて，それに対して知識表現の中のルールを用いて推論を行いながら必要に応じて学習をしていく．このとき，状況に応じて— 具体的にはある回数以上連続して不正解となった場合に—別の知識表現に切り替えるようにしていた．この知識表現を切り替えは，人間の内部的な知識の表現の変化に対応すると考えている．

知識表現内の推論方法の切り換えやルールの再構成や知識表現の変更などは，その時点でもっとも適切であると思われるものを1つ選択している．しかし，1つを選択する代わりに複数を選択してしばらく推論/学習を続け，そしてその中の適切でないものから順番に停止していくという方法は人間がよく行っている．この処理を実現するには複数の推論/学習過程が必要となる．また，複数の推論/学習過程の推論結果を組み合わせることでより全体としての推論性能が向上することが期待できる．

1人の人間がそのような複数の推論/学習過程での処理を行っている場合もあるが，複数の人間がそれぞれひとつの推論/学習過程を処理しているともみることができる．

そこで今回は，複数の知識表現がそれぞれ同時に動作できるようにした．データが与えられる度に複数の知識表現は個別に推論を行い，推論結果を返す．また，知識表現は個別に推論方法を変更したりルールを再構成したり知識表現を変更できる．

推論/学習過程を単純な方法で複数にすると，ある知識表現が推論やルールの再構成などの処理を行うと，その間は他の知識表現が処理することができなくなってしまう．そこで効率よく実現するため，知識表現をスレッド化した．スレッド化された知識表現に対して推論命令を送信すれば，知識表現は推論を行って結果を返信する．処理は見かけ上同時に行われるため，ひとつの知識表現が時間のかかる処理を行っている間でも，他の知識表現が別の処理をすることができる．

3. システムの概要

(1) システムの構成

まず，本システムの構成を図1に示す．本システムは逐次的に与えられたデータに対して推論を繰り返す

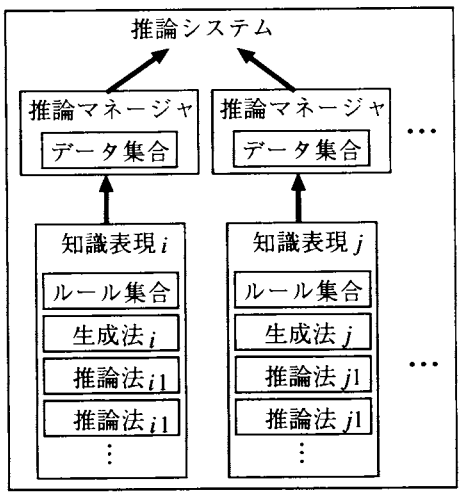


図 1: システムの構成

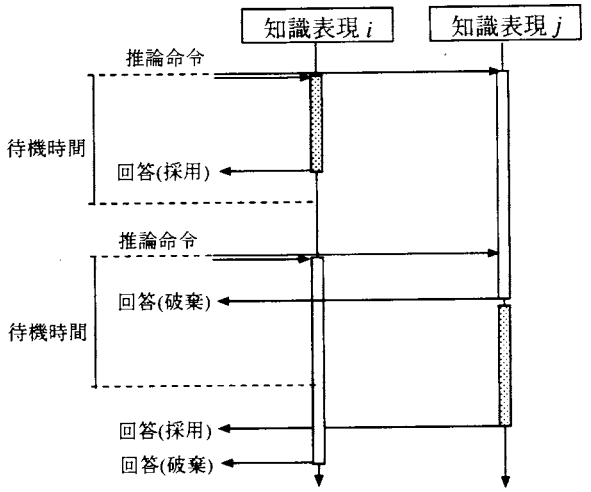


図 2: 推論システムでの推論の処理

ので，本システム全体をひとつの推論システムであるとみなす．推論システム内には 1 つ以上の推論マネージャがあり，これがひとつの推論/学習過程を管理している．推論マネージャがデータ集合を 1 つ持ち，1 つの知識表現を管理している．

- **知識表現** ルール，生成法，推論法を持つ．推論命令が送られてきたとき，知識表現は推論を行い，回答を返す．
- **推論マネージャ** 知識表現内のルールの再構成や推論法の変更，知識表現の切り替えタイミングと実行の管理を行う．ある推論マネージャはひとつの知識表現を管理する．
- **データ集合** 推論データが与えられるごとに，蓄積されていく．これはルールの再構成などに使用する．
- **ルール集合** 知識を表現するためのルールの集合である．ファジィ If-then ルールや決定木などがある
- **生成法** データ集合からルール集合を生成するアルゴリズムである
- **推論法** ルール集合と推論データより推論を行い，推論結果を返すアルゴリズムである

(2) 推論システムにおける推論処理

推論システムに推論データがひとつ与えられたときに，推論システムは推論処理を次のように行う．基本的な方針は，推論する時間に制限を設け，その時間以内に推論した知識表現の回答をすべて採用し，時間内にどの知識表現も推論できなかった場合はさらに待って最初に推論した知識表現の回答のみを採用するというものである．

1. 推論システムはすべての推論マネージャに対して推論命令を送信する．すべての知識表現に対して，それぞれの推論マネージャはこの命令を管理している知識表現にそのまま送信する．
2. 推論システムは所定の時間待機する．この間に知識表現は推論を行う．
3. 待機時間が経過するか，推論マネージャを経由して知識表現から回答がひとつ以上返されるまで待機する．返された回答は回答集合に追加される
4. 回答集合から，全体としての結論を生成する
5. 推論マネージャは必要に応じて，回答のあった知識表現に対して推論方法を変更したりルールを再構成したり知識表現を変更したりする．

図 2 に推論処理の様子を示す．この図は 2 つの知識表現があり，これらに推論要求が渡された例である．縦方向は時間の流れを示し，下にいくほど処理が進んでいることを表す．長方形の枠のある部分は，そこで推論が処理中であることを示す．

この図は 2 つの推論処理を行っている．始めの推論処理では，待機時間内に推論が完了した知識表現 i の回答は採用され，待機時間後に推論が完了した知識表現 j の回答は破棄されている．また，次の推論処理では，知識表現 j はまだ前の推論を処理中のため，知識表現 i のみが推論を行っている．知識表現 j は始めの推論処理が完了して回答が破棄された直後に，この推論処理を行っている．知識表現 i は待機時間内に推論が完了せず，しばらく経ってから回答しているが，これが待機時間後の最初の回答であるため，知識表現 j の回答を採用している．知識表現 i の 2 番目の推論処理の回答は待機時間後の最初の回答ではないため破棄される．

(3) 知識表現における推論処理

常に最新の推論命令のみを処理するため，処理番号を用いる．処理番号は推論システムが持っており，初期

値は0である．これは推論処理ごとに1ずつ増加する．推論命令が送信されるとき，そのとき推論命令の中にその時点での処理番号を記録しておく．推論命令は知識表現のキューに蓄えられ，順番に処理される．ひとつのデータが知識表現に与えられたときの推論の流れを次に示す．

1. キューが空のときはキューに命令が入るまで待機する
2. 知識表現はキューから命令を取り出す．
3. Step 1で取り出された命令中の処理番号とシステムの処理番号を比較する．処理番号が一致しない場合はStep 1へ戻る
4. 推論を行う
5. 命令中の処理番号とシステムの処理番号を比較する．処理番号が一致しない場合はStep 1へ戻る
6. 推論システムに対し回答を返信し，Step 1へ戻る

つまり，推論の処理が遅れた場合は次の問題が来ても間にあわず，結果的に次の推論が実行されない場合がある．

例を図3に示す．この例では推論命令[処理番号3]が送信される．その後，知識表現の推論処理が完了するまでに，さらに推論命令[処理番号4]と推論命令[処理番号5]の2つが送信されたとする．このとき，推論命令[処理番号3]の推論の結果は破棄され，さらに推論命令[処理番号4]が破棄される．そして，推論命令[処理番号5]が処理される．

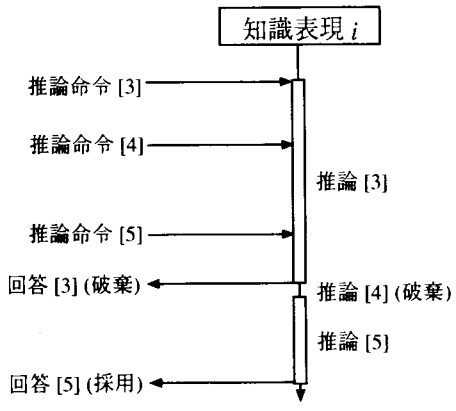


図 3: 知識表現での推論の処理

(4) 推論マネージャの処理

前述したように，推論マネージャは回答のあった知識表現に対してのみ次の3つの操作を行う．

(a) 推論方法の変更　(m_1 回連続不正解のとき)
(b) ルールの再構成　(m_2 回連続不正解のとき)
(c) 知識表現の変更　(m_3 回連続不正解のとき)

これらは毎回必ず実行されるわけではなく，上記のように何回か連続で不正解であったときに実行される．つまり，正解である場合は推論マネージャはなにも行わないし，不正解であっても上の条件が満たされなければなにも行わない．なお，一般的には，$m_1 \leq m_2 \leq m_3$ とする．この3つの方法を具体的に説明する．

(a) 推論方法の変更

現在の知識表現の推論法のなかで，妥当だと思われる推論法に切り替える．すなわち，知識表現が持つすべての推論法を用いて，データ集合に対して推論を行う．そして，一番正解率の高い推論法に切り替える．

(b) ルールの再構成

現在の知識表現が持つルールの生成法を用いて，システムに保存されているデータ集合からルールを作り直す．

ルールの再構成が効果があったかどうかを評価する基準として，次の評価関数を用いる．

$$H(c_a, r_a) = c_a + \frac{\alpha}{r_a} \tag{1}$$

ここで，

c_a ：学習方法 a の正解率
r_a ：学習方法 a のルール数
α ：パラメータ

とする．データ集合に対して推論を行い，評価関数の値を再構成前と再構成後とで比較する．再構成後の値の方が大きい場合には，ルールの再構成に意味があると考え，新しいルールで処理を続ける．再構成後の値のほうが小さい場合には，ルールの再構成に意味がないと考え，知識表現の変更を行う．

(c) 知識表現の変更

知識表現のカタログ(これはシステム起動時に設定される)のすべての知識表現でデフォルトの推論法を用いて，データ集合に対して推論を行い，式 (1) の値が最大となる知識表現に切り換える．値が同じ場合は先に登録した知識表現(一般的には簡単な知識表現)を選択する．

4. 知識表現

ここでは，本手法で用いる4つの知識表現について簡単に説明する．

学習データと同じ形式のルール

[生成法]
・データ点をルールとする方法 (G_1)
・クラスタリングを行い，その重心をルールとする方法 (G_2)

[推論法]
・最も類似しているルールによる方法 (R_1)
・非類似度による重みを考慮する方法 (R_2)

ファジィルールによる表現

[生成法]
・各属性ごとに一定数のファジィ集合を作成する方法 (G_3)
・クラスタリングを行い，それをファジィルールにする方法 (G_4)

[推論法]
・ファジィ推論 (min-max-重心法) による方法 (R_3)
・ファジィ推論 (×-+-重心法) による方法 (R_4)

決定木による表現

[生成法]
・ID3 を用いて決定木を作成する方法 (G_5)

[推論法]
・決定木を用いて推論を行う方法 (R_5)

ファジィ決定木による表現

[生成法]
・ファジィID3 を用いて決定木を作成する方法 (G_6)

[推論法]
・ファジィ決定木を用いて推論を行う方法 (R_6)

5. 数値実験

本システムを用いて数値実験を行った．Stefan Aeberhard のワインデータ [2] を使用した．これはイタリアのワインをアルコール含有量やマグネシウム含有量といった分析データを基に，Australia, California, Chile という 3 つの栽培種に分類している．属性は 13 個であり，すべて連続属性となっている．データ数は 178 個であり，3 つのクラスのデータ数は Australia が 59 個，California が 71 個，Chile が 48 個となっている．この 178 個を無作為にひとつずつ取り出して次の 3 通りの方法でシステムに与えていき，累積の正解率を得る．これを 100 回行い，累積正解率とルール数の平均値，標準偏差，最小値，最大値を調べた．結果を表 1 に示す．

(a) は以前までの方法と同じである．$m_1 = 2, m_2 = 3, m_3 = 4, \alpha = 1$ とし，クラスタリングは最短距離法を用いしきい値は 0.2 とした．ファジィID3 では作成時の占有率は 0.8 とした．

(b) はふたつの知識表現スレッドを用いた．回答のための待機時間は 10ms とした．ひとつ目は (a) と同じパラメータを用いる．ふたつ目はひとつ目の知識表現が不正解であった推論データだけを加えていき，その個数が 10 の倍数となるたびに知識表現の変更を行う (ただし $\alpha = 0$)．すなわち，不正解データを重点的に学習を行う．正解の判定は，2 つのスレッドが返す推論結果の，クラスの度合いを合計して度合いが最大となるクラスとの比較で行う．累積の正解率は 2 つの推論/学習過程の平均で，ルール数は終了時のすべての推論/学習過程のルール数の合計である．

表 1: 累積正解率とルール数の比較

累積正解率				
	平均	標準偏差	最小	最大
(a)	0.8154	0.002660	0.6461	0.9101
(b)	0.8361	0.001699	0.6966	0.9101
(c)	0.7762	0.004075	0.5787	0.8989

ルール数				
	平均	標準偏差	最小	最大
(a)	26.64	2.965	13.17	29.73
(b)	45.42	2.415	35.38	49.55
(c)	32.07	2.895	19.02	34.82

(c) は (b) におけるふたつ目の知識表現スレッドのパラメータ $\alpha = 1$ とした．

(a) と (b) を比較すると，累積正解率が約 3%増加し，ルール数が約 70%増加することがわかる．これは不正解データの知識が多少生きた反面，不正解データがそのまま覚えられてしまい，ルールが非常に増加したと考えられる．

また，(a) と (c) を比較すると，累積正解率が約 5%減少し，ルール数が約 20%増加することがわかる．これは，不正解データがクラスタリングなどの操作で不正解データとしての特性が失われて，誤った推論結果を返すようになったためと考えられる．

6. おわりに

複数の推論/学習過程の処理を行うため，知識表現をスレッド化したものを同時に動かす枠組みを提案し，シミュレーションシステムのプロトタイプを作成した．しかし，複数の知識スレッドを用いた推論/学習過程にはさまざまな組み合わせや連携などが考えられる．今後はこれらについて研究を進めていきたい．

参考文献

[1] 馬野 元秀, 松本 裕二, 宇野 裕之, 瀬田 和久: ルールの生成法と推論法を変化させる学習の拡張, 第 16 回ファジィシステムシンポジウム, pp.463–466, 2000.

[2] ftp://ftp.ics.uci.edu/pub/machine-learning-databases/wine/wine.names

[問い合わせ先]
〒 599–8531 堺市学園町 1–1
大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
馬野 元秀 (Tel 0722–54–9675, Fax 0722–54–9930)
Internet: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

自己組織化学習と教師付き学習の融合アルゴリズム

Fusion Algorithm of Self-Organized and Supervised Learning

工藤 陽　白砂 剛　菊池 浩明　内田 理　中西 祥八郎
Akira Kudo　Takeshi Shirasuna　Hiroaki Kikuchi　Osamu Uchida　Shohachiro Nakanishi
東海大学電子情報学部
School of Information Technology and Electronics, Tokai University

Abstract: A SOM (Self-Organizing Map) that is a neural networks algorithm of widely used in the real world has a self organizing function which is able to extract a submerged feature in the complex data by only giving them to a neural network. Since SOM has the self organizing function, it needs no desired signal for the learning. However, the SOM sometime may presents the output which user does not desires. In this case, user may wants to modify the results of SOM. For this purpose, we(or the authors) propose a new fusion algorithm, which makes SOM act in concert with a supervised learning, to modify the SOM's results.

1. はじめに

1984 年に T. Kohonen によって発表された自己組織化マップ(Self-Organizing Map：SOM)は，現在，情報科学，工学，脳科学，統計学など，広い分野の研究者によって研究されており，着実に進歩を遂げている．また，SOM は特徴抽出等優れた能力を有しているので，データマイニングをはじめ，画像処理や言語処理など，実に様々な方面への応用が提案されている[1].

膨大なデータを特徴ごとに分類するクラスタリング手法のひとつとして SOM があげられる．しかしながら，SOM によるクラスタリングの結果とユーザの望むそれとは異なる場合も多々あり，そのような場合にはユーザによってある程度の出力制御を行えることが望まれる．

本稿では，SOM が有する自己組織化のアルゴリズムに教師付き学習のアルゴリズムを協調させて働かせることにより，ユーザの意志によって出力マップを制御できる手法を提案する．

2. 自己組織化マップ（SOM）

T. Kohonen によって提案された SOM は自己組織化能力を有し，教師なし学習を行うニューラルネットワークの代表的なものとしてよく知られている．このモデルではユニットが一次元または二次元のつながりをもって配置され，競合により勝ち残ったユニット（勝利ユニット）と共に，その近傍にあるユニットも同時に学習を行うことを特徴としている．SOM は複雑な入力データ群の内部に潜む陽には表れない特徴を自動的に抽出する優れた能力を有している．この特徴抽出能力を利用し，データ内に潜む特徴ごとのパターン分類に応用できることが知られている．

しかしながら，SOM の学習結果は大きくアルゴリズムに依存しており，扱う問題によってはその特徴抽出能力を生かすことができない場合も存在する．

3. 自己組織化学習と教師付き学習の融合アルゴリズム

自己組織化学習はデータ分布の特徴を分析したい場合などに大変有効な手段ではあるが，扱う問題の難易度やデータの特徴などによっては出力結果がユーザの望むものとは一致しない場合も存在する．一方で，自己組織化の学習結果に加えて，ある程度ユーザの主観を踏まえて分類を行いたい事例なども多く存在する．その様な場合は従来の自己組織化学習に加え，ユーザの意志で分類結果を制御できることが望ましく，これに対応する新しいアルゴリズムの提案が求められる．出力結果の制御方法は数多く考えられるが，本稿ではニューラルネットワークの分野において一般的である教師付き学習(Supervised Learning)に着目し，それを用いる．

3.1 自己組織化学習アルゴリズム

図 1 に示すような，ユニット数 M の入力層とユニット数 N の出力層から成るネットワークにおいて，入力パターンを M 次元の入力ベクトル $\mathbf{x}=(x_1,x_2,\cdots,x_M)$ で表し，入力ユニットと n 番目の出力ユニットを結ぶ結合重みベクトルを $\mathbf{w}_n=(w_{n1},w_{n2},\cdots w_{nM})$ とする．ここで，w_{nm} は m 番目の入力ユニットと n 番目の出力ユニットの結合重みである．

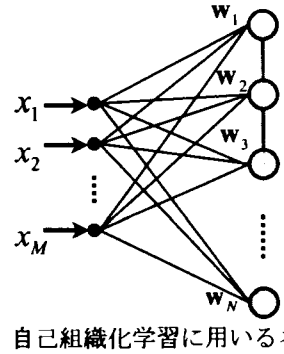


図 1　自己組織化学習に用いるネットワーク

それぞれの入力パターン $\mathbf{x}$ に対して $\|\mathbf{x}-\mathbf{w}_n\|$ が最小となるユニット，つまり入力データと最も類似している重みベクトルを検出し，その重みベクトルと結合している出力ユニットを勝利ユニット c とする．すなわち，次のように勝利ユニットを決定する．

$$\|\mathbf{x}-\mathbf{w}_c\| = \arg\min_n \|\mathbf{x}-\mathbf{w}_n\| \quad (1)$$

ただし，$\|\mathbf{x}-\mathbf{w}_n\|$ は，次式で示す入力ベクトル $\mathbf{x}$ と重みベクトル $\mathbf{w}_n$ とのユークリッド距離である．

$$\|\mathbf{x}-\mathbf{w}_n\| = \sqrt{\sum_{k=1}^{m}(x_k - w_{nk})^2} \quad (2)$$

重みベクトルの更新式は以下のように表される．

$$\mathbf{w}_n(t+1) = \mathbf{w}_n(t) + \Delta\mathbf{w}_n^{self} \quad (3)$$

$$\Delta\mathbf{w}_n^{self} = -\varepsilon g_{cn}(\mathbf{x}-\mathbf{w}_n) \quad (4)$$

ここで，$\Delta\mathbf{w}_n^{self}$ は自己組織化学習における更新量を表す．また，ε は $0<\varepsilon<1$ を満たし，学習回数の増加に応じて減少する係数である．g_{cn} は勝利ユニット c と n 番目の出力ユニットの近傍関係 h_{cn} によって決まる近傍関数であり，次のようなガウス関数を用いる．

$$g_{cn} = \exp\left(-\frac{h_{cn}}{\delta^2}\right) \quad (5)$$

ただし，δ^2 は調整用のパラメータとする．δ も ε と同様に，学習回数とともに減少させていくのが一般的である．更新則を表す(3)式と(4)式により，勝利ユニット c およびその近傍に存在するユニットの重みベクトルは入力ベクトルに近づく方向に修正される．

3.2 教師付き学習のアルゴリズム

図 2 のようなユニット数 M の入力層と，ユニット数 N の出力層から成る 2 層のネットワークにおいて，各重みベクトル $\mathbf{w}_n$ の学習後の値として望ましいものを教師ベクトル(Desired Vector) $\mathbf{d}_n$ とし，$\mathbf{w}_n$ と等しい次元数で与える．

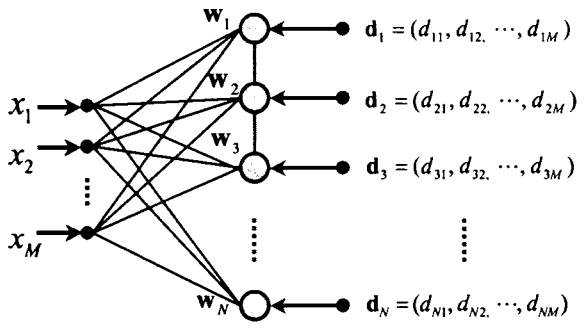


図 2　教師付き学習に用いるネットワーク

$\mathbf{d}_n$ の決定方法としては，自己組織化学習による結果を検討して人間が設定する方法や，あらかじめ指標となるデータを用意しておく方法などがある．

教師ベクトル $\mathbf{d}_n$ と重みベクトル $\mathbf{w}_n$ との差を求め，それを減少させるように $\mathbf{w}_n$ を更新することにより教師付き学習を実現する．すなわち，学習則は以下のように表すことができる．

$$\mathbf{w}_n(t+1) = \mathbf{w}_n(t) + \Delta\mathbf{w}_n^{desire} \quad (6)$$

$$\Delta\mathbf{w}_n^{desire} = -\eta(\mathbf{d}_n - \mathbf{w}_n) \quad (7)$$

ここで，$\Delta\mathbf{w}_n^{desire}$ は教師付き学習における更新量を表し，η は $0<\eta<1$ を満たす学習係数である．

自己組織化学習が重みベクトルを入力ベクトルに近づけたのと同様に，この教師付き学習も重みベクトルを教師ベクトルに近づける方向に学習する．これにより，重みベクトルを教師ベクトル，すなわちユーザの望む値とほぼ一致させることが可能である．

3.3 教師付き学習と自己組織化学習の融合アルゴリズム

3.1 節で述べた自己組織化学習に対して 3.2 節で述べた教師付き学習のアルゴリズムを付加し，両者を協調させて働かせることで，自己組織化学習による出力結果とユーザの主観や希望する出力結果の両方を踏まえた学習結果を得ることができる．これら二つの学習方式は教師信号の有無という点で相反する学習方式であるように思えるが，自己組織化学習に教師付き学習の概念を付加し，ふたつのアルゴリズムを融合させて用いることで従来の自己組織化学習では補えない部分を補足するには有効な手段となる．その例としては，自己組織化学習の結果も考慮しつつ自らの主観も交えた結果を出したい場合や，自己組織化学習によるクラスタリング結果が不適当で出力の調整をしたい場合などがあげられる．さらに，自己組織化学習の割合と教師付き学習の割合をユーザが自在に変化させられるようにすることで，ひとつの学習アルゴリズムを用いていながら，多様な出力を導き出せる学習アルゴリズムとなる．これによりフレキシブルな出力制御が行えるようになり，結果としてその応用範囲も広がることが予想される．

自己組織化学習アルゴリズムと教師付き学習アルゴリズムを融合させるために，学習比率 $\alpha(0<\alpha\le 1)$ を導入する．この比率を用いて，自己組織化学習の割合を α，教師付き学習の割合を $1-\alpha$ で学習させる．すなわち，3.1 節および 3.2 節で述べた各学習アルゴリズムで得られた更新量 $\Delta\mathbf{w}_n^{self}$ と $\Delta\mathbf{w}_n^{desire}$ を学習比率 α で凸結合させることにより，融合アルゴリズムにおける更新量 $\Delta\mathbf{w}_n$ とする．

$$\mathbf{w}_n(t+1) = \mathbf{w}_n(t) + \Delta\mathbf{w}_n \quad (8)$$

$$\Delta\mathbf{w}_n = \alpha\Delta\mathbf{w}_n^{self} + (1-\alpha)\Delta\mathbf{w}_n^{desire} \quad (9)$$

$$\Delta\mathbf{w}_n^{self} = -\varepsilon g_{cn}(\mathbf{x}-\mathbf{w}_n) \quad (10)$$

$$\Delta\mathbf{w}_n^{desire} = -\eta(\mathbf{d}_n - \mathbf{w}_n) \quad (11)$$

上式からもわかるように，α が大きな値の時は自己組織化学習の結果に近くなり，反対に α が小さな値の時は教師付き学習の結果に近い値を示すようになる．従って，教師ベクトルの要素 d_{nm} を大きく取り過ぎた場合には，α の値を比較的大きく取ることにより所望の出力結果を得ることができる．すなわち，出力をある値に確実に収束させたいという意図がある場合は別であるが，教師信号の値はある程度おおまかに与えることが可能で，出力結果は学習比率によって調整できることを示している．また，この手法は厳密な教師信号の設定が不要なことから，ユーザの負担が軽減されることも期待される．

4. 提案アルゴリズムの応用例

今回提案した自己組織化学習と教師付き学習の融合アルゴリズムを環境問題に関するデータの分析に応用し，その有効性を検証する．

この応用例では，ある地方自治体の市民に対して行われたゴミ減量化行動に関するアンケート調査から得られたデータを使用する．使用したデータは「エコロジー関与」(環境問題に対する関心度や重要性の程度)と「リサイクル行動実践度」の程度を指標化（平均0，分散1に規準化）したものである．実際のアンケートでは約1000人の有効サンプルが得られているが，この実験では，エコロジー関与が幅広く分散するようにできる限り無作為に抽出した117個のデータを用いる．図3はその分布であり，横軸はエコロジー関与を示し，縦軸はリサイクル行動実践度を示している．これらの軸で正の値はエコロジー関与またはリサイクル行動実践度が平均よりも高いことを，負の値はそれらが低いことを示している．ここでは，環境に関する行動学的な見地からの詳細な分析は避け，単に本稿で述べたアルゴリズムの応用としてのみ用いる．

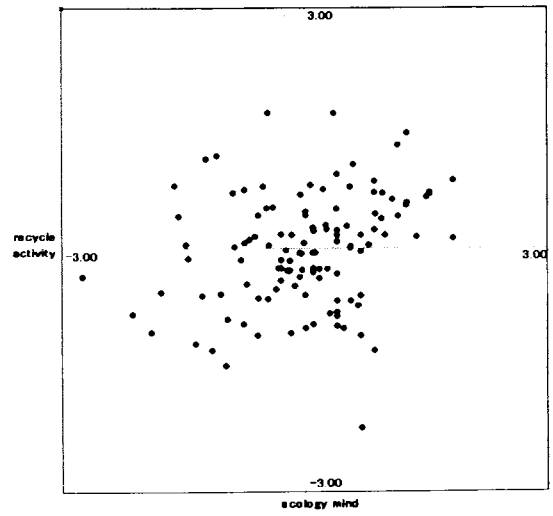


図3　実験用2次元データの分布

4.1　自己組織化学習のみによる3クラスへの分類

上に与えられたデータを，提案アルゴリズムを用いて分類する．初めは自己組織化学習のみを用いて3クラスに分類することを試みる．したがって，学習比率α =1.0と設定し，教師付き学習の効果が及ばないように学習する．その学習結果を図4に示す．学習回数は2000回である．図4で，点線で囲まれたクラスGは「エコロジスト」(通常グリーンコンシューマーと呼ばれている人達)を表しており，Rで示されるクラスは「エコロジスト予備隊」，Nで示されるクラスは「ノンエコロジスト」と呼ばれる人達の集まりを表している．図3からわかるように，「エコロジスト予備隊」を示すRのクラスと「エコロジスト」を示すGのクラスは，座標軸付近にあるデータの分布がない空間を境に分かれており，人間による判断でも妥当な分類となっている．このことから，自己組織化学習のアルゴリズムは適切にクラスタリングしていると考えられる．

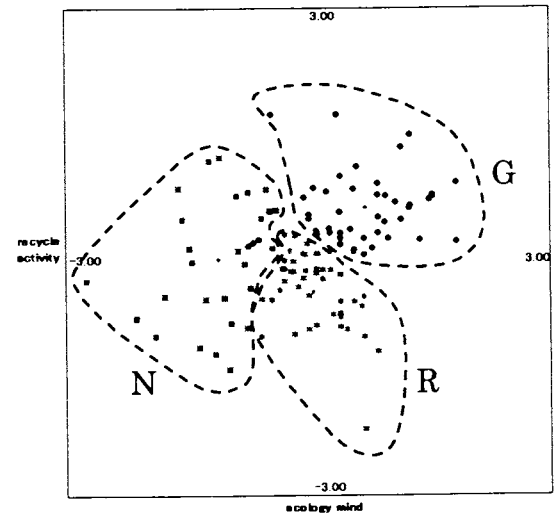


図4　自己組織化学習のみを用いた分類結果(クラス数3)

4.2　自己組織化学習のみによる5クラスへの分類

4.1節で得た分類結果をさらに詳細に分析するために，分類させるクラス数を5に増加し，同じく自己組織化学習のみを用いて実験を行った．学習回数は2500回である．その結果を図5に示す．図5において，G'は「エコロジスト」，Lは「低エコロジスト」，R'は「エコロジスト予備隊」，Dは「見せかけのエコロジスト」，N'は「ノンエコロジスト」の名称で呼ばれる人達のクラスを表している．また，4.1節で得られた結果と比較すると，図4のGクラスが，図5ではクラスG'とLの2つのクラスにおおむね分類されている．また，図4のクラスNが図5のクラスN'とDの2つのクラスにおおむね分類され，図4のクラスCは図5においてもほぼ同等の分類がされている．

細部をさらに詳細に検証するために図5の中心部を拡大したものを図6に示す．図6のクラスLの要素は，図4のクラスGとクラスRの要素を含んだものとなっている．拡大図において，図4ではRの要素であるが図6ではLの要素となっているものを「#」で表す．すなわち，図5の結果は大雑把に言えば図4のGとNがそれぞれ図5のG'とL，N'とDに分類されているが，詳細に観察すると細部においてはこの分類と異なることを示している．

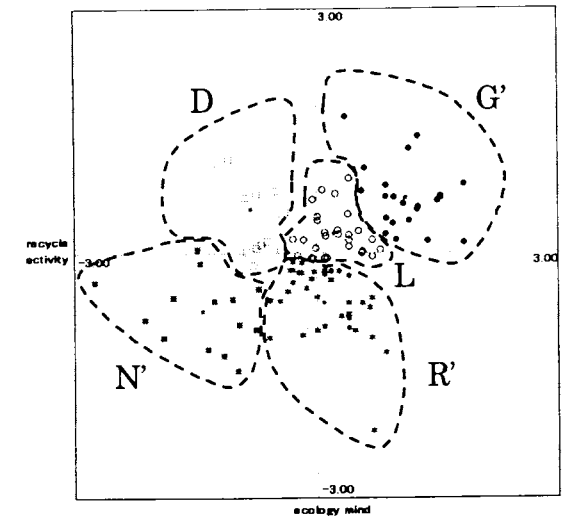


図5　自己組織化学習のみを用いた分類結果(クラス数5)

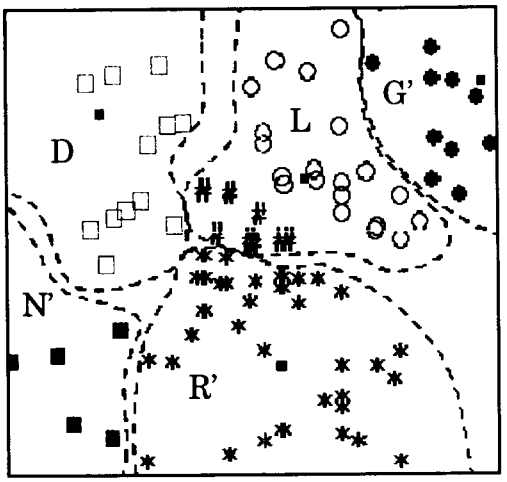


図6　図5の中心付近の拡大図

4.3　提案アルゴリズムによる出力制御の実験

4.2節で指摘した部分を細部に至るまで満足するように，すなわち，G'，L と N'，D が図4の分割を満たすように修正する．

修正のために教師信号を決めなければならない．そのために，4.2節における学習後のネットワークの結合重み(クラスの中心を示している) $\mathbf{w}_1 \sim \mathbf{w}_5$ を調べる．その後，これらをどの方向にどれ程移動させれば所望の結果になるかを人間が判断する．移動量は大雑把に決定しても学習比率によって結果を調整することができるが，方向はおおむね正確でなければならない．今回判断した $\mathbf{w}_1 \sim \mathbf{w}_5$ の修正方向および，実際に与えた教師信号 $\mathbf{d}_1 \sim \mathbf{d}_5$ の値と位置を図7に示す．なお，$\mathbf{w}_5$ に関しては特に修正の必要はないと考えられたので，修正方向は示していない．

これらの値を用いて実験を試みたところ α =0.5，つまり自己組織化学習の割合が 50%のときに最も妥当な学習結果を得られた．その結果を図8に示す．図8では，R´と L の境界が図3の結果と同様に座標軸付近に現れており，より妥当な出力結果に制御することができたといえる．また，図8は提案アルゴリズムを用いることで，図4の結果を踏まえつつ，全体的に望ましい結果を得ることができたことを示している．

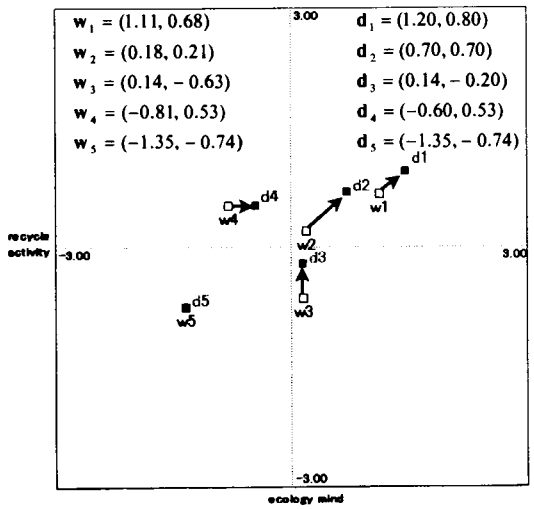


図7　重みの修正方向と教師信号の値

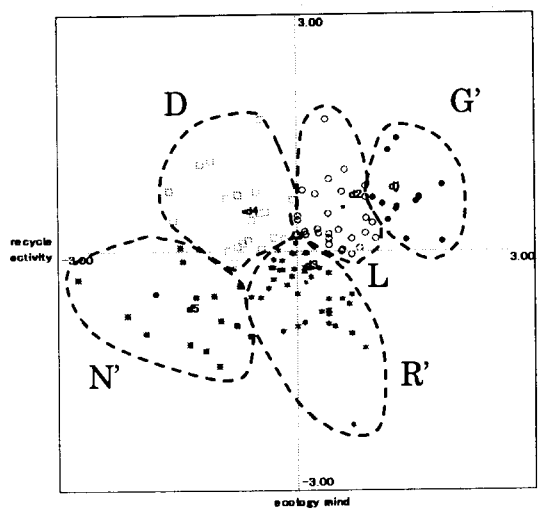


図8　学習比率 α =0.5 における実験結果

5. おわりに

従来の自己組織化学習のアルゴリズムでは補えない問題である出力マップの制御およびユーザの主観を取り入れた学習が可能なアルゴリズムを提案した．また，環境データを用いた応用例で提案アルゴリズムの有効性を検証した．その結果，提案アルゴリズムは現在さまざまな分野に応用がなされている自己組織化学習の応用範囲とその扱い易さを向上させる上で有効な手段であるといえる．

最後に，今回実験に用いたデータを提供して頂いた筑波大学大学院ビジネス科学研究科の西尾チヅル助教授のご厚意に深く感謝する．

参考文献

[1] 徳高平蔵，藤村喜久郎，山川烈：自己組織化マップ応用事例集，海文堂，2002年

[2] 馬場則夫，小島史男，小澤誠一：ニューラルネットの基礎と応用，共立出版，1994年

[3] 阿部重夫：ニューラルネットとファジィシステム，近代科学社，1995年

連絡先

〒259-1292
神奈川県平塚市北金目 1117
東海大学大学院　工学研究科　電気工学専攻
工藤　陽
電話：　0463-50-2000 Ext4025
FAX：　0463-59-4014
Email：　akira@ep.u-tokai.ac.jp

二目的ネットワーク設計問題の優先順位コードベース遺伝的アルゴリズムによる一解法
Priority-based Genetic Algorithm for Bicriteria Network Optimization Problem

玄 光 男* 林 林*
Mitsuo Gen Lin Lin
*早稲田大学大学院情報生産システム研究科
The Graduate School of Information, Production and Systems, Waseda University

Abstract: In this paper, we propose a genetic algorithm (GA) approach used a priority-based chromosome for solving the bicriteria network optimization problem including maximum flow model (MXF) and minimum cost flow model (MCF). The objective is to find the set of Pareto optimal solutions that give possible maximum flow with minimum cost. Priority-based chromosomes have been used for encoding the network optimization problem. This paper also combines Adaptive Weight Approach (AWA) that utilizes some useful information from the current population to readjust weights for obtaining a search pressure toward a positive ideal point. It is based on the Gen & Cheng's Approach. Computer simulations show the several numerical experiments by using large scale network optimization problems, and show the effectiveness of the proposed method.

1. はじめに

情報技術の発展に伴い，データ通信は日常生活において非常に重要な部分を占めるようになった。この傾向は，今後ますます発展していくと考えられる。そこて，多様なネットワーク設計が問題になってくる。本論文は，最大フロー問題と最小コスト問題の二つの競合する目的を伴うネットワーク設計問題(MXF/MCF)に対して，優先順位コードベースの遺伝的アルゴリズムによる解法を提案する。

2. MXF/MCF 問題の数学モデル

MXF/MCF 問題とは，通常各アークにコストと上限容量が与えられているネットワークにおいて，指定されたノードから他のいずれかのノードまでの総コストが最小になり，かつ総フロー量を最大にするための二目的ネットワーク設計問題である．つまり，m 個のノード $i,j \in V$(ノード集合)と n 個のアーク $(i,j) \in A$(アーク集合)をもつグラフ $G=(V,A)$ と G の各アークに関してコスト c_{ij} と容量 u_{ij} が与えられている時，MXF/MCF 問題は一般に次のように定式化される．

$$\max \quad z_1 = f$$

$$\min \quad z_2 = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} c_{ij}x_{ij}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{m} x_{ij} - \sum_{k=1}^{m} x_{ki} = \begin{cases} f & (i=1) \\ 0 & (i=2,3,\cdots,m-1) \\ -f & (i=m) \end{cases}$$

$$0 \le x_{ij} \le u_{ij} \quad ,\forall (i,j) \in A$$

$$f \ge 0$$

3. 遺伝的アルゴリズムの適用

3.1 エンコーディング処理

MXF/MCF 問題の場合，解は複数のパスからなる場合がある．つまり，一つの染色体によって複数のパスを表現できなければならない．また，単純に複数のパスを組み合わせた染色体表現の場合，プログラム作成が難解になってしまう．そこで，優先順位コードベースの遺伝的アルゴリズムを提案する．

ルーチン 1: 優先順位ベースの染色体生成
入力データ: ノードの数 m
出力データ: 染色体 v_k
ステップ 0: 染色体 $v_k(\cdot) \leftarrow 0$,染色体要素の変数 $p \leftarrow 1$.
ステップ 1: $p \leqq m$ であればステップ 3 まで繰り返し，そうでないならステップ 4 へ進む.
ステップ 2: $j \leftarrow$ **random**$(1,m)$
ステップ 3: $v_k(j)$ は 0 であれば $v_k(j) \leftarrow p$, $p \leftarrow p+1$, ステップ 1 に戻り，そうでないなら，ステップ 2 に戻る.
ステップ 4: 優先順位ベースの染色体 v_k を出力する.

3.2 デコーディング処理

集合 S_i の生成: ノード i $(1, 2,\ldots ,m)$ と連続しているノードの集合 S_i を生成する.
ルーチン 2: 染色体 v_k に基づく一つのパス生成
入力データ: ノードの数 m, 染色体 v_k, ノード i の集合 S_i
出力データ: 経路 P_k
ステップ 0: 開始ノード i$\leftarrow$1, $P_k \leftarrow \phi$.
ステップ 1: ノード i の集合 $S_i \neq \phi$ であれば，ステップ 2 まで繰り返し，そうでないならステップ 3 に進む.
ステップ 2: 高い優先順位をもつノードの選択.
ノード i の集合 $S_i=\{j \mid (i,j) \in A\}$ の経路を探索し，生成した染色体の優先順位ベースによって，高い優先順位を持つノード l を選び，$P_k \leftarrow P_k \cup \{x_{il}\}$, $i \leftarrow l$ を設定する.
ステップ 3: 経路 P_k を出力する.

$$P_k = \{x_{1l_1}, x_{l_1,l_2}, x_{l_2,l_3}, \ldots, x_{l_{m-1},l_m}\}$$

ルーチン 3: 染色体 v_k に基づくすべてのパス生成
入力データ: 染色体 $v_k(\cdot)$, ネットワークデータ (N,A,C,U), ノード i の集合 S_i
出力データ: パスの数 L_k, 経路のコスト c_i^k とフロー量 v_i^k $\forall i \in L_k$
ステップ 0: $l \leftarrow 0$, 初期経路 $x_{ij} \leftarrow 0$, $\forall i,j \in A$
ステップ 1: 集合 $S_l \neq \phi$ であれば，$l \leftarrow l+1$, ステップ 6 まで繰り返し，そうじゃないなら，ステップ 7 へ進む.

ステップ2: 染色体 $v_k(\cdot)$と集合 S_i を用いて，一つパス P_l^k をルーチン2によって生成し，パス P_l^k の終了ノード a を求める.

ステップ3: パス P_l^k の終了ノード $a=m$ であれば，ステップ4へ進み，そうじゃないなら，x_{ia} によって，以下のように S_i を更新し，ステップ1に戻る.

$$S_i \leftarrow S_i - \{a\}, \forall i$$

ステップ4: 生成したパス P_l^k のコスト c_l^k とフロー量 v_l^k を計算する.

$$v_l^k \leftarrow v_{l-1}^k + \min\{u_{ij} \mid (i,j) \in P_{lk}\}$$

$$c_l^k \leftarrow c_{l-1}^k + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} c_{ij}(v_l^k - v_{l-1}^k)$$

ステップ5: 各 P_l^k のアークの容量 u_{ij} と x_{ij} を更新する.

ステップ6: 各アークにおいてチェックを行い，u_{ij}=0,$\forall (i,j) \in P_l^k$ の条件を満たすノード j がある場合，ノード j を通るパスは生成できなく，それぞれの S_i を更新する.

ステップ7: パスの数 $L_k \leftarrow l$-1，経路 $i \in L_k$ のコスト $c_\wedge^k$ とフロー量 $v_\wedge^k$ を出力する.

3.3 パレート解の生成

2目的最適化問題において，求めたい解は2つの目的関数を同時に満たす解である．しかし，実際には，この2つの目的関数を同時に満たす解は存在せず，互いの目的関数値がトレードオフの関係を持つ解集合になる．この解は，非劣解（パレート最適解）と呼ばれる．遺伝的アルゴリズムを多目的最適化問題に適用する場合は，通常の解集合とは別の非劣解集合をもち，各世代の解集合によって非劣解集合を更新することになる.

3.4 遺伝的操作

交叉：ここでは，二つの染色体をランダムに選んで，PMX法(partially matched crossover: 部分一致交叉)[2]を使用する.

突然変異: ここでは，親染色体をランダムに選んで，二つのビットポジションを交換する.

評価：ここでは，一つの染色体によって複数の解を表現する場合があるので，従来の多目的問題において用いた評価方法を，そのまま使用することは出来なく，適応的重み手法(AWA)[4]を拡張し，評価操作を行う.

4 数値実験

図1に示した25個のノードと49本のアークを持つ最大フロー問題の数値例[1](Munakata, T. & D.J. Hashier (ICGA-93)) に基づいて，各アークにコストが与えられ，優先順位に基づくエンコーディング法で解くことにする.

初期パラメータの設定：

集団サイズ	pop_size =20
交叉確立	p_C=0.20
突然変異確立	p_M=0.02
最大世代数	max_gen =1000

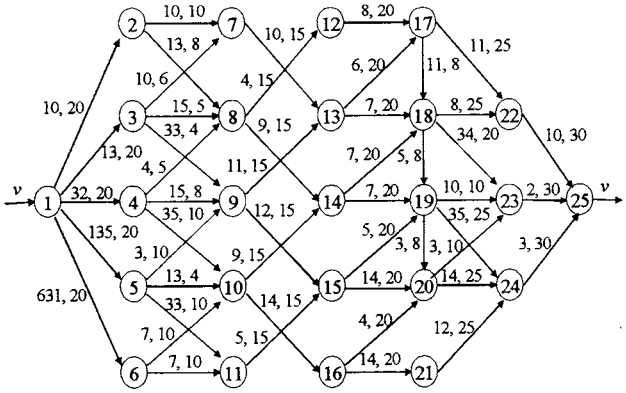


図1：MXF/MCF 問題の数値例

図1に示したMXF/MCF問題の数値例のパレート最適解は次の図2のようになる.

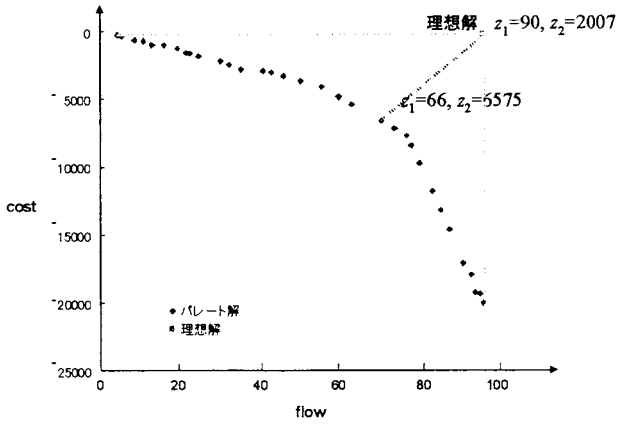


図2: 数値例のパレート解

参考文献

[1] Munakata, T. & D.J. Hashier: "A Genetic Algorithm Applied to the Maximum Flow Problem", *Proc. of 5th International Conference on Genetic Algorithms*, pp.488-493, 1993.

[2] Gen, M. & R. Cheng: *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Sons, New York, 1997.

[3] 玄 光男，井田 憲一: ニューラルネットワークと最適化，共立出版，1998.

[4] Gen, M. & R. Cheng: *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*, John Wiley & Sons, New York, 2000.

[5] Gen, M., R. Cheng & S.S. Oren: "Network design techniques using adapted genetic algorithms", *Advances in Engineering Software*, Vol.32, pp.731-744, 2001.

[6] Chang, W. & R. S. Ramakrishna: "A Genetic Algorithm for Shortest Path Routing Problem and the Sizing of Populations", *IEEE Trans. Evol. Comput.*, Vol. 6, No. 6, pp.566-579, 2002.

Multi-objective hybrid genetic algorithm for advanced scheduling problem in MTO manufacturing system

KwanWoo Kim,
Tokyo Metropolitan Institute of Technology

Mitsuo Gen
Waseda University

Genji Yamazaki
Tokyo Metropolitan Institute of Technology

Abstract: In this paper, we propose an advanced scheduling problem to generate the schedules considering resource constraints and precedence constraints in make-to-order (MTO) manufacturing. Precedence of work-in-process and resources constraints, in advanced scheduling problems, have recently emerged as one of the main constraints. The advanced scheduling problems is formulated as a multi-objective mathematical model for generating operation schedules which are obeyed resources constraints, alternative resources and the precedence constraints in MTO manufacturing. For effectively solving the advanced scheduling problem, the multi-objective hybrid genetic algorithm (m-hGA) is proposed in this paper. The m-hGA is to minimize the makespan, total flow time of order, and maximum tardiness for each order, simultaneously. The m-hGA approach with local search-based mutation through swap mutation is developed to solve the advanced scheduling problem. Experimental result is presented for advanced scheduling problems of various sizes to describe the performance of the proposed m-hGA.

1. Introduction

Many manufacturing companies consider the integrated and concurrent scheduling as a global optimization technology could manufacture various products more responsive to customer needs. In the theory of scheduling, a set of customer orders is to be processed on a set of facilities in order to satisfy one or more certain performance measures.

In a make-to-order (MTO) environment, the advanced scheduling has been recommended by the above researches. However, the major weakness of the models introduced so far lies in that they considered the alternative resources for each operation with a fixed sequence when constructing a schedule or the single objective function.

In this paper, we propose a mathematical model for generating operations schedules which are obeyed resources constraints, alternative resources and the precedence constraints in MTO manufacturing. The objective of the model is to minimize the makespan with total flow time for each order and maximum tardiness for each order. We also develop a multi-objective hybrid genetic algorithm (m-hGA) for minimizing the makespan, total flow time of order and maximum tardiness of order such as advanced scheduling environment.

2. Advanced Scheduling Problem

Advanced scheduling enable companies to reduce their cost of goods sold and increase customer satisfaction by making more of the right products at the right times, using an optimal combination of manufacturing resources. Advanced planning systems utilize complex mathematical algorithms to forecast demand, plan and schedule production within specified constraints, and derive optimal sourcing and product-max solutions. Typical dynamic manufacturing system is composed of multiple workstations, a material handling system, and a loading-unloading station.

Fig. 1 shows basic concept of design of manufacturing systems in advanced scheduling environment. When customers order various products, manufacturing company have to produce customer's products with the limited resources such as manpower, material, and equipment under the appointed date of delivery. So MTO is that the manufacturer does not start to manufacture the product until a customer order is received.

Their objective is to schedule the operations with resources constraints and the work-in-process (WIP) precedence constraints about customers various orders in manufacturing company with multiple workstations (or machine centers).

Fig. 2 shows flexible WIP process of the operations as MTO to make two products. Then the following MTO process is legal:

(Order1) = WIP1($o_1 \rightarrow o_5 \rightarrow o_3$) $\oplus$ WIP2($o_2 \rightarrow o_3$),
(Order2) = WIP3($o_1 \rightarrow o_4$)$\oplus$ WIP4($o_2 \rightarrow o_4 \rightarrow o_5$).

Where work in process (WIP) means the progress of work for constraining operations precedence, and $\oplus$ means the WIP processes which have to assemble together when get the some orders.

In order to minimize WIP, a precedence feasible schedule is constructed in which the operations are scheduled at processing time and constrained resource.

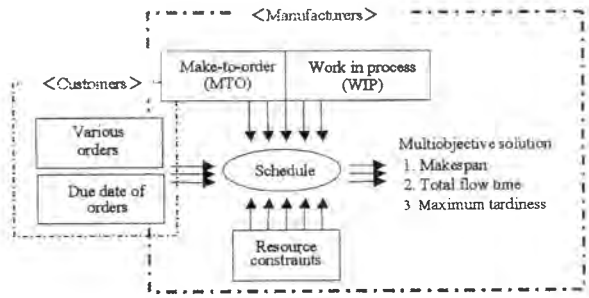


Fig. 1 Basic concept of advanced scheduling

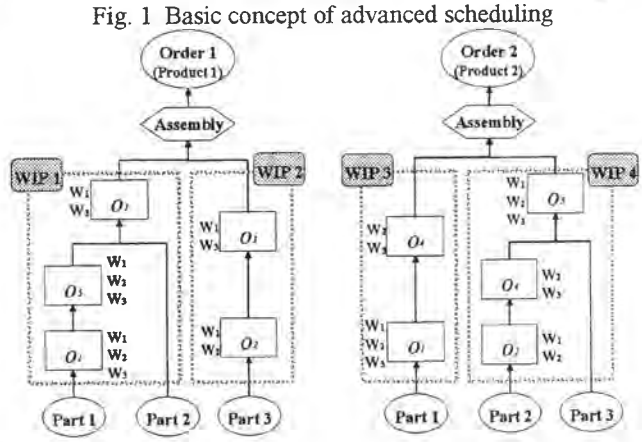


Fig. 2 Example of flexible WIP process as MTO

3. Mathematical Model of Multi-objective Functions

In order to formulate an integrated model, the following indices and parameters are introduced:

Indices

i : operation index, $i = 1,2,\cdots,I$.

j : workstation index, $j = 1,2,\cdots,J$ (or W_j, $j = 1,2,\cdots,J$).

k : order index, $k = 1,2,\cdots,K$ (or E_k, $k = 1,2,\cdots,K$).

parameters

t_{ijk}^F : (the integer valued) finish processing time of operation o_i on selected workstation W_j for each order E_k.

t_k^D : the due date of the each order E_k (the promised completion time of each order).

p_{ijk} : the processing time of operation o_i on workstation W_j for each order E_k.

r_{ijk} : the amount of resource required by operation o_i on workstation W_j for each order E_k.

R_j : the maximum-limited resource required on workstation W_j.

In advanced scheduling problem, the objectives of the model are to minimize the makespan t_M, total flow time of order t_F and maximum tardiness $T_{\max}$. The problem can be formulated as follows:

$$\min\ t_M = \min\{\max_{i,j,k}\{t_{ijk}^F\}\} \quad (1)$$

$$\min\ t_F = \min\sum_{k=1}^{K}\max_{i,j}\{t_{ijk}^F\} \quad (2)$$

$$\min\ T_{\max} = \min\sum_{k=1}^{K} T_k \quad (3)$$

$$T_k = \max\{\max_{i,j}\{t_{ijk}^F\} - t_k^D,\ 0\},\ k = 1,2,\cdots,K \quad (4)$$

s. t.

$$t_{ijk}^F - t_{(i-1)jk}^F \geq p_{(i-1)jk},\ i \in WIP_l,\ l = 1,\cdots,L,\ j = 1,2,\cdots,J \quad (5)$$

$$\sum_i\sum_k r_{ijk} \leq R_j,\ j = 1,2,\cdots,J \quad (6)$$

$$t_{ijk}^F \geq 0,\ i \in WIP_l,\ l = 1,\cdots,L,\ j = 1,2,\cdots,J,\ k = 1,2,\cdots,K$$

4. The Multi-objective Hybrid Genetic Algorithm

The following genetic operations are employed to generate and handle a population (i.e., a set of strings) in our multi-objective hybrid genetic algorithm (m-hGA) for multi-objective advanced scheduling problem (see Fig. 3).

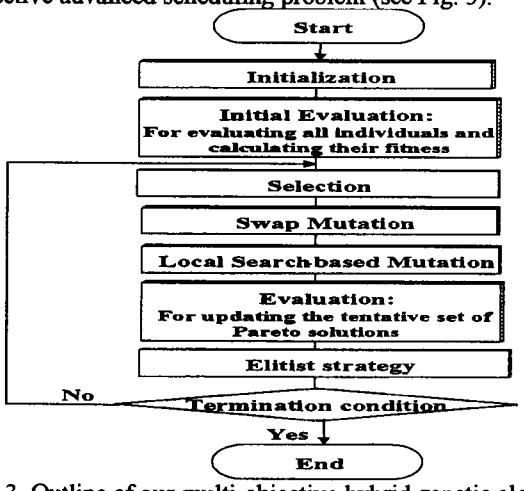


Fig.3 Outline of our multi-objective hybrid genetic algorithm for advanced scheduling problem

5. Experiment Result

For the experiment, we consider the advanced scheduling problem that finds the optimal solution with ten operations on five workstations as five orders from customers.

In Fig. 4 shows the tentative set of Pareto optimal solutions obtained by the proposed m-hGA with the bi-objective problem. The proposed algorithms are implemented in JAVA language on PC Pentium 1400 MHz clock-pulse and 255MB RAM as operation system. In the example, limited resource which the amount of resource used by all activities does not exceed its limited quantity is 10.

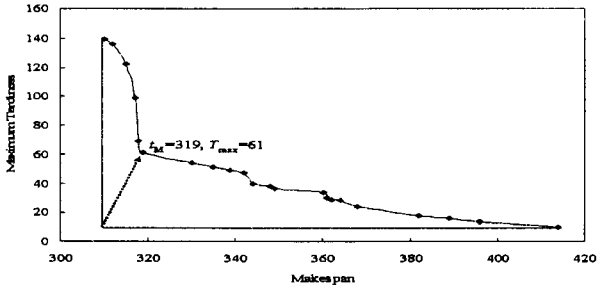


Fig. 4 Pareto solution using our m-hGA with bi-objective problem

The evolutionary environment for the problem was set as follows: population size (ψ_{pop_size} was 50, swap mutation (SM) [1] and local search based mutation (LSM) were 0.3, respectively, and maximum generation (ψ_{Max_gen}) was 1000. In this section, we demonstrate the effectiveness of our m-hGA by computer simulations on a multi-objective advanced scheduling problem with bi-objectives: to minimize the makespan and the maximum tardiness. We also apply our algorithm to the multi-objective advanced scheduling problem with the tri-objectives: to minimize the makespan, the maximum tardiness, and the total flow time. About tri-objective problem, the criterions proposed by Ishibuchi [2] and Lo [3] are introduced to evaluate the performances. The major points to be compared are listed as follows:

1. The number of Pareto randomly generate solutions (S_P) of each approach after the approaches are compared with each other.
2. The number of obtained solution (S_o) searched by each approach (except of Pareto optimal solutions).
3. Percentage of Pareto optimal solutions (S_p / S_o).

The average performance of bi-objective and tri-objective problem over the 20 trials using m-hGA is shown in Table 1.

Table 1 The performance result of bi-objective and problem using m-hGA

	S_P	S_o	Ration: S_P / S_o	CPU time (sec)
$t_M, T_{\max}$	16.25	19.28	84.28%	11.52
t_M, t_F, p_T	85.65	98.37	87.07%	13.72

6. Conclusion

In this paper, we formulated the advanced scheduling problem as a mathematical model of multi-objective function, and proposed a multi-objective hybrid genetic algorithm approach with local search-based mutation through swap mutation for integrated process planning. Then the advanced scheduling environment characterized by precedence and resource constraints for make-to-order and alternative workstations with different processing times. In computational experiment, it is found that the proposed multi-objective hybrid genetic algorithm approach could produce best results in terms of the makespan, total flow time and maximum tardiness of order.

References

[1] Gen, M. and Cheng, R.: *Genetic Algorithms and Engineering Optimizations*, John Wiley & Sons, New York, USA (2000).

[2] Ishibuchi, H. and Murata, T., A Multi-objective Genetic Local Search Algorithm and Its Application to Flow shop Scheduling, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C; Applications and Reviews*, Vol.28, No. 3, pp.392-403 (1998).

[3] Lo C.C. and Chang W. H., A Multiobjective Hybrid Genetic Algorithm for the Capacitated Multipoint Network Design Problem, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, Vol.30, No.3, pp.461-470(2000).

Hybridized Genetic Algorithm for Obstacle Location-Allocation Problem

Admi Syarif[*,], Xiaodong Wang[*], Mitsuo Gen[***], and Takao Yokota[*]**

[*]*Department of Industrial & Information Systems Engineering,*
Ashikaga Institute of Technology, Ashikaga 326-8558, Japan
E-mail: admi@genlab.ashitech.ac.jp
[**]*Department of Mathematics, Lampung University,*
Bandar Lampung, Indonesia, 35148
[***]*Graduate School of Information, Production and Systems Engineering,*
Waseda University, Kitakyushu, 808-0135, Japan
E-mail: gen@waseda.jp

Abstract: The location-allocation problem is known as one of the important problem faced in industry. There are many variations of this problem for different applications; however, most of them consider no obstacle existing. In this paper, we consider an extended location-allocation called *obstacle allocation problem*. Since this problem is very complex, it is very difficult to solve it optimally. Here, a genetic algorithm approach is proposed for solving this problem. In order to show the effectives of the proposed method, several numerical experiments are done and the results are presented.

Keywords: Location-allocation Problem, Genetic Algorithm, Fuzzy Logic Controller

I. Introduction

Determination location/allocation of facilities is one of the key strategic decisions faced by both private and public industries. It is also often related to the investment strategy in industrial environment. It include the decision where or which facilities should be build and how to assign the corresponding customer to the facilities. There have been many variant of location/allocation problems in the literature. However, in general it can be categorized according to its capacity constraint [1]. The problem without capacity constraint is called un-capacitated location/allocation problem and the problem with capacity constraint is capacitated location/allocation problem.

A more realistic model of location/allocation problem was introduced by Gong *et. al* [2]. Imagine you are building a number of plant to serve customer or distribution center throughout the known earth. As a wise decision maker, the time has now come for you to choose the new location for the plants. In order to make your customer happy, it is important to minimize the distance of the road to connect all of your customers to the plants. For simplicity, assume that each of your customers can only be served by one plant. In the case of obstacle location/allocation problem considered in this paper, we have other physical obstacles that affect the placement of the plants and road. The first prohibit the placement of plants (for example in the lake) and the second prohibit the placement of route (e.g. the road should not be built through the mountain area or over the sea area). The location of each plant can be expressed using x-y coordinates. With this obstacle the problem becomes much more difficult. The first difficulty is that we have to check the location of the plants against all obstacles to ensure that they are not located in the prohibited area. Afterward is the development of network of feasible route to connect the customers to the plants. Finally, the shortest path between customers to each plant should be calculated.

In this research work, we concern with the development of GA approach for solving location allocation problem with obstacle. As the chromosome generated by crossover and mutation operations have the possibility to be infeasible, this problem is difficult to solve optimally. Our major works for this problem include the design of chromosome and method for checking the feasibility, evaluation of the chromosome.

The rest of this paper is given as follows: We clearly give the mathematical formulation of this problem in Section 2. The GA approach for solving this problem is clearly discussed in Section 3. Section 4 should an illustrative example of our proposed method. Finally conclusion follows in Section 5

II. Mathematical model

In this section, we shall present a comprehensive mathematical model of the problem. Before further description of this model, we assume that each obstacle considered in the problem is represented as a convex polygon. The illustration of this problem is given in the following figure 1.

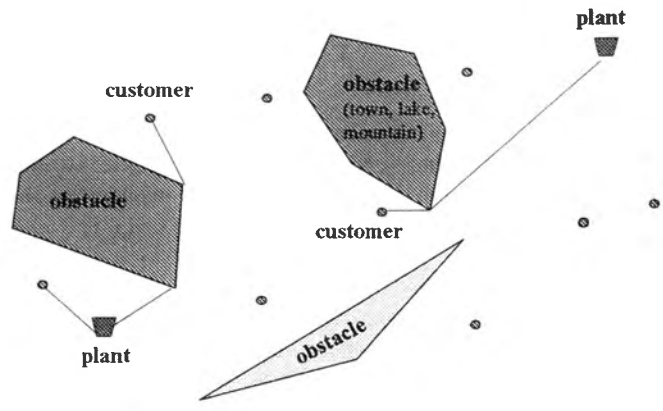


Figure 1 illustration of the problem

parameters

n number of customers

m number of plant to be built

m number of plant to be built

b_j demand of the j-th customer j=1,2,...,n

a_i service capacity of i-th plant i=1,2,...,m

(u_j,v_j) location of j-th customer

decision variables

(x_i,y_i) location of i-th plant

$$z_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{representing } j\text{-customer is served by } i\text{-plant} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\min \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} d_{ij} z_{ij} \qquad (1)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^{m} z_{ij} = 1 \qquad \forall j \in J \qquad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{m} b_j z_{ij} \le a_i \qquad \forall i \in I \qquad (3)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in I \wedge j \in J \qquad (4)$$

Constraints (2) reflect that each customer should be served by only one plant. Constraints (3) reflect that service capacity of each plant should not be exceeded. Instead of the above constraint, there are two wore constraints which are difficult to be written mathematically. First is that location of plants are not inside the obstacle. The second constraint is that d_{ij} is the shortest distance between plant i and customer j which does not cross any obstacle.

III. Design of the algorithm

3.1. Chromosome representation

The chromosome representation is very important for the success of GA [3, 4]. Since this problem is a continuous problem, we use the coordinate location of plant to represent each chromosome of the problem as follows:

$$c_t = [(x_1^t, y_1^t), (x_2^t, y_2^t), \cdots, (x_i^t, y_i^t), \cdots, (x_m^t, y_m^t)]$$

where (x_i^t, y_i^t) represents the location of i-th distribution center in t-th chromosome, i=1,2,...,m. Of course, we check the feasibility of this chromosome for the obstacle constraint.

3.2. Evaluation of the Chromosome

To determine the fitness value of the chromosome, we use the objective function value which is total distance of the customers to the plant.

I

3.3. Genetic Operation

Crossover: Suppose that two parents are selected for crossover operation, where genes in the chromosomes of children are decided by following equations:

$$x_i' = R \cdot x_i^1 + (I - R) \cdot x_i^2$$

$$y_i' = R \cdot y_i^1 + (I - R) \cdot y_i^2$$

Where $R = diag\,(r_1, r_1, r_2, r_2, ..., r_m, r_m)_{2m\times 2m}$, r_i is a random numbers in (0, 1) (i=1,2,...,m). I is the $2m\times 2m$ unit matrix.

Mutation: Two kinds of mutation operations are used here. First is subtle mutation which only gives a small random disturbance to a chromosome to form a new child chromosome. Another is violent mutation which give a new child chromosome totally randomly the same as the initialization.

Selection: The chromosomes are selected in the next generation based on their fitness value. We adopt the elitist selection strategy to determine the chromosome for the next generation.

IV. Numerical Experiment

To confirm the effectiveness of the proposed method, implemented it in visual Basic language and run on PC Pentium 700. We develop one randomly generated test problem. The environment parameters of GA are: *pop_size* =20, p_C=0.5, p_M=0.5, *max_gen*=1000. The comparative results are given Table 1.

Table 1.Comparision of GA and HEM and Heuristic Method

Method	Total length Sum	Plant locations	Customer allocations
HEM	97.435	1.(8.9509,36.9761) 2.(3.1611, 6.3528) 3.(23.9536,17.3541)	10,11,12,13 1,2,3,4,5,14 6,7,8,9
Heuristic	107.0858	1.(9.5,37.5) 2.(1.0,4.59) 3.(19.8333,16.6667)	10,11,12,13 1,2,3,14 4,5,6,7,8,9
GA	97.422	1.(9.2,36.9) 2.(3.1,6.5) 3.(24.1,16.7)	10,11,12,13 1,2,3,4,5,14 6,7,8,9

V. Conclusion

In this paper, we consider a location allocation problem with obstacles. Since this problem is very difficult to be solved optimally, we proposed a new genetic algorithm to find the best heuristic solution to the problem. We have done several numerical experiments by to show the effectiveness of the proposed GA approach.

References

[1] Admi, S., Wang, X and Gen M. Solving Uncapacitated Facility Location Problem by Using Hybridized Parallel Genetic Algorithm, Proc. Of 2nd International Workshop on Intelligent Techniques for Industrial Engineering, Beijing, 2002

[2] Gong, D., Gen, M., Xu, W. and Yamazaki, G. Hybrid Evolutionary Method for Obstacle Location Allocation Problem, International Journal of Computer and Industrial Engineering, Vol. 29, No. 1-4, 1995.

[3] Gen, M. and Cheng, R., *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Sons, New York, 1997

[4] Gen, M. and Cheng, R., *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*, John Wiley & Sons, New York, 2000.

Solving Bicriteria Two Stage Transportation Problem with Fuzzy Coefficient by Using Spanning Tree-based Genetic Algorithm

Jyunichi Taniguchi*, Admi Syarif, Mitsuo Gen* and Mitsuo Yamashiro****

*Graduate School of Information, Production and Systems Engineering, Waseda University, Kitakyushu, 808-0135, Japan
E-mail: gen@waseda.jp

**Department of Industrial & Information Systems Engineering, Ashikaga Institute of Technology, Ashikaga 326-8558, Japan

Abstract: This paper considers a bicriteria two-stage transportation problem (tsTP) with fuzzy cost values. To solve the problem, we propose a new technique called spanning tree-based genetic algorithm (stGA). Numerical experiment results are presented to show the effectiveness of this method.

keywords: Two stage transportation problem, Prufer number, Genetic Algorithm, Fuzzy numbers

I. Introduction

Design optimal for the transportation problem is one of the most important fields of application of Operations Research and Mathematical Optimization. It includes how and where facilities are located, grouped and how product should be handled and stored. For some specific applications, however, it is often that TP model is extended to have decision in several stages. Heragu first introduced the problem called two-stage transportation problem (tsTP) and gave the mathematical formulation of this problem [2, 3]. To solve this problem, he combined the two decision variables and transformed the model into an equivalent problem which is similar to solid transportation problem (sTP) (see [4] for sTP model and discussion).

In more real-world cases, however, often representation of more than one goal or objective in the model of economic decisions is desired. The examples of objectives include: average delivery time of the commodities, reliability of transportation, accessibility to the users, product deterioration, and so on. In a multiple objective context, the concept of optimal solution gives place to one of non-dominated solutions. These decision problems entail analyzing tradeoffs among the objectives in order to get a satisfactory compromise solution from the set of non-dominated solutions. Moreover, due to the complexity of social and economic factors, it is also difficult to determine the proper value of transportation costs. One way of handling such uncertainty in decision making is by introducing fuzzy programming approach.

In this paper, we consider a bi-criteria tsTP with fuzzy coefficient (bftsTP). To solve the problem, we develop a novel approach called spanning tree-based GA. Our intent is to solve the problem directly without transforming it into sTP. Our major efforts in this work include the development of new chromosome representation, method for handing the objective functions and fuzziness. Numerical experiment results are presented to demonstrate the efficiency of the proposed method.

II. Mathematical model

In this section, we shall present a comprehensive mathematical model of the problem. Consider the problem that has m origins (or source center), n plants and K customers. Let a_i be the amount of homogeneous product at i-th origin, b_j be the capacity of the j-th distribution centers and e_k be the demand of the k-th customer. x_{ij} and y_{jk} denotes the number of product transported in each stage respectively. The cost functions for q-th objective function in each stage are triangular fuzzy numbers denoted c^q_{ij} and t^q_{ij} respectively. The mathematical model of bicriteria tsTP with fuzzy coefficient can mathematically stated as follows:

$$\min \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\tilde{c}^q_{ij}x_{ij} + \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{K}\tilde{t}^q_{jk}y_{jk} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = a_i,\ i = 1,2,\cdots,m \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} = b_j,\ j = 1,2,\cdots,n \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{n} y_{jk} = e_k,\ k = 1,2,\cdots,K \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} = \sum_{k=1}^{K} y_{jk},\ j = = 1,2,\cdots,n \quad (5)$$

$$x_{ij} \geq 0, \forall i, j \quad (6)$$

$$y_{jk} \geq 0, \forall j, k \quad (7)$$

III. Design of the algorithm

3.1. Rangking Fuzzy numbers

As stated earlier, in this paper, we consider tsTP in which the cost values are represented as fuzzy number (triangular fuzzy number). When considering the optimization problem that its coefficients are represented with fuzzy numbers, the objective values of the problem will also be fuzzy numbers. Since a fuzzy number represents many possible, it is difficult to determine the set of Pareto optimal solution. To deal with this problem, we adopt the rangking fuzzy numbers with integral value technique [5]. For clear information of this technique, the readers can refer to [6]

3.2. Evaluation of the chromosome

Although there are several strategies to deal with the two objectives, one of the simplest is to combine these two objectives into a single scalar objective function as follows

$$f(x) = w_1 \cdot f_1(x) + w_2 \cdot f_2(x)$$

where w_1 and w_2 are constants representing weights for $f_1(x)$ and $f_2(x)$, respectively. There have been many methods for determining the weight values [6]. In the implementation of our GA approach, we assess the merit of each chromosome in this multi-criteria context by using the weight-sum method as follows:

Procedure: Evaluation

1. Calculate fuzzy objective values for each choromosome
2. Convert fuzzy objective values into integral values by using rangking method.
3. Determine the maximal and minimal integral value for each objective values.
4. Solve the following equation to get weight for the fitness function: $\delta_q = I_q^{\max(t)} - I_q^{\min}, \quad q = 1, 2$

$$\beta_q = \frac{\delta_q}{\sum_{q=1}^{2} \delta_q}, \qquad q = 1, 2$$

5. Calculate the fitness function value for each chromosome as follows:

$$eval(X_k) = \sum_{q=1}^{2} \beta_q (I_q^{\alpha}(\tilde{z}_q X_k)), \quad k = 1, \cdots, pop_size$$

3.3. Chromosome representation

It is well known that the success of GA depends on several factors including an efficient design of the chromosome, genetic operator and so on. In this research work, we adopt a spanning tree-based representation by using Prüfer number [7]. In our previous work, we have presented the application of this representation for an extended transportation problem [8]. For this tsTP, two Prüfer numbers are used to represent each stage of the problem respectively.

3.4. Genetic Operation

Crossover: We employed the one-point crossover operator as it can generate the feasible offspring when the parents are feasible. This type of crossover is accomplished by selecting two parents of solutions and randomly taking a component from one parent to form the corresponding component of the offspring.

Mutation: To increase the variability of the population, mutation operation is done. We used here inversion mutation that can guarantee to generate feasible chromosome when the parents are feasible.

Selection: In our implementation of genetic algorithm, we use the concept of Pareto optimal solution as it is usually characterized as solution of the multi-objective programming problem. To find more Pareto optimal solutions, we use the registered Pareto optimal solution strategy and attempt to get the set of Pareto optimal solution approximately (near-optimal solutions), and the elitist selection method is used in each generation. Using this selection process, we can keep the best chromosome from the current generation to the next generation.

IV. Numerical Experiment

To confirm the effectiveness of the proposed method, implemented it in visual Basic language and run on PC Pentium 700. We develop one randomly generated test problem. The problem has 4 plants, 3 DCs and 5 customers. =5. The GA parameters are set as $pC = 0.4$ and $pM = 0.2$. The experiment was run with $pop_size = 20$ and $max_gen = 1000$. The following figure shows the comparative results for three degree of optimistic, moderate and pessimistic.

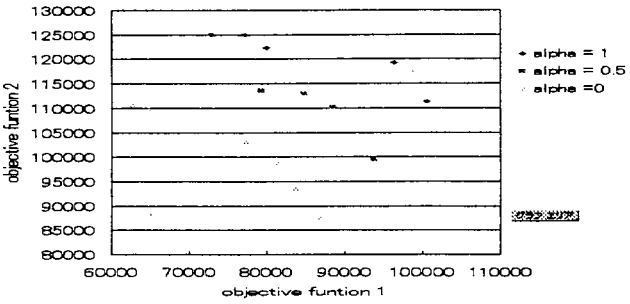


Figure 1 comparative of computational results

V. Conclusion

In this paper, we developed a mathematical model of bicriteria two-stage transportation problem with fuzzy coefficient. We proposed a new genetic algorithm to find the best heuristic solution to the problem. We reported the numerical experiments by to show the effectiveness of the proposed GA approach.

References

[1] Hitchcock, F. L., The Distribution of a Product from Several Sources to Numerous Localities, *J. Math. Phys*, Vol. 20, pp. 24-230, 1941.

[2] Das, C. and Heragu, S., A Transportation Approach to Locating Plants in Relation to Potential Markets and Raw Material Sources, *Decision Sciences*, Vol. 19, No. 4, pp. 819-829, 1988.

[3] Heragu, S., *Facilities Design*, PSW Company, 1997

[4] Li, Y. Z., Gen, M. and Ida, K., Improved Genetic Algorithm for solving multi-objective solid transportation problem with fuzzy number, *Japanese Journal of Fuzzy Theory and Systems*, Vol. 4, No. 3, pp. 220-229, 1998.

[5] Liou, T.S. and Wang, M. J. Rangking Fuzzy Numbers with Integral value, Fuzzy Set and System, Vol. 50, 1992

[6] Gen, M. and Cheng, R., *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Sons, New York, 1997

[7] Dossey, J., Otto, A., Spence, L. and Eynden, C., *Discrete Mathematics*, Harper Collins, 1993.

[8] Syarif, A. and M. Gen, Solving Exclusionary Side Constrained Transportation Problem by Using A Hybrid Spanning Tree-based Genetic Algorithm, *Journal of Intelligent Manufacturing*, to appear.

条件付ファジィ真理値と条件付確率の関係

Relationship between conditional fuzzy truth-value and conditional probability

長堀由樹 Yuuki NAGAHORI
江本　全志 Masashi EMOTO
向殿政男 Masao MUKAIDONO

明治大学
Meiji University

Abstract

Both probability theory and fuzzy theory are recognized as a theory treating "ambiguity." But the fuzzy theory and probability theory are different concepts although they are alike each other. In this research, we consider the relationship between conditional fuzzy truth-value and conditional probability. Specifically, we consider whether conditional fuzzy truth-value becomes the same value to conditional probability, if what operation is used in the definitions and defuzzification.

1 はじめに

確率論とファジィ理論は、共に「あいまいさ」を扱う理論として認知されている。

確率論においては、結果が出てしまえば明確になるが、出る前なのであいまいであるというあいまいさを取扱っている。すなわちランダムネスと呼ばれるあいまいさである。例えば、1000 件の顧客データから任意の 1 件を抜き出す、という試行を行い、抜き出されたデータが「顧客の年齢が 35 歳である確率」を考えたとき、試行前はあいまいであるが、施行後は結果が明確である、というあいまいさである。

一方、ファジィ理論におけるあいまいさというのは、確率論で述べられたあいまいさとは異なり、結果の真偽が明確でないあいまいさである。すなわちファジィネスと呼ばれるあいまいさである。前述の顧客データの例を用いて説明すると、抜き出された顧客データの年齢が 35 歳であるとき、「その人が中年であるかどうか？」というあいまいである。ファジィ理論は、確率論とは違ったあいまいさを取扱っているといえる。よって、ファジイ真理値と確率は似て非なる概念として認知されてきた。

本研究では、ファジィ理論の一概念である「条件付ファジィ真理値」と確率論の一概念である「条件付確率」との関係を考える。具体的には、条件付ファジィ真理値を条件付確率の値に近づけることを考えたとき、どのような演算、方法をもってそれが可能であるかを考察する。

2 条件付ファジィ真理値

条件付ファジィ真理値とは、「”命題 A が成立する”という条件のもとで命題 B が成立することの正しさ」と定義する。

この真理値は図 1 のような逆真理値限定問題によって求めることができる。

つまりこの真理値は、図 1 (a)のように命題 A,B をそれぞれファジィ集合とおいて逆真理値限定問題を解き、図 1 (b)のように導出されたファジィ真理値 τ を条件付ファジィ真理値と呼ぶ事にしている。

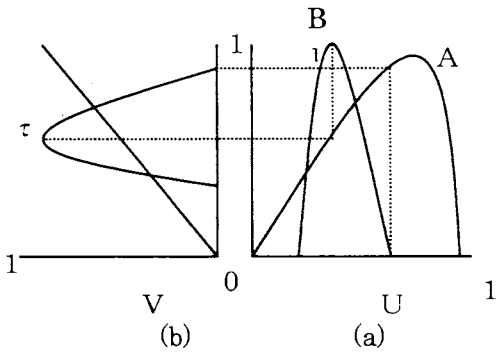


図 1 ：逆真理値限定によって求められた条件付ファジィ真理値

条件付ファジィ真理値を式として表すと逆真理値限定の定義によって

$$\mathrm{Tr}(A \rightarrow B) = \sum_{x \in U} \bigvee_{\mu_A(x)=s} \mu_B(x)/s \quad (1)$$

と、ファジィ集合の形で求められることとなる。

3 条件付確率

2 つの事象 A,B において「A が発生するという条件のもとで B が発生する確率」を条件付確率と呼び、以下のように定義される。

$$\Pr(\mathrm{A} \rightarrow \mathrm{B}) = \frac{\Pr(\mathrm{A} \cap \mathrm{B})}{\Pr(\mathrm{A})} \quad (2)$$

この式を、ファジィ集合演算のために拡張して、

$$\Pr(\mathrm{A} \rightarrow \mathrm{B}) = \frac{\sum_{x \in U} (\mu_A(x) \cdot \mu_B(x))}{\sum_{x \in U} \mu_A(x)} \quad (3)$$

と定義する。なお、この式の右辺の分子における“・”は代数的な積算ではなく min 演算であるとする。

4 条件ファジィ真理値における脱ファジィ化

ファジィ真理値は、[0,1]上のファジィ集合である。よって、条件付ファジィ真理値にも脱ファジィ化は適用可能である。
2 節で定義した条件付ファジィ真理値と条件付確率とを比較する為に一つの数値で代表させるために脱ファジィ化を利用する。

$$T = \{\mu_T(0)/0, \mu_T(a_1)/a_1, \ldots, \mu_T(a_n)/a_n, \ldots, \mu_T(1)/1\} = \{\mu_T(a_n)/a_n \mid a_i \in [0,1]\}$$
(ただし、$a_i \in [0,1]$) (4)

というファジィ真理値があるとする。
脱ファジィ化の主な方法として重心法が挙げられる。本研究では脱ファジィ化の計算式として、下式のように定義する。

$$C(T) = \frac{\sum_{a_i \in [0,1]} (a_i \cdot \mu_T(a_i))}{\sum_{a \in [0,1]} \mu_T(a_i)} \quad (5)$$

(5)の右辺の分子において”・“は min 演算によって計算されるものとする。通常、重心法の計算式は代数的な積算によって計算されるが、あえてここでは min 演算で定義する。

5 条件付ファジィ真理値と条件付確率の関係

5.1 関係式の導出

以上の定義を用いて、両者の関係を求めてみる。

A,B をファジィ集合とすると、以下のような関係が成り立つ。

(関係 I)
全ての$x, y \in U$において$\mu_A(x) \neq \mu_A(y)$という条件のもとで

$$\Pr(A \rightarrow B) = C(Tr(B \rightarrow A)) \quad (6)$$

(関係 II)
ある$x, y \in U$について$\mu_A(x) = \mu_A(y)$という条件のもとで

$$\Pr(A \rightarrow B) \geqq C(Tr(B \rightarrow A)) \quad (7)$$

＜関係 I の証明＞
式(3),(5)により、条件付ファジィ真理値と条件付確率を定式化すると

$$\Pr(A \rightarrow B) = \frac{\sum_{x \in U} (\mu_A(x) \cdot \mu_B(x))}{\sum_{x \in \mathrm{U}} \mu_{\mathrm{A}}(\mathrm{x})} \quad (8)$$

$$C(Tr(B \rightarrow A)) = \frac{\sum_{a \in U} (a \cdot \mu_{Tr(B \rightarrow A)}(a))}{\sum_{a \in U} \mu_{Tr(B \rightarrow A)}(a)} \quad (9)$$

となる。ここで、(9)に着目する。
この条件付ファジィ真理値 Tr(B→A)は、逆真理値限定問題の解である。よってこの条件のとき、

$$\mu_{T(B \rightarrow A)}(\mu_B(x)) = \mu_A(x) \quad (10)$$

が成り立つ。
また、条件部（例えば$Tr(B \rightarrow A)$では B を指す）で重複する$\mu_B(x)$が存在しない事を考えると(1)より

$$Tr(B \rightarrow A) = \sum_{x \in U} \bigvee_{\mu_B(x)=s} \mu_A(x)/s = \sum_{x \in U} \mu_A(x)/\mu_B(x) \quad (11)$$

とできる。
この式から$a = \mu_B(x)$, $\mu_{T(B \rightarrow A)}(a) = \mu_{Tr(B \rightarrow A)}(\mu_B(x)) = \mu_A(x)$と置換可能であるから、式(9)は

$$\frac{\sum_{a\in U}(a\cdot\mu_{Tr(B\to A)}(a))}{\sum_{a\in U}\mu_{Tr(B\to A)}(a)}=\frac{\sum_{x\in U}(\mu_A(x)\cdot\mu_{Tr(B\to A)}(\mu_A(x)))}{\sum_{x\in U}\mu_{Tr(B\to A)}(\mu_A(x))}$$

$$=\frac{\sum_{x\in U}(\mu_B(x)\cdot\mu_A(x))}{\sum_{x\in U}\mu_A(x)}=\Pr(A\to B) \qquad (12)$$

となる。これによって、(6)の恒等性が示された。

＜関係IIの証明＞

関係Iと同じ関係式が導けることができる。
しかし、Tr(B→A)に関して、条件部においてある$x,y\in U$において$\mu_A(x)=\mu_A(y)$、すなわち重複する数値が出てきた場合には、逆真理値限定問題と拡張原理の定義によって、$\mu_A(a)$の最大値以外の数値は無視されることになる。だから、(9)を考えた時に無視された数値の分は入力されないので、値がより小さくなる。よって、(8)の値より小さくなる。
以上より

$$\Pr(A\to B)\geqq C(Tr(B\to A))$$

である。

なお、この式で等号が成立するのは

$\forall x=U,\mu_A(x)=\mu_B(x)$ (つまりA=B)

となる場合のみである。
この等号が成立する場合を今後「例外」と呼ぶ事にする。

(証明終)

5.2 実際の例

実際のファジィ集合を用いて以上の関係I,IIを検証する。

	a	b	c	d	e	f	g
A_1	1	0.8	0.64	0.48	0.32	0.16	0
A_2	0	0.16	0.32	0.48	064	0.8	1
A_3	0	0.4	0.8	1	0.8	0.4	0

（ただし、a~g∈Uである）

以上の3つのファジィ集合を用いて条件付ファジィ真理値を導出し、検証を行う。

A_1,A_2,A_3はそれぞれタイプの異なるファジィ集合であり、A_1は単調減少型、A_2は単調増加型、A_3は

ある$x,y\in U$について$\mu_A(x)=\mu_A(y)$

という条件式を満たす凸型のファジィ集合である。

＜関係Iの検証＞

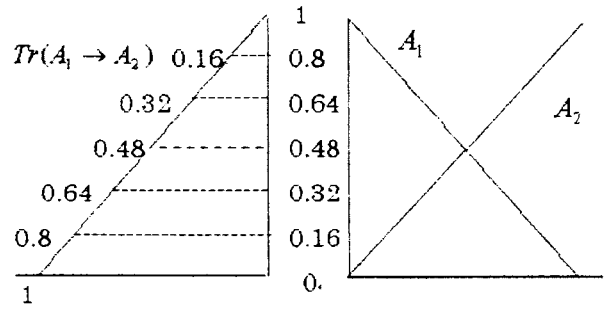


図2：$Tr(A_1\to A_2)$

図2のように求められた$Tr(A_1\to A_2)$に対し、$C(Tr(A_1\to A_2))$を求める。

(5)より

$$C(Tr(A_1\to A_2))$$
$$=\frac{1\cdot 0+0.8\cdot 0.16+0.64\cdot 0.32+0.48+0.32\cdot 0.64+0.8\cdot 0.16}{1+0.8+0.64+048+0.32+0.16}$$
$$=\frac{1.44}{3.4}\fallingdotseq 0.4235$$

一方、$\Pr(A_2\to A_1)$は(8)より次のように求められる。

$$\Pr(A_2\to A_1)$$
$$=\frac{0.16+0.32+0.48+0.32+0.16}{1+0.8+0.64+048+0.32+0.16}=\frac{1.44}{3.4}\fallingdotseq 0.4235$$

よって、$C(Tr(A_1\to A_2))=\Pr(A_2\to A_1)$となり、関係Iが成り立つ。

＜関係IIの検証＞

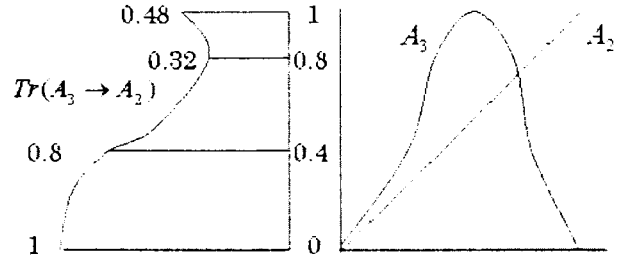


図3：$Tr(A_3\to A_2)$

図3のように求められた$Tr(A_3\to A_2)$に対し、

$C(Tr(A_3 \to A_2))$を求める。

(5)より

$$C(Tr(A_3 \to A_2)) = \frac{1\cdot 0 + 0.8\cdot 0.4 + 0.8\cdot 0.32 + 0.48\cdot 1}{1+0.8+0.32+048} = \frac{1.2}{2.6} \fallingdotseq 0.4615$$

一方、$\Pr(A_2 \to A_3)$は(j)より次のように求められる。

$$\Pr(A_2 \to A_3) = \frac{0.16+0.32+0.48+0.64+0.4}{0.16+0.32+048+0.64+0.8+1} = \frac{2.0}{3.4} \fallingdotseq 0.5882$$

よって、$C(Tr(A_3 \to A_2)) < \Pr(A_2 \to A_3)$となり、関係IIが成り立つ。

＜関係IIにおける例外の検証＞
同じファジィ集合同士をサンプルにしてみる。

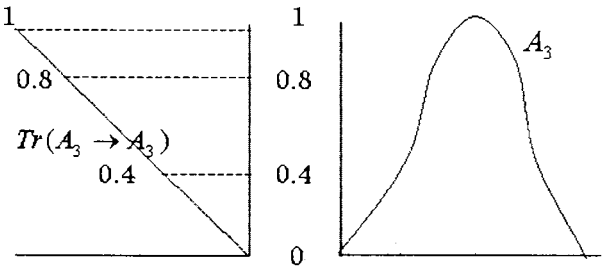


図4：$Tr(A_3 \to A_3)$

図4のように求められた$Tr(A_3 \to A_3)$に対し、$C(Tr(A_3 \to A_3))$を求める。

(5)より

$$C(Tr(A_3 \to A_3)) = \frac{0\cdot 0 + 0.4\cdot 0.4 + 0.8\cdot 0.8 + 1\cdot 1}{1+0.8+04} = \frac{2.2}{2.2} = 1$$

一方、$\Pr(A_3 \to A_3)$は(8)より次のように求められる。

$$\Pr(A_3 \to A_3) = \frac{0.4+0.8+1+0.8+0.4}{0.4+0.8+1+0.8+0.4} = \frac{3.4}{3.4} = 1$$

よって、条件部A_3に重複する数値があるにもかかわらず$C(Tr(A_3 \to A_2)) = \Pr(A_2 \to A_3)$となるので、関係IIの例外が成立する。

6 まとめ

本研究では、条件付ファジィ真理値と条件付確率の関係について考察した。

脱ファジィ化を用いて条件付ファジィ真理値を単一の数値とした。また脱ファジィ化の演算や条件付確率の計算方法を代数的乗算ではなくmin演算で統一することで、両者の一致を図った。

その結果、両者の関係は「条件部において重複するメンバーシップ関数の数値が存在しないという前提で"条件付ファジィ真理値を脱ファジィ化すると、条件部を逆に持つ条件付確率と等しくなる"」というものであることが分かった。言い換えると、条件付ファジィ真理値は、条件付確率を詳しく記述したもの」という関係になる。

謝辞
本研究に対してご協力いただいた前田暁峰氏（元明治大学理工学部，現在(株)システムフロンティアに所属）に感謝いたします。

参考文献

[1] 向殿政男："講座ファジィ④ファジィ論理"，日刊工業新聞社

連絡先
〒214-8571
明治大学理工学部情報科学科
神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1
長堀　由樹
電話：044-931-1411
FAX：044-931-1411
Email：nagaho@cs.meiji.ac.jp

論理・代数・限界・激烈演算系における tノルム・sノルム 演算回路の性能比較と評価

Performance comparison and evaluation of t- and s-norm operation circuits under logical, algebraic, bounded, and drastic operation systems

吉田 真一　　廣田 薫
Shin-ichi Yoshida　　Kaoru Hirota

東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

Abstract: In order to compare various t-norms and s-norms on FPGA hardwares, t-norm and s-norm logic circuits are synthesized and simulated under four—logical(max-min), algebraic, bounded, drastic—fuzzy operation systems. The result shows that the performance of t-norm and s-norm circuits have difference from a viewpoint of speed and cost under all operation systems except max-min logical operation system. These results gives a guide to establish the fuzzy hardware design method.

1 はじめに

高速・高効率のファジィ情報処理のために、ファジィフリップフロップや汎用ファジィプロセッサなどのファジィハードウェアが提案され [1][2]、個々のプロセッサに関する演算系や量子化ビット数の違いによる性能比較も行われている [3][4]。これらの結果から、tノルム、sノルムのファジィ演算系の選択によって、プロセッサの経済性・速度などの性能が大きく左右されることが示されている。

本研究では、FPGA や CPLD のような書き換え可能ディジタルデバイスをターゲットに、主要なファジィ論理演算とその性能を回路シミュレーション・回路合成を通して定量的に明らかにする。特に本稿では、論理・代数・限界・激烈の4演算系について性能を比較する。この結果、論理演算（Max-Min）の場合は、tノルム・sノルムとも同等のハードウェアで実現できるが、代数演算系の場合はtノルムの方がsノルムよりも小さく実現でき、逆に限界演算系ではsノルムの方が経済的になる。また、限界演算系では、奇数ビット数の時にtノルムの回路面積が大きくなることを明らかにする。

2 同一演算系における tノルム、sノルム間での比較

2.1 Max-Min 演算系

最も、標準的に広く用いられている、Max-Min 演算系での比較を行う。Max 演算回路と Min 演算回路は、本質的に同一の比較器であり、比較結果によって、最終的にどちらの入力を選ぶか（セレクタの動作）が異

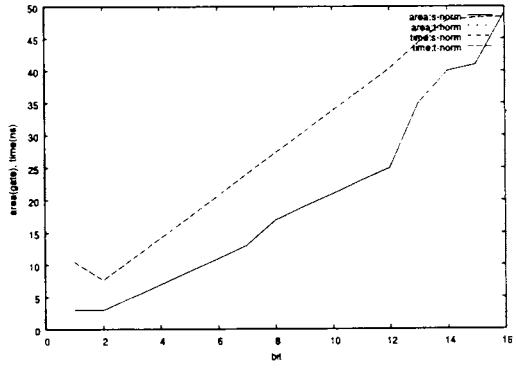


図 1: 回路面積・遅延時間（ー:論理和, ⋯:論理積）

なるだけで、回路面積、遅延時間において、どの量子化ビット数においても、両者の性能は同一となる。

2.2 代数積代数和演算系

Max-Min に次いで広く用いられる代数積代数和演算系は、アルゴリズムとしては解析のし易さ、特性が滑らかであることなどから、制御分野をはじめとしてよく研究されているが、乗算を行うために、ハードウェア実装や計算時間の観点からは、複雑な処理である。代数積が単なる乗算なのに対し、代数和はさらに加算・減算を行うため、代数和処理の方が回路面積、遅延時間とも大きくなる。乗算器が入るため、回路面積は、量子化ビット数に対して、二乗のオーダで増加する。そのため、量子化ビット数が増えると、急速に実現が難しくなる。

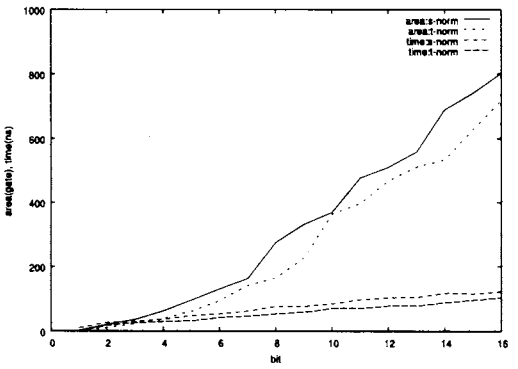


図 2: 回路面積・遅延時間（—:代数和, ···:代数積）

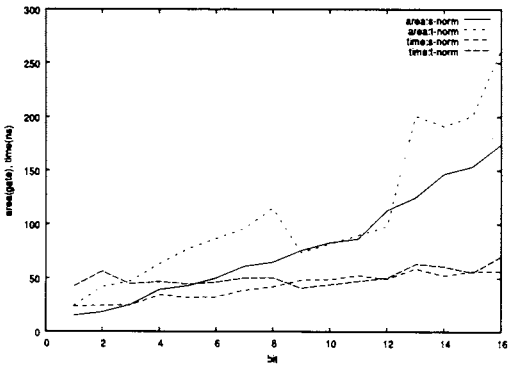


図 3: 回路面積・遅延時間（—:限界和, ···:限界積）

2.3 限界積限界和演算系

限界積限界和演算系は、ファジィにおける応用例こそ多くないものの、多値論理の世界では、古くからよく知られた代数系をなす上、Zadeh の含意などでも用いられることもあり、重要な演算系の一つである。部分的に、リニアの特性を持つことは、Max-Min 演算系と同じである。この演算系は、加算、減算した後、限界処理として、定数（0、1）との比較を行う必要があり、回路面積、遅延時間とも Max-Min よりも大きくなる。

2.4 激烈積激烈和演算系

激烈積激烈和演算系は、Max、Min と対極に位置する演算系で、理論的な興味はあるが、あいまいさの取り扱いという観点から、もっともあいまいでない演算系であるので、応用面では扱いにくい演算系である。あいまいさ（ファジィ値）を極力計算しない演算系であるので、回路化は用意である。基本的には、定数（0、1）と等しいかどうかの判定をするだけなので、ビットごとに並列化できるので、量子化ビット数に依存せず、速度は一定である。回路面積は、リニアに増えるが、効率的に配置しやすいので、Max-Min 並みかそれ以下である。

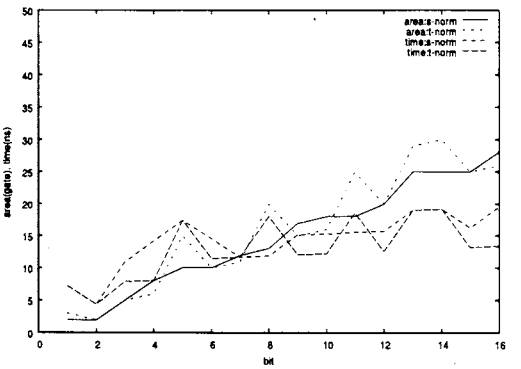


図 4: 回路面積・遅延時間（—:激烈和, ···:激烈積）

3 おわりに

本稿では、t ノルム、s ノルムを、Max-Min、代数、限界、激烈の各演算系で実現した場合の回路性能を明らかにした。[0,1] ファジィ値の量子化ビット数による、回路面積、遅延時間の増加を示し、ゆるやかなリニアオーダで増加していく、Max-Min・激烈演算系に対して、代数・限界演算系は、ビット数の増加に対して、回路の実現が急速に難しくなっていくことを示した。t ファジィフリップフロップを例として、実際のファジィシステムを構築する際の指針を示し、二値のシステム設計とは異なる点を示した。

本稿で示された結果は、今後、より複雑なファジィシステムを行う際の、設計指針の基礎を与えるものと期待される。また、これをベースとして、ファジィシステム（ハードウェア）自動設計などへの応用も期待される。

参考文献

[1] K.Hirota, K.Ozawa: "Fuzzy Flip-Flop and Fuzzy Registers",Fuzzy Sets and Systems (North-Holland) , Vol.32 No.2, pp.139-148 (1989)

[2] Y.D.Kim, H.LeeKwang: "High Speed Flexible Fuzzy Hardware for Fuzzy Information Processing", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A:Systems and Humans, Vol.27 No.1, pp.45-56 (1997)

[3] 吉田, 廣田:"D, T, SR ファジィフリップフロップの提案と FPGA を用いた回路設計", 日本ファジィ学会誌, Vol.12 No.1, pp.160-168 (2000)

[4] S.Yoshida, Y.Takama, K.Hirota:"Fuzzy Flip-Flops and their Applications to Fuzzy Memory Element and Circuit Design using FPGA", Journal of Advanced Computational Intelligence, Vol.4 No.5 (2000)

[連絡先]
〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259
東京工業大学 大学院総合理工学研究科
知能システム科学専攻 廣田研究室 吉田真一
s.yoshida@hrt.dis.titech.ac.jp

ファジィノードファジィグラフとT－ノルム

Fuzzy Node Fuzzy Graph and T-Norms

上江洲　弘明	山下　元	須田　宏	金川　秀也
Hiroaki UESU	Hajime YAMASHITA	Hiroshi SUDA	Shuya KANAKAWA
早稲田大学	早稲田大学	慶応義塾大学	武蔵工業大学
Waseda University	Waseda University	Keio University	Musashi Institute of Technology

***Abstract** : T-Norm is important set operation concerning the fuzzy theory. In various aspects of affairs, T-Norm has been applied. In this paper, we discuss the connective structure of T-Norm families and explain about a fuzzy node fuzzy graph and its application.*

1. はじめに

ファジィノードファジィグラフはノードのファジィネスだけでなく，アークもファジィネスをもつグラフである．ファジィノードファジィグラフをT－ノルムを用いて解析するとき，各T－ノルムの持つ特徴をつかむことが必要である．T-ノルムはファジィ理論において重要なファジィ集合演算である．個々に独立したT-ノルムだけではなく，パラメータを介して表されるT-ノルム（T-ノルム族）は特に興味深い．本稿ではT-ノルムとファジィノードファジィグラフへの応用について述べる．

2. T－ノルム

T－ノルムは集合の積演算を抽象化した二項演算であり，以下のように定義される．

定義１　T－ノルム（Triangular Norm）は

$$p,q\in[0,1]\rightarrow T(p,q)\in[0,1]$$

となる二項演算で，次の条件をみたす．

(1) 可換性：$T(p,q)=T(q,p)$

(2) 結合律：$T(p,T(q,r))=T(T(p,q),r)$

(3) 単調性：$p\leqq q,r\leqq s\Rightarrow T(p,r)\leqq T(q,s)$

(4) 境界条件：$T(p,0)=0,T(p,1)=p$

代表的なT－ノルムには次のものがある．

(1) 代数積：$T_A(p,q)=p\times q$

(2) 論理積：$T_L(p,q)=p\wedge q$

(3) 多値的論理積（ルカシュビッツ）：

$$T_M(p,q)=(p+q-1)\vee 0$$

(4) 激烈積：$T_D(p,q)=\begin{cases}0 & ,p\vee q<1\\ p\wedge q & ,p\vee q=1\end{cases}$

上記のT－ノルムはいずれも個別のT－ノルムであるが，これら以外に，パラメータを用いて表されるT－ノルムの族がある．これらの族をT－ノルム族という．

定義２　任意の$\lambda\in[a,b]$に対して，T_λがT－ノルムであるとき，$\{T_\lambda\}$をT_a, T_bをつなぐT－ノルム族であるという．

T－ノルム族には以下のものがある．

(1) Dombi

$$T_\lambda(p,q)=\frac{1}{1+\sqrt[\lambda]{((1-p)/p)^\lambda+((1-q)/q)^\lambda}},\lambda>0$$

(2) Weber

$$T_\lambda(p,q)=\max(0,(1+\lambda)(p+q-1)-\lambda pq),\lambda\geqq -1$$

(3) Yager

$$T_\lambda(p,q)=1-\min(1,\sqrt[\lambda]{(1-p)^\lambda+(1-q)^\lambda},\lambda>0$$

(4) Hamacher

$$T_\lambda(p,q)=\frac{pq}{\lambda+(1-\lambda)(p+q-pq)},\lambda\in[0,1]$$

(5) Schweizer (i)

$$T_\lambda(p,q)=\sqrt[\lambda]{\max(0,p^\lambda+q^\lambda-1)},\lambda>0$$

(6) Schweizer (ii)

$$T_\lambda(p,q)=\frac{1}{\sqrt[\lambda]{1/p^\lambda+1/q^\lambda-1}},\lambda>0$$

(7) Schweizer (iii)

$$T_\lambda(p,q)=1-\sqrt[\lambda]{(1-p)^\lambda+(1-q)^\lambda-(1-p)^\lambda(1-q)^\lambda},\lambda>0$$

(8) Dubois

$$T_\lambda(p,q)=\frac{pq}{\max(p,q,\lambda)},\lambda\in[0,1]$$

(9) Frank

$$T_\lambda(p,q)=\log_\lambda\left[1+\frac{(\lambda^p-1)(\lambda^q-1)}{\lambda-1}\right],\lambda>0,\lambda\neq1$$

(10) 準論理積

$$T_\lambda(p,q)=\begin{cases}0 & ,p\vee q<1-\lambda\\ p\wedge q & ,p\vee q\geqq1-\lambda\end{cases},\lambda\in[0,1]$$

T－ノルム族の連続，単調を以下のように定義する．

定義３　T－ノルム族$\{T_\lambda\}$が連続であるとは，$\varepsilon>0$，$\lambda\in[0,1]$，$(p,q)\in[0,1]^2$を任意に与えたとき，ある正数δが存在して，

$$\forall\mu\in[0,1]:|\lambda-\mu|<\delta\Rightarrow|T_\lambda(p,q)-T_\mu(p,q)|<\varepsilon$$

が成立することをいう．

定義４　T－ノルム族$\{T_\lambda\}$が単調であるとは，$T_\lambda(p,q)$がλについて単調であることをいう．

$\lambda\in[a,b]$上のT－ノルム族の長さ$\|T_\lambda\|_a^b$を以下の式で定義する．

定義５　T－ノルム族$\{T_\lambda\}$，$a\leqq\lambda\leqq b$において，$a=\lambda_0<\lambda_1<\cdots<\lambda_{n-1}<\lambda_n=b$であるとする．

$$s(p,q)=\sup\sum_{i=1}^{n}\{(\lambda_i-\lambda_{i-1})^2+(T_{\lambda_i}(p,q)-T_{\lambda_{i-1}}(p,q))^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\|T_\lambda\|_a^b=\sup_{p,q}\frac{s(p,q)}{\{(b-a)^2+(T_b(p,q)-T_a(p,q))^2\}^{\frac{1}{2}}}$$

任意のT－ノルム族$\{T_\lambda\}$，$a\leqq\lambda\leqq b$に対して，$\|T_\lambda\|_a^b\geqq1$が成立する．

T－ノルム族と$\|T_\lambda\|_a^b$の値はそれぞれ表１のようになっている．

表１　T-ノルム族と$\|T_\lambda\|_b^a$の値

T-ノルム族	$\|T_\lambda\|_b^a$	区間
①準論理積	1.41	[0, 1]
②Dubois	1.05	[0, 1]
③Weber	1.02	[-1, 0]
④Yager	1.99	(0, 1]
Hamacher	1.00	[0, 1]

また，T-ノルム族がつなぐ個々のT-ノルムは図１のようなグラフで表せる．

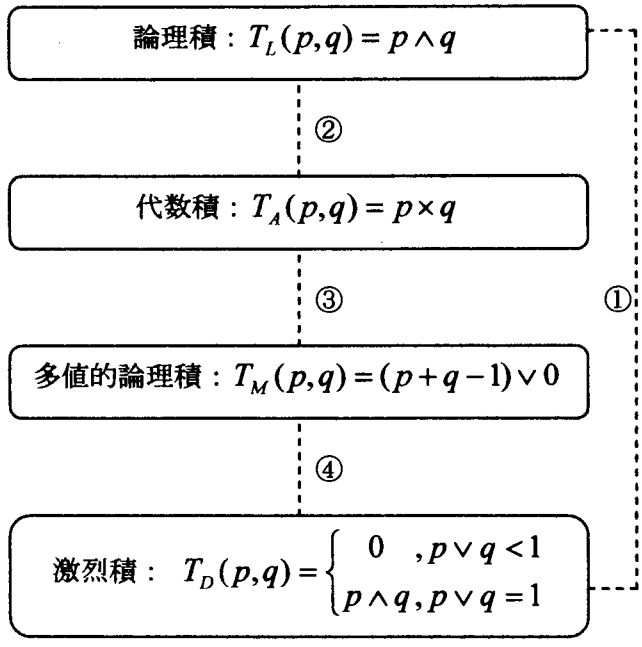


図１　T-ノルム族と個々のT-ノルムの関係

3. ソシオメトリー分析への応用

ソシオメトリー分析への応用として，高校生16人を対象に図２のアンケートを行なった．

次のそれぞれの場合に，同じグループになりたい人を順に書きなさい．

Q_1：グループ学習をするとき

Q_2：昼食を食べるとき

Q_3：スポーツをするとき

	1	2	3	…
Q_1				
Q_2				
Q_3				

図２　アンケート用紙

このアンケートの結果から，図3の応答行列ができる．

		1	2	3	4	5	合計
S1	Q1	4	2	3			8
	Q2	4	9				
	Q3	4	9	2			
S2	Q1	3	5	6	11		10
	Q2	5	6	9	11		
	Q3	5	4				
S3	Q1	8	7	9			11
	Q2	2	8	9	10		
	Q3	2	7	8	9		
S4	Q1	1	2	5	6		12
	Q2	1	2	5	6		
	Q3	1	2	5	6		
S5	Q1	4	2	11	6		9
	Q2	7	11	9			
	Q3	2	6				
S6	Q1	7	9	3			12
	Q2	3	4	9	11		
	Q3	4	5	2	11	7	
S7	Q1	8	3	9	10		7
	Q2	9					
	Q3	3	8				
S8	Q1	10	3	7			8
	Q2	10	3				
	Q3	10	3	9			
S9	Q1	3	10				6
	Q2	10					
	Q3	10	3	6			
S10	Q1	8	9				8
	Q2	9	8	7	3		
	Q3	8	9				
S11	Q1	3	2	5	7	6	14
	Q2	3	7	9	8		
	Q3	5	6	2	3	7	

図3　応答行列

この応答行列から図4のファジィ選好行列が計算できる．このファジィ選好行列がファジィグラフとなる．また，行列の右の数字はメンバーのファジィネスであり，メンバーのファジィネスはゲーム理論のシャプレイ値を応用して求めることができる．

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	1	0.33	0.11	1.00					0.44			0.52
2		1	0.33	0.22	0.89	0.33			0.11			0.85
3		0.67	1				0.44	0.67	0.22			1.00
4	1.00	0.67		1	0.33							0.87
5		0.56		0.33	1		0.33		0.11		0.33	0.73
6		0.11	0.44	0.56	0.22	1	0.33		0.33			0.17
7			0.56				1	0.56	0.44			0.35
8			0.67				0.11	1	0.11	1.00		0.93
9			0.56			0.11			1	0.89		0.68
10							0.11	0.89	0.78	1		0.92
11		0.33	0.67		0.44	0.22	0.22		0.11		1	0.20

図4　ファジィ選好行列

次にこれらから，ファジィノードファジィグラフを作る．ファジィノードファジィグラフは複雑なので，前述した方法でクリスプノードファジィグラフに変換する．その際，Tーノルム族にはDuboisのTーノルム族を用い，$\lambda=0.7$とした．

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.52	0.25	0.08	0.52					0.33		
2		0.85	0.33	0.22	0.85	0.33			0.11		
3		0.67	1.00				0.44	0.67	0.22		
4	0.87	0.67		0.87	0.33						
5		0.56		0.33	0.73		0.33		0.11		0.33
6		0.03	0.11	0.14	0.06	0.17	0.08		0.08		
7			0.28				0.35	0.28	0.22		
8			0.67				0.11	0.93	0.11	0.93	
9			0.54			0.11			0.68	0.68	
10							0.11	0.89	0.78	0.92	
11		0.09	0.19		0.13	0.06	0.06		0.03		0.20

図5　クリスプノードファジィグラフ
(Dubois, $\lambda=0.7$)

さらにクリスプノードファジィグラフから図6の近似ファジィグラフが得られる．

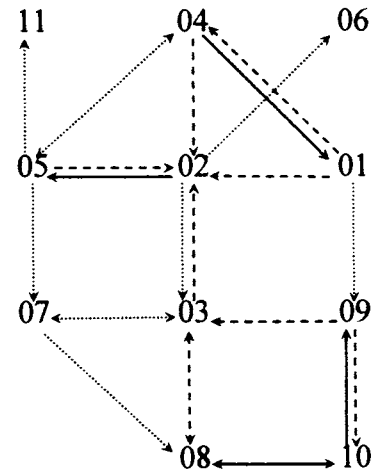


図6　近似ファジィグラフ

また，ファジィ選好行列から図7のファジィ友好行列が得られ，ファジィ友好行列から図8の分割樹形図Tが得られる．

近似ファジィグラフと分割樹形図Tから図9の近似ソシオグラムU^z（$z=0.67$, $\lambda=0.70$）が得られる．

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1			1.00							
2		1	0.44	0.33	0.68	0.17					
3		0.44	1				0.49	0.67	0.32		
4	1.00	0.33		1	0.33						
5		0.68		0.33	1						0.38
6		0.17				1			0.17		
7			0.49				1	0.19			
8			0.67				0.19	1		0.94	
9			0.32			0.17			1	0.83	
10								0.94	0.83	1	
11					0.38						1

図7　ファジィ友好行列

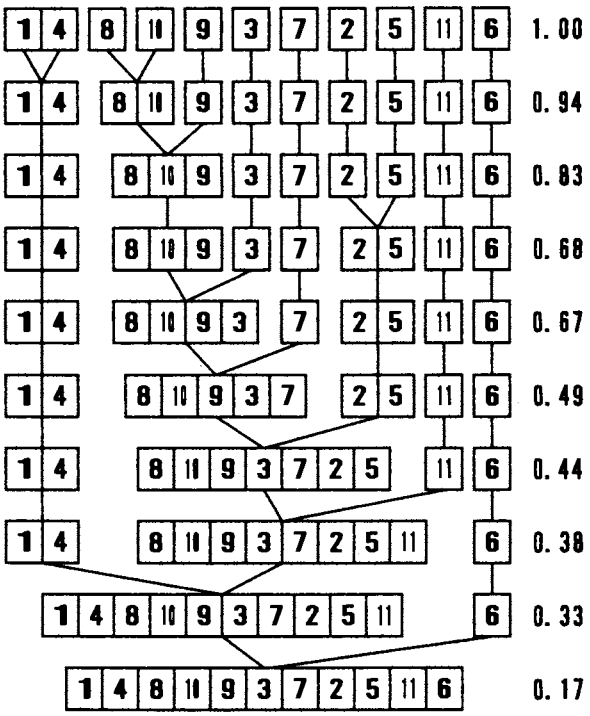


図8　分割樹形図

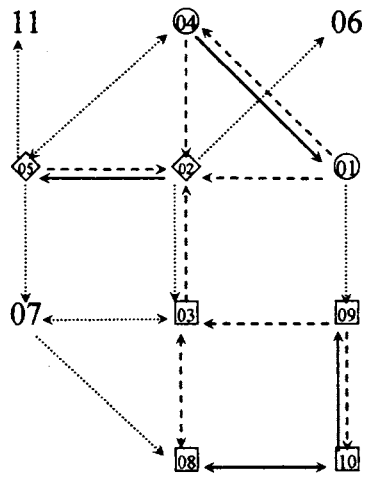


図9　近似ソシオグラム U_z

このソシオメトリー分析は，心理学観点，教育学観点から社会一般の集団構造等にも適用することができる．

今日，いじめや登校拒否などが深刻な教育問題となっているが，本分析法がその解決の一助となることを期待したい．

参考文献

[1] 西田，竹田：ファジィ集合とその応用，森北出版，1978.

[2] 山下，稲井田：ファジィ理論と応用，学文社，1997.

[3] Witold Pedrycz, Fernand Gomide : An Introduction to Fuzzy Sets, The MIT Press, 1998.

[4] 上江洲，山下，稲井田：T－ノルムを応用したファジィノードファジィグラフの解析 I～II，日本数学会大会応用数学分科会，1999～2000.

[5] 上江洲，山下：Sociometry Analysis Applying Fuzzy Node Fuzzy Graph, Proceeding of Int'l Congress of Fuzzy Systems Association IX, FR1-64, pp.369-374, 2001.

[6] 上江洲：ファジィノードファジィグラフを応用したソシオメトリー分析，日本ファジィ学会誌，Vol.14 N0.3，2002.

[7] 上江洲：Connectivity Analysis of T-Norms and its Application, 22Q1-2, SCIS&ISIS, 2002.

[8] 上江洲：T-ノルム族の解析と応用，日本数学会大会応用数学分科会，pp.28-29，2003.

[問い合わせ先]

上江洲　弘明（うえす　ひろあき）

〒115-0043

東京都　北区　神谷　1-3-1-612

TEL　03-3911-8473

E-Mail : 700b5031@mn.waseda.ac.jp

ファジィ数理形態学による空間配置問題の解決

Fuzzy Mathematical Morphology-based Approaches to Spatial Proximity Design

大矢 智子 SHIGUEO 片井 修 川上 浩司 塩瀬 隆之
Tomoko Ohya NOMURA Osamu Katai Hiroshi Kawakami Takayuki Shiose

京都大学大学情報学研究科システム科学専攻
Department of Systems Science, Graduate School of Informatics, Kyoto University

Abstract: In this work, we propose another application for fuzzy mathematical morphology. We investigate a way for "spatial proximity design" based on fuzzy mathematical morphology and modal logic. Human spatial positioning, especially "distance perspective" , plays a significant role in human interaction. Fuzzy sets operations and morphological operations (Erosion/Dilation) can be expressed by modal logic on certain conditions. Logical deduction of object mode can be achieved by respecting their characteristics as membership functions using logical formulas. The idea for constructing fuzzy morphological operations on logical formulas enables us to forecast objects that is not possible when we use conventional ideas such as stochastic analysis or rigorous formulaic expression.

1 はじめに

数理形態学は集合論をもとに、主に画像分野において適用され、発展してきた。特にファジィ数理形態学はgray-scaleの画像を取り扱う手段として用いられている [1]。数理形態学の基本演算であるDilationとErosion（膨張と浸食）は画像空間において画素が形成する集合に施すと、その画素で構成される画像パターンの形状を変化させることができる。ここで、様相論理における可能世界の間に距離尺度を導入すれば、DilationとErosionは様相論理における作用子に対応させ得ることが知られている [2]。

本稿では、ファジィ集合に数理形態学を適用したうえで、ファジィ集合に施した演算を様相論理の演算子に対応させる方法 [3] を導入し、論理的解釈を与え、具体例を挙げてその性質について検討する。これは、ファジィ集合の構造を様相論的観点から分析するものである。この手法を発展させれば、あるオブジェクトに対し、その特性をメンバシップ関数で記述することによってファジィ集合として扱い、推論段階において論理演算オペレータを用いた式に表してロジカルな議論を行うことができる。この手法はデータや確率に依存した推論を行う必要がないという点で、事前に厳密な体系化ができない対象に応用することが期待できる。

本研究は、ヒト、ないしはロボットの社会性に関する研究の一環として、あるオブジェクトが他者とのインタラクションを目標状態とした場合、その空間内における身体配置において、各オブジェクトのもつ様相として、「距離感」の重要性に着目したものである。適切な距離獲得のためのアルゴリズムを空間距離デザインの一端と考え、第3節において目標達成のための距離獲得に、前述の手法を適用した具体例を挙げ、検討を加える。

2 数理形態学と様相論理

2.1 ファジィ数理形態学の基本演算

Serraによると、クリスプ集合 $A, B \subseteq \mathbb{R}^n$ について、A の B によるErosion $E(A,B)$ とDilation $D(A,B)$ は

$$D(A,B) = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n | T_{\mathbf{x}}(B) \cap A \neq \phi\}$$
$$E(A,B) = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n | T_{\mathbf{x}}(B) \subseteq A\}$$

と定義される [7]。ここで $T_{\mathbf{x}}(B)$ はベクトル $\mathbf{x}$ による B の平行移動である。具体例を図1に示す。

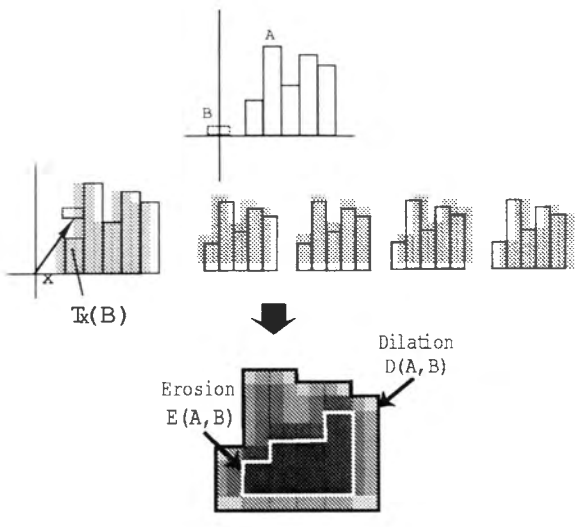


図 1: Erosion と Dilation

このクリスプ集合に対するErosionとDilationの定義をファジィ化する。様々なファジィ化手法が知られているが、本稿ではクリスプ集合における二値的な概念をファジィ集合に対して等価な概念に置き換えることによって定義したファジィErosionとDilation [3] [4]を採用する。

クリスプとファジィの概念間の対応は、表1にまとめられる。

表 1: 概念の対応関係

クリスプ	ファジィ
集合	ファジィ集合
特性関数	メンバシップ関数
$\mu(x) \in \{0,1\}$	$\mu(x) \in [0,1]$
補集合	ファジィ補集合演算 c
積集合	t-ノルム [5] t
和集合	t-コノルム [5] T
存在	上限
全称	下限

ここで、ファジィ補集合演算cは、標準的な定義、すなわち$c(\mu(x)) = 1 - \mu(x)$を採用する。また、t-ノルム、t-コノルムとは$[0,1] \times [0,1] \to [0,1]$なる写像を施す二項演算を行う積、和の連続関数であり、本稿ではLukasiewiczの定義

$$t(a,b) = \max(0, a+b-1)$$
$$T(a,b) = \min(1, a+b)$$

を採用する。これによって、$\forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$について、$\mu(\mathbf{x}), \nu(\mathbf{x}) \subseteq \mathbb{R}^n \times [0,1]$なるファジィ集合$\mu, \nu$を用いて、ファジィ集合$\mu$の$\nu$によるErosion $E(\mu,\nu)(\mathbf{x})$とDilation $D(\mu,\nu)(\mathbf{x})$は以下のように定義される [4]。

$$\forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \qquad D(\mu,\nu)(\mathbf{x}) = \sup_{\mathbf{y} \in \mathbb{R}^n} t[\mu(\mathbf{y}), \nu(\mathbf{y}-\mathbf{x})]$$
$$\forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \qquad E(\mu,\nu)(\mathbf{x}) = \inf_{\mathbf{y} \in \mathbb{R}^n} T[\mu(\mathbf{y}), c(\nu(\mathbf{y}-\mathbf{x}))]$$

2.2 様相論理

述語論理において議論される、命題に対する真偽は、結果としての状態を述べているに過ぎない。これに対して、真偽の様態までをも定式化をするために、いま現実に起こっている「現実世界（actual world）」以外に、「可能世界（possible world）」という概念が導入された [6]。一般に、全ての可能世界で命題rが成立することを$\Box r$と記述し、rが「必然的に」成立していることを表す。また、少なくともひとつの可能世界で命題rが成立することを$\Diamond r$と記述し、rが「可能的に」成立していることを表す。これら□、◇は命題rに対する作用子（オペレータ）と考えることができ、$\Box r$、$\Diamond r$はそれ自身ひとつの命題として真偽を議論することができる。様相論理は□や◇の間に成立する普遍的な関係を論ずるものである。

3 対話距離による空間配置問題

以下では、空間内に配置されるオブジェクトを人間とし、観測者（observer、以下ob）が、対象となる人物（opponent、以下op）に対して目標状態に合致する距離を獲得する過程に注目する。具体事例として、二者間に対話が発生することを目標状態とするobによる二者間距離の制御を考える。この問題設定で特徴的なことは、両者は互いの情報を正確には知りえず、推測が必要なことである。

3.1 推測の手順

まず、op、ob各自の、二者間距離についての“対話のしやすい”度合いを示すメンバシップ関数（以下対話距離とする）を考える。上述のようにobはopの情報を持っていないので、obが目標達成に至る行動をとるためにはopの観察から得られた情報に基づいてその状態を推測し、将来の状態を予測することが必要となる。

そこで、obはopの対話距離を推測し、次状態にとる“適切な”二者間の距離を判断する。次状態、すなわちobが適切と推定した距離まで移動したとき、実際の二者間の距離と推定値との差分によって推測に対する評価、学習を行い、推測したopの対話距離に修正を加える。このステップを目標状態（対話発生）に至るまで繰り返す。

3.2 オブジェクトの性質

observerオブジェクト（ob）は対話成立を目的とし一定の対話距離メンバシップ関数$\mu_{ob}(x)$をもつ。一方opponentオブジェクト（op）はobの行動により、obに対する警戒度Wを変化させ、Wにより対話距離メンバシップ関数$\mu_{op}(x)$も変化し、これによって現在位置から$\Delta \mathbf{x}_{op}$だけ変位する。obは目標状態達成のために二者間の距離xを調整（opに近づく、あるいは遠ざかる）する。ただし、$|\dot{x}|$が大きいとopが警戒度Wを高め、対話距離$\mu_{op}(x)$を大きく変えることは既知であるとする。

3.3 推測と学習の方法

初期状態において、ob は op の対話距離 $\mu_{op}(x)$ を推測 $\hat{\mu}_{op}$ として適当に与えられているものとする。これをもとに、$|\Delta\mathbf{x}_{op}|$ を半径とする集合 E による $\hat{\mu}_{op}(x)$ の Erosion $\epsilon(\hat{\mu}_{op}(x))$、Dilation $\delta(\hat{\mu}_{op}(x))$ を求める。

いま、二者間の距離 x の値の数だけ、"可能世界" が無限に存在するとして、様相論理の見地から、Erosion、Dilation を "必然"、"可能" オペレータに対応させることができる。つまり、

Dilation $\delta(\hat{\mu}_{op}(x))$ は
　現在 x である世界で、次状態に到達可能な世界のうち最も「対話しやすい度合い」の高い世界の対話距離（可能な最高の対話距離）

Erosion $\epsilon(\hat{\mu}_{op}(x))$ は
　現在 x である世界で、次状態に到達可能な世界の全てで保証される「対話しやすい度合い」をもつ世界での対話距離（必然的に保証される最低限の対話距離）

と解釈することができる。したがって、推測 $\hat{\mu}_{op}(x)$ により求めた「対話に適切である二者間距離の推定値 $\hat{x}$」と「次状態の二者間距離の実際の値 x^+」との差分（推定誤差 $|\hat{x}-x^+|$）の値が小さければ、推測 $\hat{\mu}_{op}(x)$ は正しい可能性が高い。つまりより多くの可能世界で真であると判断し、学習の修正コストを小さく与え、推測 $\hat{\mu}_{op}(x)$ を $\epsilon(\hat{\mu}_{op})$ に近づける。反対に $|\hat{x}-x^+|$ が大きい場合は正しい可能性が低い、すなわち真である可能世界が少ないと判断し、修正コストを大きく見積もり、推測 $\hat{\mu}_{op}(x)$ を $\delta(\hat{\mu}_{op})$ に近づける。

また、op の警戒度 W に対する ob による推定値 $\hat{W}$ を求める。$\hat{W}$ は速度 $\Delta\mathbf{x}_{op}/\Delta t$ についての関数 $\hat{W}(\Delta\mathbf{x}_{op}/\Delta t)$ とおき、図2に示すように、$(\Delta\mathbf{x}_{op}/\Delta t)_v$ を $\Delta\mathbf{x}_{op}/\Delta t$ の x 方向の成分、（つまり op が ob に向かう方向の速度ベクトル）、$(\Delta\mathbf{x}_{op}/\Delta t)_h$ を垂直な成分をとする。一般に相手 (op) の様子から自分に対する警戒度を判断する場合、相手 (op) が自分 (ob) に近づいてくることが観測されれば、相手 (op) は自分 (ob) を警戒していないと考えてよい。すなわち op の微小時間の変位ベクトル $\mathbf{x}_{op}/\Delta t$ が ob に向かい $\left((\mathbf{x}_{op}/\Delta t)_v \geq 0\right)$ 大きいほど警戒心が小さく、反対に ob から遠のくほど警戒心が大きいと考える。以上より、たとえば $\hat{W}$ は以下のように定める。

$$\hat{W}\left(\frac{\Delta\mathbf{x}_{op}}{\Delta t}\right) = \left(1+\exp\alpha\left(\frac{\Delta\mathbf{x}_{op}}{\Delta t}\right)_v\right)^{-1} - \exp\left(-\left(\frac{\Delta\mathbf{x}_{op}}{\Delta t}\right)_h^2\right)$$

$$\alpha = \frac{-6.908}{x}$$

ここで、関数 $\hat{W}(\Delta\mathbf{x}_{op}/\Delta t)$ において $(\Delta\mathbf{x}_{op}/\Delta t)_v$ に関する項にシグモイド関数を採用しており、パラメータ α は、$|(\Delta\mathbf{x}_{op}/\Delta t)_v| = x$ となるとき、警戒度 0 を近似的に 10^{-3} で計算する様に設定した。

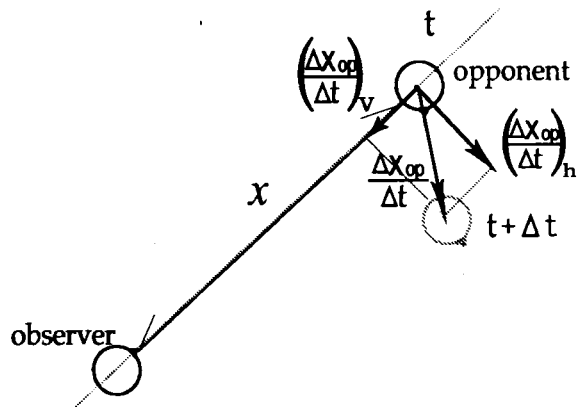


図 2: ob による op の観測

3.4 推定値の算出

距離の推定に対する評価関数 $F(\hat{\mu}_{op}(x),\mu_{ob}(x),\hat{W})$ を

$$F(\hat{\mu}_{op}(\hat{x}),\mu_{ob}(\hat{x}),\hat{W}) = \hat{W} - \sup\min(\hat{\mu}_{op}(x),\mu_{ob}(x))$$

とし、これを最小にする x を推定値 $\hat{x}$ とする。ここで右辺第一項から警戒度が小さく、第二項から「op、ob 両者がともにその距離で対話しやすい度合い」の高い、すなわち「一方は対話しやすいが他方は対話しにくい距離ではない度合い」の高い x ほど理想的であることになる。

3.5 observer アルゴリズム

ob の処理の流れを以下に示す。

1. 微小時間 Δt 間の op の変位 $\Delta\mathbf{x}_{op}$ を観測
2. $|\Delta\mathbf{x}_{op}|$ を半径とする集合 E によって $\hat{\mu}_{op}(x)$ の Erosion $\epsilon(\hat{\mu}_{op})$、Dilation $\delta(\hat{\mu}_{op})$ を求める
3. 警戒度の予測値 $\hat{W}(\Delta\mathbf{x}_{op}/\Delta t)$ を求める
4. 評価値 $F(\hat{\mu}_{op}(x),\mu_{ob}(x),\hat{W}(\Delta\mathbf{x}_{op}/\Delta t))$ を最大にする $\hat{x}$ を求める

5. $\hat{x}$ となる位置まで移動 (次状態)
6. 実際の距離 x を観測、推定誤差 $|\hat{x} - x^{+}|$ を求める
7. $\hat{\mu}_{op}(x)$ の修正 (学習)

これをブロック線図に示すと図 3 のようになる。

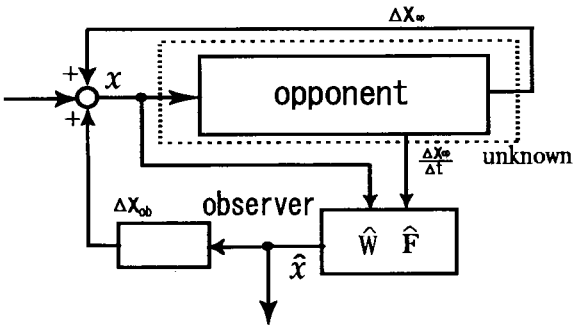


図 3: ブロック線図

4 考察

様相論理において命題の成立についての議論は、作用子を含む論理式を用いて行われ、作用子を複数使用した論理演算によってさらに複雑な推論が可能である。

前節ではファジィ数理形態学の演算子と様相論理の作用子との関連性によって、物理空間上のオブジェクト間の関係を推定する一手法を述べた。ここでは、より複雑な形式で記述される状況についてロジカルに議論する方法について検討する。

まず、ある行動者が魚を対象として、「魚が捕らえられない距離にいる」かどうかを推定したい場合を考える。このとき、

命題 r:
ある距離 x にいる魚が捕らえ易い
ファジィメンバシップ関数 $Uo(x)$:
距離 x だけ離れている魚を捕らえられる度合い

として様相論理と数理形態学のオペレーションとの対応関係を解釈する。まず、「魚が捕らえられない距離にいる」を「その距離にいる魚を捕らえることが可能ではない」と言い換えると、これは様相論理式では $\neg\Diamond r$ と表され、これを数理形態学の演算に置き換えると $c(\delta(Uo(x)))$ と表される。ここで $Uo(x)$ を Dilation する集合の一例として、「魚を捕らえる」オブジェクトの身体能力、つまり微小時間における行為可能範囲を採用する。$c(\delta(Uo(x)))$ で得たファジィ集合は「微小時間後に魚を捕らえることが可能ではない」度合いを表すことになり、この集合のメンバシップ関数を用いて推定を行うことは目的にかなっていると考えてよい。

5 おわりに

本稿では、ファジィ数理形態学の応用に様相論理との対応関係を用いて、オブジェクトの状態を論理的に解釈し、将来の状態を推定する方法を検討した。本研究の目的である空間配置問題の解決の一環として、未知の対象との目標距離獲得アルゴリズムを提案し、さらに様相的観点からの推論法の具体例を示した。

今後、空間配置問題を取り扱っていくうえで、ヒトの距離に対する心理的感覚について取り扱った「近接学 (proxemics)」に着目する。ここではファジィラベルである述語に対して、これらの関係性 (パーソナルスペース) が実験的に検証されており、数理形態学と様相論理の関係性に解釈を与えるとき、こういった表現の有効性が期待される。

また、さらに複雑な様相性を持つ物理モデルについて、ファジィ数理形態学的アプローチからプロダクションルール等を用いた推論に展開したい。

参考文献

[1] I. Bloch; Fuzzy Sets in Image Processing, In *ACM Symposium on Applied Computing, Invited Comference*, Invited Conference, pages 175-179, Phoenix, Arizona, March 1994

[2] 計測自動制御学会; ニューロファジィ・AI ハンドブック

[3] I. Bloch and H. Maitre; Fuzzy Mathematical Morphologies: A Comparative Study, Pattern Recognition, 28(9): 1341-1387, 1995

[4] I. Bloch; Geodesic balls in a fuzzy set and fuzzy geodesic mathematical morphology,Pattern Recognition, 33(6): 897-905,2000

[5] D. Dubois and H. Prade; Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications, Academic Press, New York, 1980

[6] 岩井　壮介、片井　修 他; 知識システム工学、計測自動制御学会、1991

[7] J. Serra; Image Analysis and Mathematical Morphology, Academic Press, London, 1982

[連絡先]
〒 606-8501
京都府京都市左京区吉田本町
京都大学大学院 情報学研究科
システム科学専攻
共生システム論研究室 (片井研究室)
Tel; 075-753-3592
大矢　智子
ohya@sys.i.kyoto-u.ac.jp

On the Relationship between Differential Inclusions and Ordinary Differential Equations Concerning the Stability Analysis of Fuzzy Differential Equations

Seiji SAITO and **Hiroaki ISHII**

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

連絡先: 565-0871 吹田市山田丘 2 － 1 大阪大学大学院情報科学研究科情報数理学専攻

齋藤誠慈 TEL:06-6879-7869 FAX:06-6879-7295 E-mial: saito@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Normal, strictly and upper semi-continuous fuzzy numbers with bounded supports are identified with bounded continuous curves in the two-dimensional metric space by a parametric representation of fuzzy numbers. First, we introduce fuzzified oil well equation and we discuss the unstability of solutions of the fuzzy differential equation(FDE) by the method of parametric representation of fuzzy numbers. Second, we give the differential and integral of fuzzy functions. Third, the idea of differential inclusions in analyzing solutions of fuzzy differential equations is dealt with and the analysis of fuzzy differential inclusions plays an important role in discussing similar asymptotic behaviours to ordinary differential equations. Finally, we give concluding remarks concerning stability analysis between differential inclusions and the parametric method to fuzzy differential equations.

1 Parametric Representation of Fuzzy Numbers

Let $I = [0,1]$. We define the following set of fuzzy numbers, where a fuzzy number x is characterized by a membership function μ_x as follows (cf. [5]):

Definition 1 *Denote*

$\mathcal{F}_{\mathbf{b}}^{st} = \{\mu_x : \mathbf{R} \to I$ *satisfying* (i) − (iv) *below*$\}$.

(i) *There exists a unique* $m \in \mathbf{R}$ *such that* $\mu_x(m) = 1$;

(ii) *The support set* $supp(\mu_x) = cl(\{\xi \in \mathbf{R} : \mu(\xi) > 0\})$ *is bounded in* $\mathbf{R}$;

(iii) μ_x *is strictly quasi-convex on the compact support* $supp(\mu_x)$, *i.e.*,

$$\mu_x(\lambda\xi_1 + (1-\lambda)\xi_2) > \min[\mu_x(\xi_1), \mu_x(\xi_2)]$$

for $0 < \lambda < 1$ *and* $\xi_1, \xi_2 \in J$ *such that* $\xi_1 \neq \xi_2$;

(iv) μ_x *is upper semi-continuous on* $\mathbf{R}$.

In usual case a fuzzy number x satisfies quasi-convex on $\mathbf{R}$, *i.e.*,

$$\mu_x(\lambda\xi_1 + (1-\lambda)\xi_2) \geq \min[\mu_x(\xi_1), \mu_x(\xi_2)]$$

for $0 \leq \lambda \leq 1$ and $\xi_1, \xi_2 \in \mathbf{R}$. Condition (iii) plays an important role in proving properties of membership function μ_x in Theorem 1, where we show significant properties concerning the end-points of the α-cut set $L_\alpha(\mu_x) = \{\xi \in \mathbf{R} : \mu_x(\xi) \geq \alpha\}$.

In the similar way as [5, ?] we consider the following parametric representation of $\mu_x \in \mathcal{F}_{\mathbf{b}}^{st}$ such that

$$x_1(\alpha) = \min L_\alpha(\mu_x), \quad x_2(\alpha) = \max L_\alpha(\mu_x)$$

for $0 < \alpha \leq 1$ and that $x_1(0) = \min cl(supp(\mu_x))$, $x_2(0) = \max cl(supp(\mu_x))$. In what follows we denote a fuzzy numbers x by (x_1, x_2), *i.e.*, $x = (x_1, x_2)$.

By applying the above extension principle and the representation of fuzzy numbers we get the following results.

1) Addition. Let $x = (x_1, x_2)$, $y = (y_1, y_2) \in \mathcal{F}_{\mathrm{b}}^{st}$. We get the addition

$$\begin{aligned}\mu_{x+y}(\xi) &= \sup_{\xi=\xi_1+\xi_2} \min[\mu_x(\xi_1), \mu_y(\xi_2)] \\ &= \sup\{\alpha \in I : \xi = \xi_1 + \xi_2, \quad \xi_1 \in x_\alpha, \xi_2 \in y_\alpha\} \\ &= \sup\{\alpha \in I : x_1(\alpha) + y_1(\alpha) \le \xi \le x_2(\alpha) + y_2(\alpha)\},\end{aligned}$$

which means that $x + y = (x_1 + y_1, x_2 + y_2)$. Here $x_\alpha = L_\alpha(\mu_x)$ etc.

2) Subtraction. It follows that

$$\mu_{x-y}(\xi) = \sup\{\alpha \in I : \xi = \xi_1 - \xi_2, \quad \xi_1 \in x_\alpha, \xi_2 \in y_\alpha\}$$

means that $x - y = (x_1 - y_2, x_2 - y_1)$.

3) Product. It follows that

$$\mu_{xy}(\xi) = \sup\{\alpha \in I : \xi = \xi_1\xi_2, \quad \xi_1 \in x_\alpha, \xi_2 \in y_\alpha\}$$

means that the following relation.

$$xy = \begin{cases} (x_1y_1, x_2y_2) & (0 \le x_1, 0 \le y_1) \\ (x_2y_1, x_2y_2) & (0 \le x_1, y_1 \le 0 \le y_2) \\ (x_2y_1, x_1y_2) & (0 \le x_1, y_2 \le 0) \\ (x_1y_2, x_2y_2) & (x_1 \le 0 \le x_2, 0 \le y_1) \\ (\min\{x_2y_1, x_1y_2\}, \max\{x_1y_1, x_2y_2\}) & \\ \quad (x_1 \le 0 \le x_2, y_1 \le 0 \le y_2) & \\ (x_2y_1, x_1y_1) & (x_1 \le 0 \le x_2, y_2 \le 0) \\ (x_1y_2, x_2y_1) & (x_2 \le 0, 0 \le y_1) \\ (x_1y_2, x_1y_1) & (x_2 \le 0, y_1 \le 0 \le y_2) \\ (x_2y_2, x_1y_1) & (x_2 \le 0, y_2 \le 0) \end{cases}$$

By the above parametric representation of fuzzy numbers we get the following theorem concerning properties of end-points.

Theorem 1 *Denote $x = (x_1, x_2) \in \mathcal{F}_{\mathrm{b}}^{st}$, where $x_1, x_2 : I \to \mathbf{R}$. Then the following properties* (i)-(iii) *hold:*

(i) $x_i \in C(I), i = 1, 2$. *Here $C(I)$ is the set of all the continuous functions on I;*

(ii) *There exists a unique $m \in \mathbf{R}$ such that $x_1(1) = x_2(1) = m$ and $x_1(\alpha) \le m \le x_2(\alpha)$ for $\alpha \in I$;*

(iii) *One of the following statements* (a) *and* (b) *holds;*

(a) *Functions x_1, x_2 are non-decreasing, non-increasing on I, respectively, with $x_1(\alpha) < x_2(\alpha)$ for $0 \le \alpha < 1$;*

(b) $x_1(\alpha) = x_2(\alpha) = m$ *for* $0 < \alpha \le 1$.

Conversely, under the above conditions (i) -(iii), *if we denote*

$$\mu_x(\xi) = \sup\{\alpha \in I : x_1(\alpha) \le \xi \le x_2(\alpha)\} \qquad (1.1)$$

then μ_x is the membership function of x, i.e., $\mu_x \in \mathcal{F}_{\mathrm{b}}^{st}$.

Let a metric between $x = (x_1(\cdot), x_2(\cdot)), y = (y_1(\cdot), x_2(\cdot))$ be defined as follows.

$$d(x, y) = \sup_{\alpha \in I}(|x_1(\alpha) - y_1(\alpha)| + |x_2(\alpha) - y_2(\alpha)|)$$

Then we get following result immediately (see [4, 9]).

Theorem 2 *$(\mathcal{F}_{\mathrm{b}}^{st}, d)$ is complete metric space.*

2 Calculus of Fuzzy Functions

Consider a function $x : \mathbf{R} \to \mathcal{F}_{\mathrm{b}}^{st}$. Then $x(t)$ is said to be a fuzzy function. In [7] we find the following definition of fuzzy functions.

$$\begin{aligned}x(t, \cdot) &= \{(x_1(t, \alpha), x_2(t, \alpha))^T \in \mathbf{R}^2 : \alpha \in I\} \\ &= (x_1(t, \cdot), x_2(t, \cdot))\end{aligned}$$

for $t \in [t_1, t_2]$. Denote $x(t) = (x_1(t), x_2(t))$.

A fuzzy function $x(t) = (x_1(t), x_2(t)) : \mathbf{R} \to \mathcal{F}_{\mathrm{b}}^{st}$ is H-differentiable at t in the sense of Hukuhara if there exists an $\eta \in \mathcal{F}_{\mathrm{b}}^{st}$ such that (i) and (ii) hold as $h \to +0$.

(i) $x(t + h) = x(t) + h\eta + o(h)$; (ii) $x(t) = x(t - h) + h\eta + o(h)$.

Here $o(h) = (o_1(h), o_2(h)) \in C[0, \varepsilon] \times C[0, \varepsilon]$ with $\varepsilon > 0$, which means that

$$\lim_{|h| \to 0} \frac{d(o(h), 0)}{|h|} = 0.$$

Then $x(t) = (x_1(t), x_2(t))$ is H-differentiable at t if and only if $x_1(t,\alpha), x_2(t,\alpha)$ are differentiable in t for each $\alpha \in I$ such that $\eta = (\frac{\partial x_1}{\partial t}, \frac{\partial x_2}{\partial t}) \in \mathcal{F}_{\mathrm{b}}^{st}$.

In [7] the author discuss the integration of fuzzy function $x(t)$.

Definition 2 *A fuzzy function* $x(t,\cdot) = (x_1(t,\cdot), x_2(t,\cdot))$ *is called integrable over* $[t_1, t_2]$ *if* $x_1(t,\alpha)$ *and* $x_2(t,\alpha)$ *are integrable over* $[t_1, t_2]$ *for* $\alpha \in I$. *Define*

$$\int_{t_1}^{t_2} x(s,\cdot)ds = \{(\int_{t_1}^{t_2} x_1(s,\alpha)ds, \int_{t_1}^{t_2} x_2(s,\alpha)ds)^T \in \mathbf{R}^2 : \alpha \in I\}.$$

3 Fuzzy Differential Equations

In [10] they discuss exponential decay problems, *e.g.*, machine replacement and oil well extraction, etc. They analyze optimization problems for each oil well to determine its optimal replacement schedule. Denote the quality remaining in the well at time t by $x(t)$ and denote the rate of oil extraction by $D > 0$. Then they get the following rate of oil extraction $x'(t) = -Dx$ with $x(0) = \nu$. Then $x(t) = \nu e^{-Dt}$.

In what follows we consider the rate of oil extraction D as a constant fuzzy number $D = (D_1, D_2) \in \mathcal{F}_{\mathrm{b}}^{st}$, where $D_1(\alpha)$ is the left end-point of the α−cut set and $D_1(\alpha) > 0$ for $\alpha \in I$. Then we assume that the oil quality $x(t) = (x_1(t), x_2(t)) \in \mathcal{F}_{\mathrm{b}}^{st}$ is a fuzzy function which means the quality remaining in the well at time t and $\nu \in \mathcal{F}_{\mathrm{b}}^{st}$. Consider an initial value problem of fuzzy differential equation

$$\frac{dx}{dt}(t) = -(Dx), \quad x(0) = \nu. \tag{3.2}$$

The above problem has a unique solution

$$x(t) = \nu + \int_0^t (-(Dx(s)))ds.$$

See [8].

It follows that as long as $x_1(t) \geq 0$, by the extension of principle

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(x_1(t), x_2(t)) &= -(D_1, D_2)(x_1, x_2) \\ &= -(D_1 x_1, D_2 x_2) \\ &= (-D_2 x_2, -D_1 x_1). \end{aligned}$$

Then we have two ordinary differential equations such as

$$x_1'(t) = -D_2 x_2, \; x_2'(t) = -D_1 x_1$$

with $x(0) = (\nu_1, \nu_2) \in \mathcal{F}_{\mathrm{b}}^{st}$. Therefore

$$x_1(t) = \frac{(\nu_1 + \nu_2\sqrt{\frac{D_2}{D_1}})e^{-\sqrt{D_1 D_2}t}}{2} + \frac{(\nu_1 - \nu_2\sqrt{\frac{D_2}{D_1}})e^{\sqrt{D_1 D_2}t}}{2},$$

$$x_2(t) = \frac{(\nu_1\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} + \nu_2)e^{-\sqrt{D_1 D_2}t}}{2} - \frac{(\nu_1\sqrt{\frac{D_1}{D_2}} - \nu_2)e^{\sqrt{D_1 D_2}t}}{2}$$

for $t \geq 0$. Then we get the unstable result of solution $x = (x_1, x_2)$ such that

$$\lim_{t \to +\infty} d(x(t), 0) = +\infty,$$

where $0 \in \mathbf{R}$, as well as it follows that

$$\lim_{t \to +\infty} \sup_{\alpha \in I} |\sqrt{D_1(\alpha)}x_1(t,\alpha) + \sqrt{D_2(\alpha)}x_2(t,\alpha)| = 0.$$

(see [9]).

4 Fuzzy Differential Inclusions

In this section we introduce the idea of fuzzy differential inclusions in [2, 3, 6, 8]

Example. Consider an initial value problem of fuzzy differential equation (3.2). According to the idea of fuzzy differential inclusions in which a family of differential inclusions plays an important role in finding some kind of fuzzy sets of (3.2) (See [1]). Let $F(\xi, \alpha) = [-D_2(\alpha)\xi, -D_1(\alpha)\xi] \subset \mathbf{R}$ defined on $\mathbf{R} \times I$ to the set of compact and convex sets K_C^1 in $\mathbf{R}$. Then one can solve the following differential inclusions

$$\xi_\alpha'(t) \in F(\xi_\alpha, \alpha), \; \xi_\alpha(0) \in L_\alpha(\nu),$$

where $L_\alpha(\nu) = [\nu_1(\alpha), \nu_2(\alpha)]$ for $\alpha \in I$, which means that differential inequalities

$$-D_2(\alpha)\xi_\alpha(t) \leq \xi_\alpha'(t) \leq -D_1(\alpha)\xi_\alpha(t)$$

$$\nu_1(\alpha) \leq \xi_\alpha(0) \leq \nu_2(\alpha)$$

for $\alpha \in I$. Then we emphasize that the function ξ_α is $\mathbf{R}-$valued function defined on $\mathbf{R}$ without information on the grade of fuzzy number x, so $\xi_\alpha(t)$ is a real numbers but not fuzzy number. By basic calculation we get $\xi_\alpha(0)e^{-D_2(\alpha)t} \leq \xi_\alpha(t) \leq \xi_\alpha(0)e^{-D_1(\alpha)t}$ with $\xi_\alpha(0) \in L_\alpha(\nu)$. Therefore we have $\xi_\alpha(t) \in [\nu_1(\alpha)e^{-D_2(\alpha)t}, \nu_2(\alpha)e^{-D_1(\alpha)t}]$ for $\alpha \in I, t \in \mathbf{R}$, which is called a solution set denoted by

$S_\alpha(L_\alpha(\nu), t) = [\nu_1(\alpha)e^{-D_2(\alpha)t}, \nu_2(\alpha)e^{-D_1(\alpha)t}]$. The solution set $S_\alpha(L_\alpha(\nu), t)$ is the $\alpha-$cut set of the parametric representation of a fuzzy number $(\nu_1 e^{-D_2 t}, \nu_2 e^{-D_1 t})$. Thus we get a fuzzy solution of (3.2) as $x(t) = (\nu_1 e^{-D_2 t}, \nu_2 e^{-D_1 t})$ for $t \in \mathbf{R}$.

5 Concluding Remarks

In classical analysis of the initial value problem (3.2) we observe the unstability of solutions by the method of parametric representation of fuzzy numbers. By applying differential inclusions to fuzzy differential equations(FDE) the same results of FDE as those in theory of ordinary differential equations. Much richer properties in fuzzy differential inclusions is significant but, in considering K_C^1-valued function $F(\xi, \alpha)$, one treats each fuzzy number $x(t) \in \mathcal{F}_{\mathrm{b}}^{st}$ as a real number $x(t) \in \mathbf{R}$. Finally, we get solution sets which are the $\alpha-$cut sets of a fuzzy set. By treating many practical modeling of real systems with uncertainty we can get better conclusions on comparison between fuzzy differential inclusions and the parametric representation of fuzzy numbers.

References

[1] J.P. Aubin and A. Celina: Differential Inclusions, Springer Verlag, New York (1984).

[2] P. Diamond: Time-Dependent Differential Inclusions, Cocycle Attractors and Fuzzy Differential Equations, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol. 7, No. 6, pp.734-740 (1999).

[3] P. Diamond: Stability and Periodicity in Fuzzy Differential Equations, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol. 8, No. 5, pp.583-590 (2000).

[4] P. Diamond and P. Kloeden: Metric Spaces of Fuzzy Sets -Theory and Applications-, World Scientific (1994).

[5] Jr. R. Goetschel, W. Voxman: Topological Properties of Fuzzy Numbers, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 9, pp.87-99 (1983).

[6] E. Hüllermeier: An Approach to Modeling and Simulation of Uncertain Dynamical Systems, *Int. J. Uncertainty, Fuzziness, Knowledge-based Systems*, Vol. 5, pp.117- 137(1997).

[7] O. Kaleva: The Cauchy Problem for Fuzzy Differential Equation, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 35, pp.389-396(1990).

[8] V. Lakshmikanthan and R.N. Mohapatra: Theory of Fuzzy Differential Equations and Inclusions, Taylor & Francis, London (2003).

[9] S. Saito: On Some Topics of Fuzzy Differential Equations and Fuzzy Optimization Problems via a Parametric Representation of Fuzzy Numbers, *Differential Equations and Applications, Vol. 3*, Nova Science Publishers, Inc., New York(in press).

[10] S. P. Sethi, G. L. Thopson and V. Udayabhanu: Profit Maximization Models for Exponential Decay Processes, *European J. OR* , Vol. 22, pp.101-115(1985).

一般講演論文

9月9日（火）

複数剛体を含む動画像におけるラオ-ブラックウェル化粒子型フィルタを用いた特徴点追跡と物体識別

Feature point tracking and object discrimination in a scene of moving rigid objects with Rao-Blackwellized particle filter

○宮原靖武　内野毅　生駒哲一　前田博
Yasutake Miyahara　Tsuyoshi Uchino　Norikazu Ikoma　Hiroshi Maeda
九州工業大学　工学部
Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract We estimate 2D-motion of rigid objects on image plane by using trajectories of feature points. Motion of objects are expressed by state space model, where state vector has coordinate of each feature point, translation and rotation center of each object, and velocity and angular velocity of each object. Each feature point has indicator variable that represents the association between feature point and object. Estimating the state vector by Rao-Blackwellized particle filter, which reduces the variance of Monte Carlo estimates, we can obtain smooth trajectories and indicator estimation simultaneously.

1　はじめに

コンピュータビジョンの研究で，動画像から対象物体の３次元空間中での形状と動きをボトムアップに復元することは，シーンに対する事前情報が少なくて済むという利点があり，広く研究されている[3,4,7,8,9,10,11]．その一つにオプティカルフローを用いる方法がある[10]．また別の方法として，画像中の特徴点を抽出し[2]，追跡することで得られる複数の特徴点軌跡を用いる方法がある．我々は，このうち後者に焦点を当てる．

複数の特徴点軌跡を用いて３次元復元を行なうには次のような方法がある．複数特徴点軌跡を用いて計測行列を構成し，これを特異値分解することにより物体の３次元形状と動きを表わす二つの行列へと分割することができる．さらに因子分解法ではブロック対角化を行い，複数特徴点を複数物体に分類する[4]．これらの方法は，新たな時刻のデータが得られた場合，計測行列を再構成して行列の分解を再度計算しなければならず，現在までに得られた計算結果を再利用することができない．一方，逐次処理に向いた方法として時系列フィルタリングによるものがある[3]．[3]では，一つの物体について，物体の３次元的運動を回転と平行移動に分けてモデル化し，モデルが可観測であることを証明している．

３次元復元以前に，特徴点軌跡自体を滑らかにする問題がある．特徴点軌跡は，量子化や画像処理による誤差もあるが，特徴点の抽出誤りや追跡の際の誤対応による開口問題と呼ばれる大きな誤差もあり，必ずしも物体の実際の動きと同じ滑らかなものであるとは限らない．特徴点軌跡を用いた３次元復元では，２次元平面上でのわずかな誤差が，３次元空間では大きなものとなり得る．特徴点ごとに誤差を軽減し，滑らかな軌跡を得る方法に，時系列フィルタリングを適用するものがある[7]．時系列フィルタリングの代表的な方法にカルマンフィルタがあるが，モデルに強い非線形性がある場合や，ノイズに正規分布が仮定できない場合（外れ値が存在する等）には適用できない．この問題の解決法として，多数の重み付き粒子で分布を近似する粒子型フィルタ[5]を用いる方法がある[8]．

複数の特徴点を同時に扱う時系列フィルタリングとしては，[9]では，同一の剛体に属する特徴点は同一の動きで移動するという性質を利用して，単一物体において開口問題の場合の推定を行なっている．また，[11]では，複数物体の場合を扱い，本来は未知である特徴点と物体の対応を物体ラベルを用いて推定をしている．各特徴点が，その属する物体を特定するための物体ラベルを持ち，状態推定により特徴点軌跡を滑らかにすると同時に特徴点の属する物体を推定している．しかし[11]では，物体の動きに平行移動しか想定していないため，回転を含むシーンでは物体ラベルの推定が正しくできないという問題がある．

本研究では，以上の状況を踏まえて，複数の物体(剛体)が独立に移動するシーンを想定し，平行移動と回転からなるモデルを用いて，物体の動きと形状の推定を行なう．物体の動きを特徴点の位置，回転中心と回転角，速度と角速度を状態ベクトルに持つ状態空間モデルで表し，逐次的に状態推定を行い，これらを求める．ここで各特徴点が属する物体は未知であるため，これも同時に推定する必要がある．状態推定することより，滑らかな特徴点軌跡を得，かつ各特徴点がどの物体に属するかを推定する．

上で定義したモデルは非線形性があるので，推定には粒子型フィルタを用いる．さらに，提案モデルは条件付き線形であるので，推定の分散を減少させるラオ-ブラックウェル化粒子型フィルタ[1,6]を用いることができる．これは条件付き線形ガウスモデルの特性を利用し，強い非線形性を持つ状態の要素の推定に粒子による近似を用い，残りの要素はカルマンフィルタを用いて推定する．また我々は，粒子型フィルタにおいて新しい粒子を draw する際に，準最適なプロポーザル分布を提案する

本文の以後の構成は次のとおりである．２節では，提案モデルを定義する．モデルは非線形性であり，粒子型フィルタにより推定を行なう必要がある．ここでは粒子型フィルタで推定を行なえるように，モデルを状態空間表現する．そして，粒子型フィルタによる状態推定の方法についても述べる．３節では，シミュレーションによる実験の結果を示す．４節では，まとめと今後の課題について述べる．

2　モデル

対象物体は剛体であると仮定し，複数の対象物体が独立に移動するシーンを想定する．対象物体の位置姿勢は，平行移動と回転により表わされる．対象物体の特徴点を，物体に埋め込まれた座標で表わすとき，各特徴点座標を対象物体の平行移動と回転に従って変換すると，画像中の特徴点の位置になる．

物体の平行移動と回転について図を用いて説明する．図１のように画面の左下を原点とする XY 座標を定め，これを「世界座標」と呼ぶことにする．物体の回転中心に原点を置く座標系を考え，これを「物体座標」と呼ぶ．世界座標における物体座標の原点をベクトル $\mathbf{t}$ で表わす．次に物体上のある一つの特徴点が y 軸上に乗るように物体座標の

向きを定め，物体座標系と世界座標とのなす角度をθと表わす．

複数の物体が存在する場合は，各特徴点は，それぞれの特徴点が属する物体の物体座標系で表わされる．つまり，同一の物体に属する全ての特徴点は同一の位置姿勢(動き)情報を持つ．各特徴点に物体ラベルを持たせ，その値が示す物体の位置姿勢(動き)情報を用いて各特徴点は移動するものとする．これをシステムモデルで表す．また画像計測の過程を観測モデルで表す．

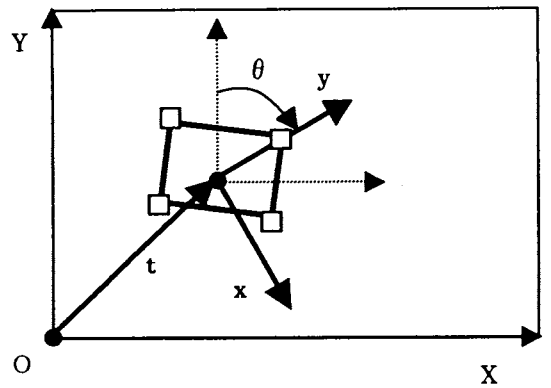


図１：物体の平行移動と回転

２．１　モデルの定義

特徴点の数をp，物体の数をqとし，これらは既知で一定とする．離散時間の時刻を整数kで表わす．j 番目の特徴点の位置を

$$\mathbf{x}_j(k)=[x_j(k),y_j(k)] \tag{1}$$

とする．この座標は，特徴点の属する物体が持つ座標系(物体座標系)によって表わされ，物体の形状(もしくは構造)を意味している．

i 番目の物体において，世界座標系で表わされる物体座標系の原点を，

$$\mathbf{t}_i(k)=[t_{x,i}(k),t_{y,i}(k)] \tag{2}$$

とする．これは物体の回転中心でもある．また，$\mathbf{t}_i(k)$の一階微分$\dot{\mathbf{t}}_i(k)$が，その物体の速度となる．

$\theta_i^{(k)}$を世界座標系のｙ軸と物体座標系のｙ軸のなす角度とする．つまり，$\theta_i^{(k)}$は物体座標系の向きを定める値で，物体の姿勢(向き)を表わす．また，$\dot{\theta}_i^{(k)}$は物体の回転の角速度である．

各特徴点には物体ラベルを割り当てる．$I_j(k)$を j 番目の特徴点の物体ラベルとする．物体ラベル $I_j(k)$は$\{1,2,\ldots,q\}$の値をとり，その値により特徴点の属する物体を特定する．特徴点は物体ラベルで示された物体の回転中心，角度及びそれらの速度を用いて，画像面上を移動する．

世界座標系における特徴点の位置を，

$$\mathbf{X}_j^*(k)=[X_j^*(k),Y_k^*(k)] \tag{3}$$

と表わす．物体座標系から世界座標系への変換は次式でなされる．

$$\mathbf{X}_j^*(k)=\mathbf{x}_j(k)\mathbf{R}\left(\theta_{I_j(k)}(k)\right)+\mathbf{t}_{I_j(k)}(k) \tag{4}$$

ここで，R(θ)は回転行列である．

特徴点の位置は，観測ノイズが加えられ，次のように観測されると仮定する．

$$\mathbf{X}_j(k)=\mathbf{X}_j^*(k)+\mathbf{w}_j(k),\quad \mathbf{w}_j(k)\sim N(\mathbf{0},\Sigma) \tag{5}$$

以上の議論において，i 番目の物体の物体座標系の角度$\theta_i(k)$とその物体に属する特徴点の位置との識別可能性を保つために，i 番目の物体に含まれる任意の一つの特徴点(これをｍとする)に対して，$x_m(k)=0$が必要とされる．

２．２　状態空間表現

前述のモデルを状態空間表現し，粒子型フィルタによる状態推定を行なえるようにする．まず，状態ベクトルを次で表わす．

$$\mathbf{z}_k=[\mathbf{x}_k,\mathbf{T}_k,\Theta_k,\mathbf{I}_k] \tag{6}$$

ここで

$$\mathbf{x}_k=[\mathbf{x}_1(k),\mathbf{x}_2(k),\cdots,\mathbf{x}_p(k)] \tag{7}$$

$$\mathbf{T}_k=[\mathbf{t}_1(k),\mathbf{t}_2(k),\cdots,\mathbf{t}_q(k)] \tag{8}$$

$$\Theta_k=[\theta_1(k),\theta_2(k),\cdots,\theta_q(k)] \tag{9}$$

$$\mathbf{I}_k=[I_1(k),I_2(k),\cdots,I_p(k)] \tag{10}$$

である．また，観測ベクトルを次で示す．

$$\mathbf{y}_k=[\mathbf{X}_1(k),\mathbf{X}_2(k),\cdots,\mathbf{X}_p(k)] \tag{11}$$

確率分布を用いた表記では，状態空間モデルを次のように表現することができる．

$$\mathbf{z}_k\sim q(\cdot\,|\,\mathbf{z}_{k-1}) \tag{12}$$

$$\mathbf{y}_k\sim p(\cdot\,|\,\mathbf{z}_k) \tag{13}$$

別の表記法として，条件付き線形の式により状態空間表現することもできる．特徴点の位置，回転中心，姿勢及びそれらの速度は，線形のシステムモデル

$$\mathbf{x}_k=\mathbf{x}_{k-1}+\mathbf{v}_x(k) \tag{14}$$

$$\mathbf{T}_k=\mathbf{T}_{k-1}+\dot{\mathbf{T}}_{k-1},\quad \dot{\mathbf{T}}_k=\dot{\mathbf{T}}_{k-1}+\mathbf{v}_T(k) \tag{15}$$

$$\Theta_k=\Theta_{k-1}+\dot{\Theta}_{k-1},\quad \dot{\Theta}_k=\dot{\Theta}_{k-1}+\mathbf{v}_\Theta(k) \tag{16}$$

で表わされる．ここで，$\mathbf{v}_x$, $\mathbf{v}_T$, $\mathbf{v}_\theta$は平均ベクトルが０の正規分布に従うノイズで，それぞれの共分散行列はσ^2_x, σ^2_T, σ^2_θを要素とする対角行列である．対象物体が剛体の場合，$\mathbf{v}_x(k)=0$とする．

物体ラベルはほぼ一定と想定している．したがって，その時間進展はマルコフ過程に従うものとする．すなわち，

$$\mathbf{I}_k\sim M(\cdot\,|\,\mathbf{I}_{k-1}) \tag{17}$$

である．観測方程式は

$$\mathbf{y}_k=\mathbf{H}(\Theta_k,\mathbf{I}_k)\begin{bmatrix}\mathbf{x}_k\\ \mathbf{T}_k\end{bmatrix}+\mathbf{w}(k) \tag{18}$$

とΘ_kと $\mathbf{I}_k$の条件付き線形式で表わされる．ここで，$\mathbf{H}(\Theta_k,\mathbf{I}_k)$は，物体座標系から世界座標系への変換を表わしている．Θ_kに関しては非線形性がそれほど強くないので，拡張カルマンフィルタにより推定を行うことができるが，$\mathbf{I}_k$については非線形性が強く，かつ離散値をとるので，粒子型フィルタにより推定を行う必要がある．

２．３　粒子型フィルタ

状態推定とは，次の条件付き分布を求める問題である．

$$p(\mathbf{z}_{0:k}\,|\,\mathbf{y}_{1:k}) \tag{19}$$

ここで，次の表記を用いる

$$\mathbf{z}_{0:k}=\{\mathbf{z}_0,\mathbf{z}_1,\cdots,\mathbf{z}_k\}. \tag{20}$$

条件付き分布は一般に非ガウスであるため，何らかの近似を用いて求める必要がある．粒子型フィルタはその方法の

一つで，多数の重み付けされた粒子 $\{\mathbf{z}_{0:k}^{(i)}, \omega_k^{(i)}\}_{i=1}^{M}$ で条件付き分布を有効に近似する，その計算量は粒子数Mのオーダーである．ここで，$\omega_k^{(i)} \geq 0$ は正規化された重みで，つまり $\Sigma_{i=1}^{M} \omega_k^{(i)} = 1$ である．

状態推定の問題は，逐次的な方法で解くことができる．すなわち，初期分布 $p(z_{00}|\{\phi\})$ を所与とし，データが与えられる度に，条件付き分布を $p(z_{01}|y_{11})$，$p(z_{02}|y_{12})$，…と時間順に推定(更新)する．これを実現するために，「新しい粒子の draw」，「重みの更新」及び「リサンプリング」の三つの主要な手続きをとる．具体的には，

$$\tilde{\mathbf{z}}_k^{(i)} \sim \pi\left(\cdot \mid \mathbf{z}_{0:k-1}^{(i)}, \mathbf{y}_{1:k}\right) \tag{21}$$

と，新しい粒子を draw する．ここで，$\pi(z_k|z_{0:k-1},y_{1:k})$ は「プロポーザル分布」と呼ばれる．この選択にはいくらかの自由度があり，アルゴリズムのより良い性能を実現するためにその選択は重要である．重みの更新は次で行なう．

$$\omega_k^{(i)} \propto \omega_{k-1}^{(i)} \frac{p\left(\mathbf{y}_k \mid \tilde{\mathbf{z}}_k^{(i)}\right) q\left(\tilde{\mathbf{z}}_k^{(i)} \mid \mathbf{z}_{k-1}^{(i)}\right)}{\pi\left(\tilde{\mathbf{z}}_k^{(i)} \mid \mathbf{z}_{0:k-1}^{(i)}, \mathbf{y}_{1:k}\right)} \tag{22}$$

以上の二つの手続きのみを繰り返し行なっていくと，時刻の経過と共に少数の粒子だけが非ゼロの重みを持ち，他の多数の粒子は限りなくゼロに近い重みを持つことになり，大多数の粒子の計算が無駄になる「アルゴリズムの縮退」が起こる．これを避けるために，「リサンプリング」は重要な役割を果たす．リサンプリングは，粒子の確率的な選択

$$\mathbf{z}_{0:k}^{(i)} = \begin{cases} \left\{\mathbf{z}_{0:k-1}^{(1)}, \tilde{\mathbf{z}}_k^{(1)}\right\} & with\ prob.\ \omega_k^{(1)} \\ \vdots \quad\quad \vdots & \vdots \\ \left\{\mathbf{z}_{0:k-1}^{(M)}, \tilde{\mathbf{z}}_k^{(M)}\right\} & with\ prob.\ \omega_k^{(M)} \end{cases} \tag{23}$$

を行なう手続きである．

ラオ-ブラックウェル化粒子型フィルタは，粒子型フィルタの推定の分散を減少させる方法である．条件付き線形ガウスモデルでは，式(18)は物体ラベル $I_{0:k}$ が与えられれば，非線形性の弱い非線形ガウスのモデルとなり，拡張カルマンフィルタを用いて近似的に推定することができる．

ラオ-ブラックウェル化粒子型フィルタのアルゴリズムは以下のようになる．式(21)は I_k にのみ適用され，$\tilde{\mathbf{I}}_{0:k}^{(i)} = \left\{\mathbf{I}_{0:k-1}^{(i)}, \tilde{\mathbf{I}}_k^{(i)}\right\}$ が得られる．次に，各物体ラベル $\tilde{\mathbf{I}}_{0:k}^{(i)}$ について，拡張カルマンフィルタを用いて物体ラベル以外のろ波推定と尤度 $p(y_k|y_{1:k-1};\tilde{\mathbf{I}}_{0:k}^{(i)})$ を得る．式(22)では，$p(y_k|\tilde{\mathbf{z}}_k^{(i)})$ の代わりに $p(y_k|y_{1:k-1};\tilde{\mathbf{I}}_{0:k}^{(i)})$ を用い，$q()$ の代わりに $M()$ を用いる．式(23)では，$\mathbf{I}_{0:k}^{(i)}$ についてのリサンプリングを行なう．

ラオ-ブラックウェル化粒子型フィルタのプロポーザル分布 $\pi(\mathbf{I}_k|\mathbf{I}_{0:k-1},\mathbf{y}_{1:k})$ の選択は，物体ラベル I_k の組み合わせ数が「物体数」q の「特徴点数」p 乗あり，これは特徴点数について指数関数的に増加する．この組み合わせ数が多くなると，最適なプロポーザル分布

$$\pi\left(\mathbf{I}_k \mid \mathbf{I}_{0:k-1}, \mathbf{y}_{1:k}\right) = p\left(\mathbf{I}_k \mid \mathbf{I}_{0:k-1}, \mathbf{y}_{1:k}\right) \tag{24}$$

は，ラベルの全組み合わせを計算するので，実用的でない．そのため，準最適なプロポーザル分布が有用となる．提案モデルは尤度が特徴点ごとに独立であるため，準最適なプロポーザル分布として

$$\pi\left(\mathbf{I}_k \mid \mathbf{I}_{0:k-1}, \mathbf{y}_{1:k}\right) \propto \prod_{j=1}^{p} p\left(\mathbf{X}_j(k) \mid I_j(k), \mathbf{I}_{0:k-1}, \mathbf{y}_{1:k-1}\right) p\left(I_j(k) \mid I_j(k-1)\right) \tag{25}$$

を用いることができる．

3 シミュレーション実験

シミュレーションデータを次の通りに生成した．回転中心を(30,10)とし，これを中心に角速度 0.06[rad]で回転しながらxy軸方向に(0.1,−0.2)の速度で平行移動する物体と，(40,10)を中心に−0.085[rad]で回転しながら（−0.2,0.1）の速度で平行移動する物体，及び移動しない背景の3つの物体を仮定する．各物体上にそれぞれ3つの特徴点を考え，これに平均 0，分散 0.1 の正規分布に従うノイズを加えてシミュレーションデータを作成した．

推定には，粒子を 1000 個用いた．観測ノイズは 0.1，物体の速度に対するシステムノイズは 10^{-3}，角速度に対するシステムノイズは 10^{-4} とした．回転中心の初期分布には，真値を中心とする分布を与えた．

特徴点の位置の推定結果とシミュレーションデータを図2に，推定結果と真の軌跡を図3に示す．各特徴点とも，推定された軌跡はデータよりも滑らかで，真の軌跡に近い事が分かる．図3にて，座標(15,34)近傍で真値に比べ推定値が大きく揺れている箇所があるが，これは初めの方の時刻の推定結果であり，ラベルがまだ正しく推定されていない特徴点が多く存在するため，このような誤差が生じる．

次に，各物体の平行移動成分と回転角の推定結果をそれぞれ図4，図5に示す．平行移動成分，回転角ともに真の値に近い推定が行なわれていることが分かる．

表1に物体ラベルの推定結果を示す．結果は，特徴点ごとのラベルの最頻値を示している．ラベルは左から3点ごとに同一物体に属している．少数の誤対応は存在するが，ほとんどの結果は正しい値が得られている．

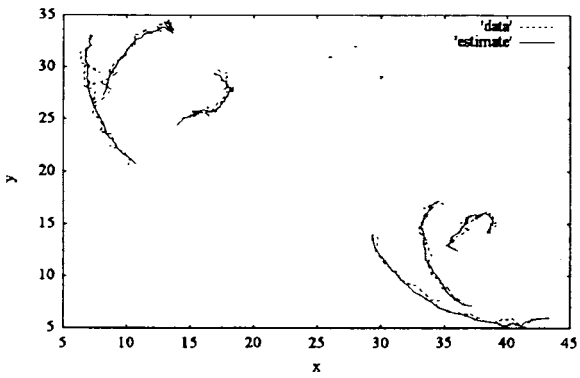


図2：推定結果とシミュレーションデータ

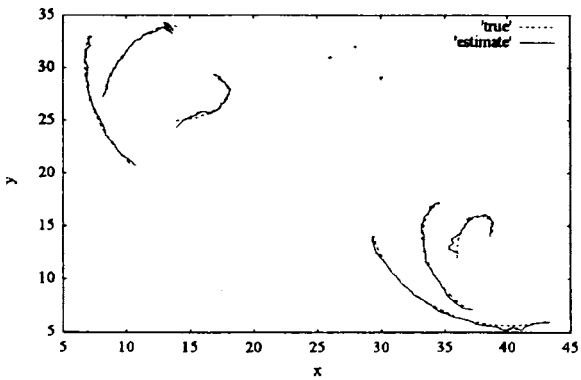


図3：推定結果と真の軌跡

4 おわりに

画像中を複数剛体が独立に移動するシーンを想定し，平行移動と回転からなるモデルを用いて，複数剛体上の複数特徴点の動きを表わすモデルを提案した．また，各特徴点に，物体ラベルを持たせて，特徴点の属する物体を推定するようにした．このモデルを状態空間表現し，状態推定することにより逐次的に各特徴点の属する物体を推定し，かつ，滑らかな特徴点軌跡を得た．状態推定にはラオーブラックウェル化粒子型フィルタを用い，準最適プロポーザル分布を提案した．シミュレーション実験により，モデルの有用性を確認した．

今後の課題として，まず回転中心の位置の初期分布に真値を中心とする分布を与える条件は無くさなければならない．次に，特徴点軌跡から複数物体の３次元空間中での形状と動きを逐次的に推定するモデルの構築が挙げられる．これには，観測モデルに，３次元空間中の点がどのように２次元平面に射影されるかを表わすカメラモデルを用いることになる．また将来的には，物体数未知の場合を扱う方法を検討したいと考えている．

謝辞 本研究は，統計数理研究所共同利用研究 14－共研－1004 による．

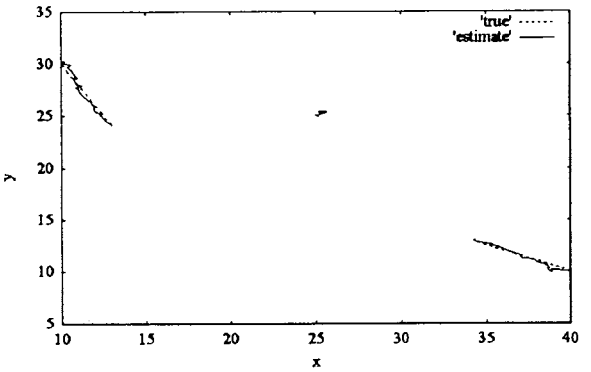


図４：平行移動成分の推定結果

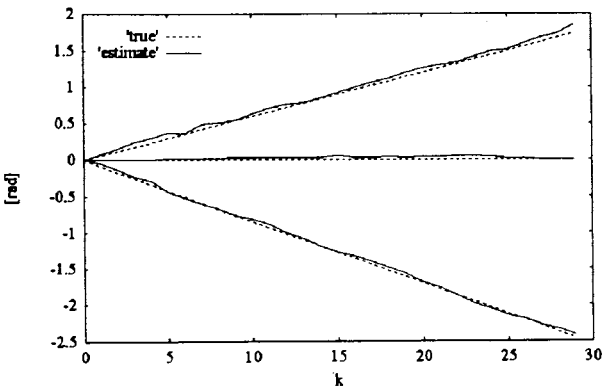


図５：回転角の推定結果

表１：物体ラベルの推定結果

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

参考文献

[1] G.Casella, C.P.Robert" Rao-Blackwellisation of sampling schemes",*Biometrika*,83,1,pp.81-94(1996)

[2] F.Chabat , G.Z.Yang and D.M. Hansell , "A coener orientation detector ", *Image and Vision Computing.*, 17, pp.761-769 (1999)

[3] A.Chiuso, P.Favaro, H.Jin, and S.Soatto, "Structure from Motion Causally Integrated Over time",*IEEE transaction on pattern analysis and machine intelligence*, vol.24, no.4, pp .523-535(2002)

[4] J.Costeira, T.Kanade, "A Multi-body Factorization Method for Motion Analysis",CMU-CS-TR-94-220, (1994)

[5] A.Doucet, N.D.Freitas, N.Gordon,"Sequential Monte Calro Methods in Practice",Springer(2001)

[6] A.Doucet, N.J.Gordon, and V,Krishnamurthy,"Particle Filter for State Estimation of Jump Markov Linear Systems",*IEEE transactions on signal processing*,vol.49, No.3(2001)

[7] 生駒哲一，市村直幸，「動画像特徴量のフィルタリング」，統計数理研究所 共同研究リポート 124，pp.69-78 (1999)

[8] 市村直幸，生駒哲一，「逐次モンテカルロ法を用いた時系列画像から得られる特徴点の運動軌跡のスムージング」，情報論的学習理論ワークショップ，pp.33-38 (2000)

[9] 伊藤亘，生駒哲一，前田博，「動画像の開口問題への複数特徴点を用いた時系列フィルタリングによる一手法」，第17回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.161-164(2001)

[10] 出口光一郎，「ロボットビジョンの基礎」，コロナ社，第５章，pp.56-78(2000)

[11] 宮原靖武，内野毅，生駒哲一，前田博，「画像面中を移動する複数剛体の状態空間モデルによる動的識別」，第18回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.267-270(2002)

連絡先

〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町１－１
九州工業大学 工学部 生駒哲一
E-mail: ikoma@comp.kyutech.ac.jp

ファジィ論理を用いた 正常血管推定による MRA 画像からの脳動脈瘤検出法

Finding of Cerebral Aneurysms from MRA Images with Estimating Normal Arteries Aided by Fuzzy Logic

二宮　美佳[†]　小橋　昌司[†]　近藤　克哉[†]　畑　豊[†]
Mika NINOMIYA[†]　Syoji KOBASI[†]　Katsuya KONDO[†]　Yutaka HATA[†]
今脇　節朗[‡]　内田　發三[‡]
Seturo IMAWAKI[‡]　Hatsuzo Uchida[‡]

[†]姫路工業大学大学院工学研究科
[‡]石川病院

[†]Graduate School of Engineering, Himeji Institute of Technology
[‡]Ishikawa Hospital

Abstract: MRA (magnetic resonance angiography) is a commonly used method for noninvasive imaging of unruptured cerebral aneurysms. To develop a computer-aided diagnosis (CAD) system of aneurysms using MRA images, we propose an automated method for finding cerebral aneurysms by estimating the normal artery model. The normal model is estimated by using the centerline of segmented blood vessels. The aneurysm candidates are extracted by comparing the segmented blood vessel with the normal model. To evaluate aneurysm candidates, we employ three features; the Euclidean distance from the normal model, MR signal value, and directional gradient concentration (DGC). Using the features the aneurysm detection system is constructed by learning the reference vector from training data sets. This system can evaluate the degree of aneurysm for aneurysm candidates. This system was applied to eight patients with some cerebral aneurysm successfully.

1．はじめに

重篤な脳疾患であるくも膜下出血は，主幹脳動脈に発生した瘤の破裂によって発症する．このため，未破裂脳動脈瘤の早期発見は､くも膜下出血の予防に特に重要であり，脳ドッグなどで積極的に行われている．現在，未破裂脳動脈瘤の非侵襲的な診断にはMRA (magnetic resonanse angiography) 画像診断が広く用いられている．しかし，動脈瘤の大きさ，撮像に用いるMR装置，撮像方法，医師の読影力など様々な要素によって，偽陽性率 (fp;fault-positive)や偽陰性率 (fn;fault-negative)に大きな差があることが指摘されており，1 割程度の見落としがあるとされている[1]．そのため，有用な脳動脈瘤診断支援システムの開発が望まれている．

これまで，MRAによる診断にはMIP法 (maximum intensity projection)により再構成した画像を用いており，様々なMIP法が研究されている [2]．また，脳動脈瘤の診断支援技術として画像から脳血管を領域抽出し 3 次元可視化を行う方法 [3][4]，血流の流れを数理モデル化し脳動脈瘤の発生を解析する方法[5]などが提案されている．しかし，複雑な構造である脳血管をあらゆる角度から全て観察し，手作業で脳動脈瘤を検出するには多大な時間がかかり，医師への負担がまだ大きい．また，大動脈における形状特徴を計測して病変部を検出する手法[5][6]が開発されているが，大きな歪曲や分岐部については考慮されておらず，処理対象が限定されている．そこで本研究では，正常血管を推定することで血管の形状に依らない脳動脈瘤検出法を提案する．

2．準備

本研究ではGE Medical Systems社の 1.5 Tesla MR装置 Genesis Signaを用いて3-D TOF (time of flight) MRA 法(TE=6.9msec, TR=25.0msec)により撮影された 1 被験者あたり 100 枚程度の MRA 画像を使用する．データ構成は，画素数 512×512，スライス間隔 1.2mm，撮像範囲は 160mm×160mm である．1 ボクセルあたりの体積 v=0.3125×0.3125×0.6mm^3 である．

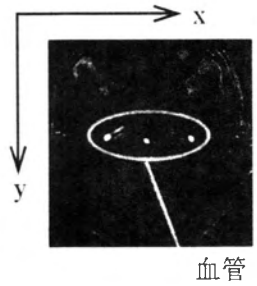


図 1　原画像の 1 例

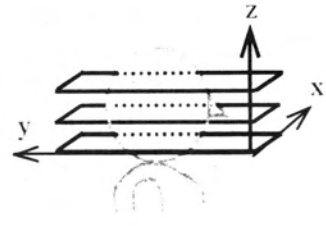


図 2　データの座標系

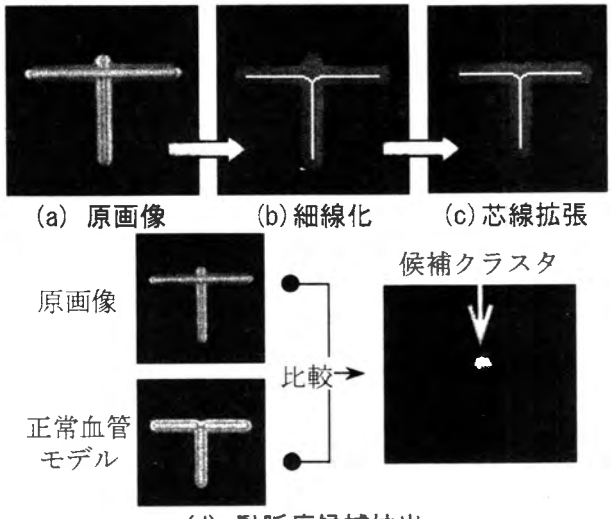


図3　モデル推定による動脈瘤候補の抽出

原画像の1例を図1に，データ撮影座標系を図2に示す．

3．正常血管推定による脳動脈瘤検出法

3.1 概略

前処理として Kobashi らによる脳血管自動抽出法[3][4]を適用し，MRA 画像から背景領域の画素値を0，血管領域の画素値を1とした3次元2値血管画像を構成する．次に，抽出された血管の細線化を行う[8]．これによって得られた血管芯線をもとに脳血管の正常モデルを推定し，正常モデルと抽出血管を比較し，脳動脈瘤である可能性を持つ候補領域を抽出する．次に，各候補領域において脳動脈瘤所属度に寄与する特徴値をそれぞれ算出する．既知データにおける特徴値ベクトルから参照ベクトルを学習し，この参照ベクトルをもとに未知データの候補領域における脳動脈瘤所属度を算出する．なお，実験に用いる MRA データは線形補間によってスライスを補間しておく．これにより，1 ボクセルあたりの辺の比を 1:1:1 に近似する．以下，各処理の詳細について述べる．

3.2 正常血管モデル推定と動脈瘤候補の抽出

細線化によって得られた血管芯線上の各ボクセルに対して，背景ボクセルまでの最短距離を計測する．この距離を各ボクセルにおける血管の半径として，ボクセルごとに芯線を拡張し，血管モデルを作成する．このようにして得られたモデルは，芯線を中心として 3 次元空間上で動脈瘤のない方向にフィッティングされているので，これを正常血管モデルとする．次に，推定した正常血管モデルと抽出血管を比較し，連結ボクセル数 Th_N（本方法では $Th_N = 20$）以上の領域を脳動脈瘤である候補クラスタとして抽出する．モデル推定による候補クラスタ抽出の例を図3に示す．

3.3 特徴抽出

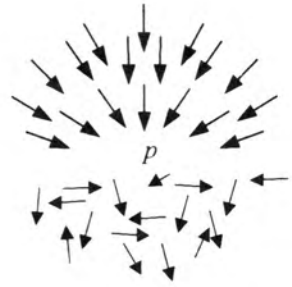


図4　半球体における勾配ベクトルの分布

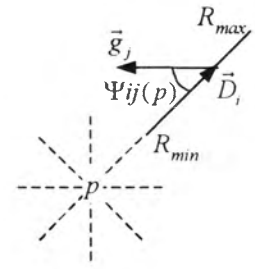


図5　$e_i^{\max}$ の計算

3.2 で得られた候補クラスタは脳動脈瘤領域か，モデルの推定ミスによって検出された血管領域か，前処理で過剰抽出されていた血管領域（主に細線化の際に short branch として除去される）であると考えられる．各候補クラスタにおいて次のような特徴値を考える．

[特徴 1]　f_v

注目候補クラスタ内の全てのボクセルにモデルへの最短ユークリッド距離値を割り当て，距離値のヒストグラムから分散を求める．ここで，分散が非常に小さいとき，その候補領域は除去された short branch 領域を表している．また，分散が非常に大きいとき，推定した正常モデルが小さ過ぎたことにより血管表面が検出されたことを表している．

[特徴 2]　f_i

脳動脈瘤領域は血管領域の一部であるため，血管領域と同程度の MR 値を持つ．

[特徴 3]　f_d

脳動脈瘤は半球に近い形状を持つ．このとき，各候補クラスタ内の注目点 p において輝度勾配ベクトルの分布は図4のようになると考えられる．この様子を顕著に表す特徴値として，候補クラスタ内の全てのボクセルについて(1)式より DGC を求める[9]．

$$\mathrm{DGC}(p) = \frac{1}{2N}\sum_{i=1}^{N/2}\begin{cases}\left|e_i^{\max}(p) - e_j^{\max}(p)\right|: & e_i^{\max}(p), e_j^{\max}(p) > 0 \\ e_i^{\max}(p) + e_j^{\max}(p): & \text{otherwise.}\end{cases} \quad (1)$$

$$e_i^{\max}(p) = \max_{R_{\min} \le n \le R_{\max}}\left\{\frac{1}{n - R_{\min} + 1}\sum_{j=R_{\min}}^{n}\cos\Psi_{ij}(p)\right\}$$

$e_i^{\max}$ は図5に示すように，注目点 p において各探査半直線での輝度勾配ベクトル $\vec{g}_j$ の集中度が最大となる j を，注目点からの距離範囲[R_{min}, R_{max}]で探索し，それらの平均値として与えられる．N は3次元空間における探査直線の数を表す．また，$e_i^{\max}$ と $e_j^{\max}$ は，p を中心とした反対探査方向から計算される．

3.4 参照ベクトルの学習と脳動脈瘤所属度の算出

3.3 で示した全ての特徴値は標準化変換により正規化される．正規化された3次元特徴値空間におい

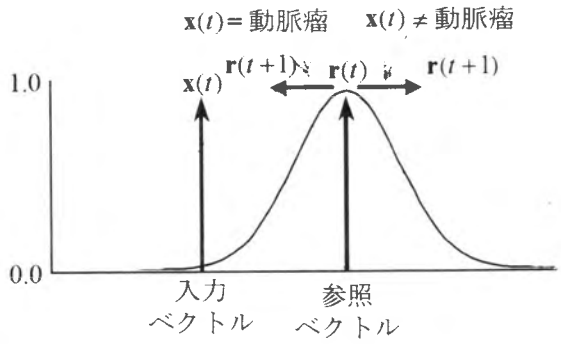


図 6　参照ベクトルの学習則

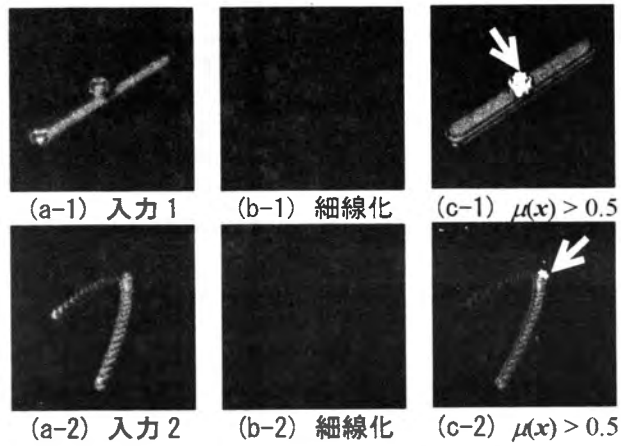


図 7　ファントム結果

表 1　特徴値と参照ベクトル

特徴値	参照ベクトル
variance	1.152579
mean(MR)	2.128647
max10(DGC)	2.003937

＊　max10 は候補クラスタ内で上位 10 ボクセルの平均とする

て，脳動脈瘤とそれ以外の特徴位置を示す参照ベクトル $\mathbf{r}=(r_1,r_2,r_3)$，$\bar{\mathbf{r}}=(\bar{r}_1,\bar{r}_2,\bar{r}_3)$ を設定する．ここで脳動脈瘤所属度 $\mu(\mathbf{x})$ は参照ベクトル $\mathbf{r}$ より(2)式のガウス関数を用いて算出される．

$$\mu(\mathbf{x})=\exp\left(\frac{-|\mathbf{r}-\mathbf{x}|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

$$|\mathbf{r}-\mathbf{x}|=\sqrt{(r_1-x_1)^2+(r_2-x_2)^2+(r_3-x_3)^2}$$

ここで，(2)式の分散 σ^2 は参照ベクトルのあいまいさを示している．既知データを用いて参照ベクトル $\mathbf{r}$ を更新することで最適な $\mathbf{r}$ を得る．学習則を図 6 に示す．学習回数 t における入力ベクトル $\mathbf{x}(t)=(x_1,x_2,x_3)$ が脳動脈瘤を示しているとき，参照ベクトル $\mathbf{r}(t)=(r_1,r_2,r_3)$ を入力ベクトルに近づけ，あいまいさ $\sigma(t)$ を大きくする．ここで x_i, r_i は入力ベクトルの i 番目の特徴値とする．すなわち，(3)式を用いて参照ベクトルとあいまいさを更新する．本方法では初期参照ベクトルは $\mathbf{r}(t)=(0.0,0.0,0.0)$ とした．

$$\begin{aligned}\mathbf{r}(t+1)&=\mathbf{r}(t)+\alpha(t)\cdot\{\mathbf{x}(t)-\mathbf{r}(t)\}\\ \sigma(t+1)&=\sigma(t)\cdot\{1+\alpha(t)\cdot\delta(t)\}\end{aligned} \quad (3)$$

また，入力ベクトル $\mathbf{x}(t)$ が脳動脈瘤を示していないとき，(4)式を用いて，参照ベクトル $\mathbf{r}(t)$ を入力ベクトルから遠ざけ，あいまいさ $\sigma(t)$ を小さくする．

$$\begin{aligned}\mathbf{r}(t+1)&=\mathbf{r}(t)-\alpha(t)\cdot\{\mathbf{x}(t)-\mathbf{r}(t)\}\\ \sigma(t+1)&=\sigma(t)\cdot\{1-\alpha(t)\cdot\beta(t)\}\end{aligned} \quad (4)$$

各更新パラメータは次のように定義する．

$$\begin{aligned}&\alpha(t+1)=(1-\varepsilon)\alpha(t),\quad \alpha(0)=\alpha_0,\\ &0<\delta(t),\beta(t)\le 1.0,\quad \sigma(0)=\sigma_0\end{aligned} \quad (5)$$

既知データからの学習により求められた参照ベクトル $\mathbf{r}$，あいまいさ σ を用い，未知データの候補クラスタにおける入力ベクトル $\mathbf{x}$ を(2)式のメンバーシップ関数に代入し，脳動脈瘤所属度 $\mu(\mathbf{x})$ を算出する．

次にそれ以外の脳動脈瘤でない所属度 $\bar{\mu}(\mathbf{x})$ も同様に算出する．最終的に注目候補クラスタの脳動脈瘤所属度 $\mathrm{M}(\mathbf{x})$ は(6)式で求められる．

$$\mathrm{M}(\mathbf{x})=\frac{\mu(\mathbf{x})}{\mu(\mathbf{x})+\bar{\mu}(\mathbf{x})} \quad (6)$$

4．実験結果

ファントムに対し，学習データから約 20 回学習実験を行い，本方法を適用した結果を図 7 に示す．ファントムは抽出される候補クラスタが少なく，また，形状も限られていたので，20 回という少ない学習データでも良好に動脈瘤部分が抽出されていることが確認できた．

次に，実際の MRA 画像に本方法を適用した．学習データから約 100 回の学習実験を行った．用いた特徴値と学習によって得られた参照ベクトルを表 1

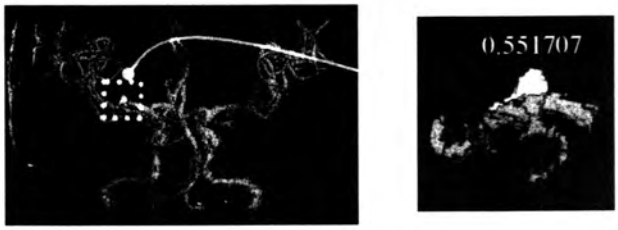
表 2　特徴値と所属度 ($\mu(x)>0.8$)

(a) 被験者 1 (全候補クラスタ数：135 個，*は動脈瘤)

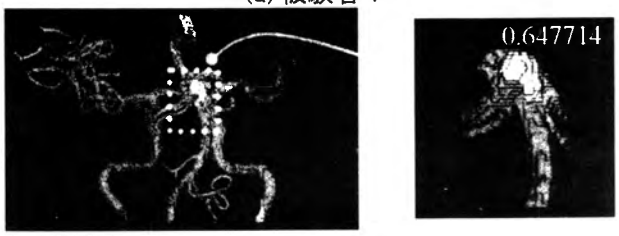
候補クラスタ	variance	mean(MR)	max10(DGC)	$\mu(x)$	$\bar{\mu}(\mathbf{x})$	M(x)
1*	1.566823	1.157152	1.317642	0.551707	0.093638	0.854902

(b) 被験者 2 (全候補クラスタ数：138 個，*は動脈瘤)

候補クラスタ	variance	mean(MR)	max10(DGC)	$\mu(x)$	$\bar{\mu}(\mathbf{x})$	M(x)
1*	0.407139	2.003708	1.640409	0.647714	0.073990	0.897479
2	-0.07023	0.961793	1.615548	0.438180	0.059680	0.880127
3	-0.26956	1.059472	1.643512	0.404658	0.075591	0.842600



(a) 被験者 1



(b) 被験者 2

図 8　検出された脳動脈瘤部

に示す．更新パラメータは経験的に次のように設定した．

$$\varepsilon = 0.02, \quad \alpha_0 = 0.05, \\ \delta(t) = \beta(t) = 0.05, \quad \sigma_0 = 2 \tag{7}$$

脳動脈瘤所属度$\mu(x) > 0.8$で検出を行った結果，検出された候補クラスタにおける特徴値と所属度を表 2 に示す．検出された脳動脈瘤部分を図 8 に示す．

5．まとめ

本研究では正常血管推定による脳動脈瘤の検出法を提案し，その有効性を実験により検証した．本提案法は正常血管モデルから脳動脈瘤候補クラスタを抽出し，既知データから特徴値空間における脳動脈瘤参照ベクトルを学習することで，未知データにおける各候補クラスタの脳動脈瘤の度合いを求める．良好に脳動脈瘤の検出を行えたが，次のような問題点が考えられる．まず，細線化結果が脳動脈瘤の中心を通っている場合，小さい脳動脈瘤はモデルの推定に含まれてしまい，検出できない可能性がある．また，脳動脈瘤の特徴を空間的に決定するベクトルの学習は単純で強力な手法であるが，適切なパラメータを設定しなければ，誤認識が増大し，参照ベクトルが発散してしまう．今後の課題は細線化結果の最適化，評価関数を導入することにより，システムを自動的に安定させることなどが挙げられる．

謝辞

本研究において実験に使用した MRA 画像を提供して頂くとともに，有益な御意見を頂いた医療法人仁寿会石川病院の方々に感謝致します．なお，本研究の一部は，科学研究費若手研究 B および電気通信普及財団の援助を受けた．

参考文献

[1] 片山仁，荒木力，前原忠行，多田信平，宗近宏次，松山正也，森 宣，杉村和朗，跡見裕 編，生涯教育シリーズ－49 日本医師会雑誌特別号 第 121 巻 第 12 号 MRA の ABC，日本医師会，1999.

[2] Y. Sun, and D. Parker, S. "Small Vessel Enhancement in MRA Images Using Local Maximum Mean Processing," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 10, no. 11, pp. 1687-1699, 2001.

[3] S. Kobashi, N. Kamiura, Y. Hata and F. Miyawaki, "Volume Quantization Based Neural Network Approach to 3D MR Angiography Image Segmentation," Image and Vision Computing, vol. 19, no. 4, pp. 185-193, 2001.

[4] S. Kobashi, Y. Hata, Y. Kitamura and T. Yanagida, "3D visualization of the structure of the cerebral blood vessels using fuzzy image processing," Soft Computing in Intelligent Systems and Information Processing, Proc. of 2000 Asian Fuzzy Systems Symposium, pp. 846-851, May 2000.

[5] 大島まり，"脳動脈瘤に関する医用画像からの血管形状モデリングと血流解析，" 日本エム・イー学会雑誌, vol. 16, no. 8, pp. 5-11, 2002.

[6] Y. Kawata, N. Niki, and T. Kumazaki, "Measurement of Blood Vessel Characteristics for Disease Detection Based on Cone-Beam CT Image," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 43, no. 6, pp. 3348-3354, 1996.

[7] 今村裕之，杉本直三，英保茂，浦山慎一，上野克也，井上寛治，"ステンドグラフト留置手術のための大動脈血管形状の計測と病変検出，" 電子情報通信学会論文誌, vol. J84-D-Ⅱ, no. 11, pp. 2468-2476, 2001.

[8] 河田佳樹，仁木登，隈崎達夫，"コーンビーム CT の 3 次元血管画像処理アルゴリズムについて，" 電子情報通信学会論文誌, vol. J79-D-Ⅱ, no. 6, pp. 1134-1145, Jun. 1996.

[9] J. Nappi and H. Yoshida, "Automated Detection of Polyps with CT Colonography: Evaluation of Volumetric Features for Reduction of False-Positive Finding," Academic Radiology, vol. 9, no. 4, pp. 386-397, 2002.

[問い合わせ先]
〒671-2201 兵庫県姫路市書写2167
姫路工業大学大学院工学研究科知能研究室 二宮 美佳
TEL:0792-67-4986　FAX:0792-67-4986
E-mail: ninomiya@comp.eng.himeji-tech.ac.jp

幾何学的拘束条件を必要としない動画像の領域分割

Region segmentation in image sequences without geometric constraints

川本一彦[1)]，井宮淳[2),3)]，ラインハルト・クリッタ[4)]，廣田薫[1)]
Kazuhiko Kawamoto[1)], Atsushi Imiya[2),3)], Reinhard Klette[4)], and Kaoru Hirota[1)]
[1)] 東京工業大学，[2)] 千葉大学，[3)] 国立情報学研究所，[4)] オークランド大学
[1)]Tokyo Institute of Technology, [2)]Chiba University, [3)]National Institute of Informatics, [4)]University of Auckland

Abstract: A motion-based segmentation method without geometric constratints is proposed by introducing two "confidence values" that evaluate ground-resembling motions in a sequence of images. Since the geometric computation such as depth estimation from optical flow is sensitive to measurement noise, the proposed method is more stable than the existing ones based on the geometric computation. Furthermore, the evaluation using the confidence values is suitable for real-time processing due to its simplicity, whereas the existing ones often require much computational time. An experiment with two real image sequences, in each of which static and moving objects appear, is made to evaluate the performance of the proposed method in terms of accuracy under varying thresholds using the receiver operating characteristic (ROC) curves. In the best case, the use of the integrated confidence gives 9% in the false positive fraction and 91% in the true positive fraction for the detection of the ground plane region.

1 はじめに

対象物体だけでなくカメラ自身も動き回るような動的環境での領域分割は，視覚誘導や人間・機械インタラクションなど高度な視覚情報処理のための初期処理として重要である．

従来，オプティカルフローから復元した形状と運動パラメータに基づく領域分割の手法 [1, 2, 3] が提案されているが，オプティカルフローからの 3 次元復元は誤差に敏感であるため実用的には難しいと考えられる．さらに，多くの手法では，静止環境を想定している．より安定した手法として，複数移動物体に対する因子分解法 [4] とその改良 [5, 6, 7, 8] が提案されているが，物体が同じ剛体運動をしているかどうかを基準としているため，地面に対して静止した物体を地面と分離することができない．さらに，これらの手法は，特徴点を対象としているので，画像の密な領域分割には向かない．

そこで，従来の「硬い」幾何学的な拘束条件を明示的に用いず，「地面らしさ」を表わす，より「柔らかい」基準を導入して，画像を地面領域とその他の領域に分割する手法を提案する．すなわち，3 次元復元や剛体運動の判定は行わない．その代わりに，あらかじめ撮影した地面だけのシーンから地面オプティカルフローのモデルを作成し，その地面モデルと観測値の差を評価する．さらに，観測したオプティカルフローの空間的な局所分布も考慮し，これら 2 つの評価を統合して領域分割を行う．

以下，第 2 節では，「地面らしさ」を評価する 2 つの確信度を導入し，それらに基づく領域分割について述べ，第 3 節では，実画像を使った実験結果を示す．

2 オプティカルフローに基づく領域分割

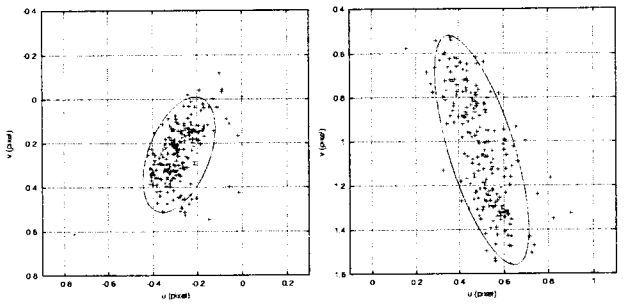
オプティカルフローに基づいて画像を地面とその他の領域に分割する手法を提案する．ただし，「地面」とは，ロボットが移動する平面を指し，カメラ座標系は地面に対して平行な等速直線運動していると仮定する．この仮定により地面が引き起こすオプティカルフローは，時間に対して一定になり，それを基準とした照合処理により観測オプティカルフローから地面領域と障害物領域を分割することができる．

しかし，実際の動画像では，さまざまな要因から誤差が加わり，地面オプティカルフローは一定とはならない．図 1 (a)-(b) は，画像中の地面に対応するある 2 つの画素に注目して，それらのオプティカルフローを 211 フレームにわたって（同じスケールで）プロットした結果である．この結果では，オプティカルフローに加わる誤差分布が，一様性等方性に従わず，各画素ごとに分散も相関も異なることが観察される．したがって，これらを考慮した基準が必要である．

そこで，あらかじめ撮影した動画像の各画素 $\boldsymbol{x}_i$, $i = 1, \ldots, m$ における，地面オプティカルフロー時系列データ $\boldsymbol{u}_i^{(g)}(t)$, $t = 1, \ldots, n$ の標本共分散行列

$$\boldsymbol{V}_i = \frac{1}{n-1}\sum_{t=1}^{n}(\boldsymbol{u}_i^{(g)}(t) - \overline{\boldsymbol{u}}_i^{(g)})(\boldsymbol{u}_i^{(g)}(t) - \overline{\boldsymbol{u}}_i^{(g)})^{\top},$$

$$\text{where} \qquad \overline{\boldsymbol{u}}_i^{(g)} = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\boldsymbol{u}_i^{(g)}(t), \tag{1}$$



(a) (b)

図 1　地面オプティカルフローの分布.

の逆行列を計量とするマハラノビス距離に基づいて,「地面らしさ」を表わす 2 つの確信度を導入し，それらを基準として地面領域を抽出する.

2.1　地面オプティカルフローモデルに基づく確信度

各画素における観測オプティカルフローを $\boldsymbol{u}_i, i = 1,\ldots,m$ とする．この $\boldsymbol{u}_i$ とあらかじめ計算してある地面オプティカルフローの「ずれ」を，$\boldsymbol{V}_i^{-1}$ を計量とするマハラノビス距離に基づく確信度

$$C_i^{(1)} = \exp\left(-\left((\boldsymbol{u}_i - \overline{\boldsymbol{u}}_i^{(g)}),\ \boldsymbol{V}_i^{-1}(\boldsymbol{u}_i - \overline{\boldsymbol{u}}_i^{(g)})\right)\right), \quad (2)$$

で評価する．ただし，$(\boldsymbol{a},\boldsymbol{b})$ は，ベクトル $\boldsymbol{a}$ と $\boldsymbol{b}$ の内積を表わし，$\overline{\boldsymbol{u}}_i^{(g)}$ は，式 (4) で定義された，地面オプティカルフローの時間に関する標本平均である．この評価によって，図 1(a)–(b) で例示しているような，各画素ごとに異なる地面オプティカルフロー分布を考慮した「ずれ」を設計することができる.

2.2　空間相関に基づく確信度

次に，観測オプティカルフロー $\boldsymbol{u}_i$ とその周辺画素で観測されるオプティカルフローとの「ずれ」を評価し，それに基づく確信度を導入する．この評価は，注目画素の周辺で観測される地面オプティカルフローは，ほぼ同じ分布にしたがって発生するという仮定に基づく.

実際の動画像で確認した例を，図 2 に示す．図 2 (a)–(b) は，隣接する 2 つの注目画素の地面オプティカルフローの時系列データを，式 (1) の標本共分散行列の 2 つの固有ベクトル方向にそれぞれ射影した結果である．これらの結果より，周辺にあるオプティカルフローは，各時刻でほぼ同じ値をとっていることが分かり，空間的に相関が高いことが確認される．一方，図 2 (c)–(d) は，障害物シーンに関して，同じ注目画素で調べた結果である．図 2 (c)–(d) より，80 フレームあたりから，お互いのオプティカルフローのずれが大きくなっていることが観察される．これは，注目画素に障害物が投影される時刻とほぼ一致しており，障害物領域では，地面領域に比べて，周辺にあるオプティカルフローの空間的な相関が低いことを示している.

以上の仮定に基づいて，注目画素のオプティカル

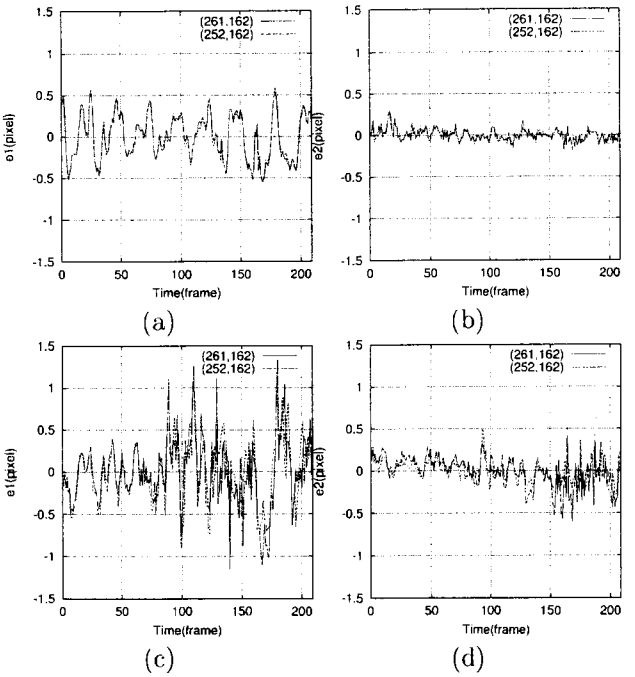


図 2　周辺画素のオプティカルフローの時系列分布.

フロー $\boldsymbol{u}_i$ とその 8 近傍 $\mathcal{N}(i)$[1]のオプティカルフロー $\boldsymbol{u}_j, j \in \mathcal{N}(i)$, の「ずれ」を確信度

$$C_i^{(2)} = \exp\left(-\frac{1}{8}\sum_{j=1}^{8}\left((\boldsymbol{u}_i - \boldsymbol{u}_j,\ \boldsymbol{V}_i^{-1}(\boldsymbol{u}_i - \boldsymbol{u}_j)\right)\right), \quad (3)$$

で評価し，この値が高いほど $\boldsymbol{u}_i$ は，地面領域に対応していると見なす．ここで，$\boldsymbol{V}_i^{-1}$ を計量とするマハラノビス距離を用いているのは，地面オプティカルフローが発生しやすい方向を考慮しているためと，式 (2) の「ずれ」の尺度と大きさを同じ程度にするためである.

2.3　2 つの確信度に基づく地面抽出

観測オプティカルフロー $\boldsymbol{u}_i$ の「地面らしさ」を評価する 2 つの確信度 $C_i^{(1)}, C_i^{(2)}$ を統合して，画像中の地面領域を抽出する．統合した 2 つの確信度

$$C_i = C_i^{(1)}C_i^{(2)} = \exp\left(-(d_i^{(1)} + d_i^{(2)})\right) \quad (4)$$

を用いて,

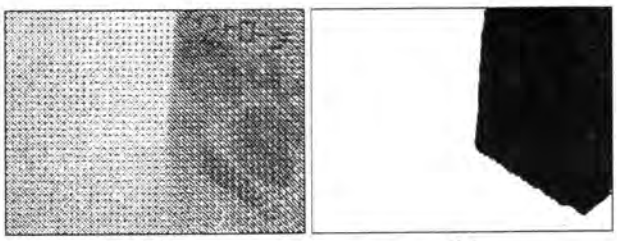
$$C_i > \exp\left(-\frac{k^2}{2}\right) \quad (5)$$

であれば，オプティカルフロー $\boldsymbol{u}_i$ に対応する画素 $\boldsymbol{x}_i$ を地面領域として抽出する.

2.4　中央値フィルタによる安定化

確信度に基づいて抽出した地面領域の結果をさらに改善するために，中央値フィルタリングによる後処理を導入する．これは，オプティカルフロー計算が，照

[1]実験では，オプティカルフローを 7 画素間隔で計算しているため，7 画素を 1 単位として考えた近傍である.



(a) (b)

図 3　静止物体シーンのオプティカルフロー例と正解領域.

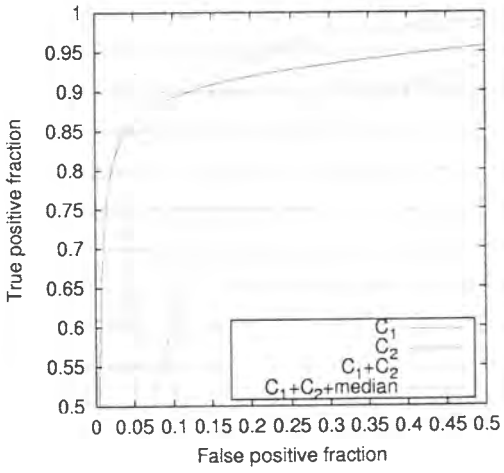


図 4　静止物体シーンの ROC 曲線.

明変化などに影響され，実際とは大きく異なる値を推定してしまった結果を緩和するために行う.

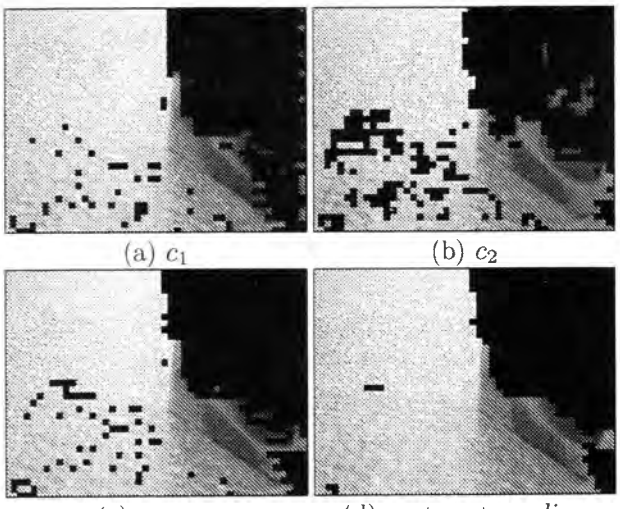
まず，地面と判定した画素の濃淡値を 0 に，それ以外の画素の濃淡値を 1 として 2 値化する．次に，この 2 値化した各画像に 3×3 の中央値フィルタを適用する．ただし，実験ではオプティカルフローを 7 画素間隔で求めているため，7 画素を 1 単位としたフィルタリングである．この後処理による結果の改善は，次節の実験結果で示す.

3　実画像における実験結果

提案手法を実験的に評価するために，静止物体シーンと移動物体シーンの 2 つのビデオ画像ついて実験を行った．これらのビデオ画像は，市販のディジタルカメラ（OLYMPUS 社 CAMEDIA C-2020 ZOOM）を用いて，QuickTime Motion JPEG 形式，320×240 画素，毎秒 15 フレームで撮影したものから切り出した 211 フレームを用いている．各画像のオプティカルフロー計算は 7 画素間隔で行い，オプティカルフロー計算を除いた確信度分布の計算は，Pentium 4（2.0GHz）搭載コンピュータで，1 フレームあたり 6.2 ミリ秒であった.

3.1　静止物体シーン動画像についての実験

図 3 (a)-(b) に，静止物体シーン動画像から計算したオプティカルフローの例と手動で領域分割した正解例



(a) c_1　(b) c_2　(c) $c_1 + c_2$　(d) $c_1 + c_2 + median$

図 5　地面領域抽出の実験結果.

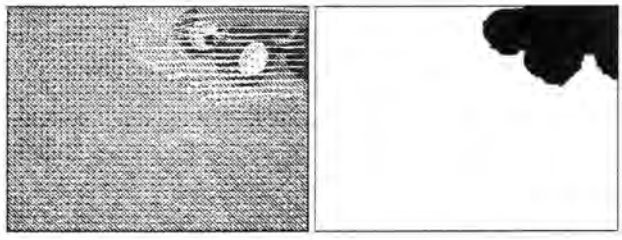
を示す．図 4 は，提案した 3 つの確信度 $C_i^{(1)}, C_i^{(2)}, C_i$ と中央値フィルタリングの性能を評価するための ROC 曲線である．ただし，横軸を地面領域を誤検出する割合，縦軸を障害物を正しく検出する割合として描いている．図中の ROC 曲線は，それぞれ，曲線 c_1 が確信度 $C_i^{(1)}$（第 2.1 節）だけを，曲線 c_2 が確信度 $C_i^{(2)}$（第 2.2 節）だけを，曲線 $c_1 + c_2$ が確信度 $C_i = C_i^{(1)} C_i^{(2)}$（第 2.3 節）を，基準として抽出した結果であり，そして曲線 $c_1 + c_2$+median が確信度 C_i で抽出した地面領域に中央値フィルタ（第 2.4 節）を施した結果である．図 5 は，これら 4 つの基準で抽出した地面領域（黒画素は障害物として判定された領域）の例である.

図 4 の ROC 曲線より，確信度 C_i による結果に中央値フィルタを適用した結果（$c_1 + c_2 + median$）が最もよい検出性能を持つことが確認される．また，確信度 $C_i^{(2)}$ が他に比べ劣っているが，静止環境ではオプティカルフローの空間的な局所分布はほぼ一様であることに起因すると考えられる．したがって，静止物体に対しては確信度 $C_i^{(2)}$ よりも確信度 $C_i^{(1)}$ を重視する戦略を取ることが合理的であることが予想される.

3.2　移動物体シーン動画像についての実験

次に，地面に対して移動している物体（車の模型）が現れるシーンについて実験を行った．図 6 (a)-(b) に，移動物体シーン動画像から計算したオプティカルフローの例と手動で領域分割した正解例を示す．この実験における車模型の運動は，右端から現われ，ほぼカメラ運動に直交しながら左端に消えていくように設定している．図 5 は，静止物体シーンと同じ 4 つの基準で抽出した地面領域（黒画素は障害物として判定された領域）の例である.

静止物体シーンと比べて特徴的な点は，図 7 の ROC 曲線で，確信度 $C_i^{(2)}$ の結果が検出性能が高いことであ



(a) (b)

図 6 移動物体シーンのオプティカルフロー例と ROC 曲線.

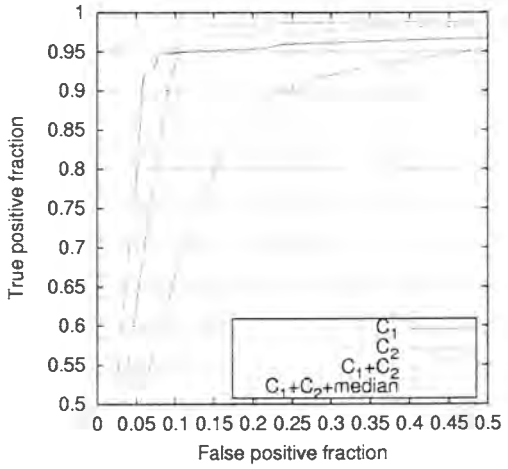


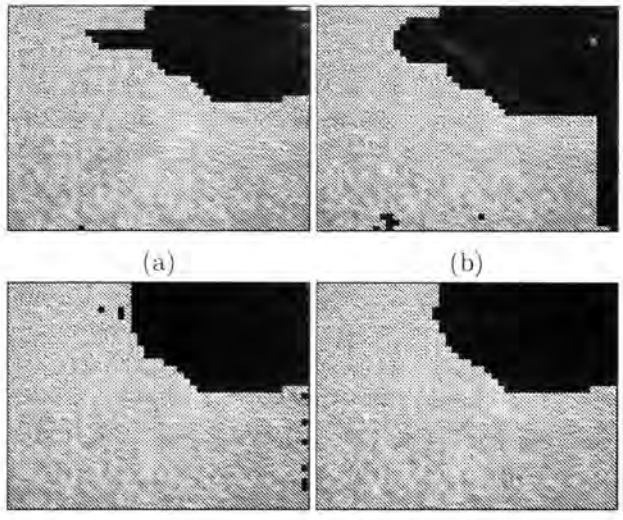
図 7 移動物体シーンの ROC 曲線.

る．これは，静止物体よりも移動物体のオプティカルフローのほうが，空間的な「ちらばり」が大きく，確信度 $C_i^{(2)}$ で評価する空間相関で検出しやすいためと思われる．したがって，静止物体と移動物体を検出する能力は，確信度 $C_i^{(1)}, C_i^{(2)}$ では異なることが予想され，それぞれの確信度に適切な重みを課して統合した確信度によって，より性能が向上すること期待できる．この問題は，今後の研究課題としたい．

4 まとめ

オプティカルフローに基づく画像の領域分割法を提案した．提案手法は，剛体 3 次元シーンが厳密にしたがう「硬い」幾何学的な拘束条件を利用した 3 次元復元や剛体運動の判定は行わない．その代わり，「地面らしさ」を表わす，より「柔らかい」2 つの確信度を導入して，これらを統合した評価に基づいて領域分割を行う．

静止物体もしくは移動物体が現れる 2 つの実動画像に対して行った実験で，2 つの確信度を統合することにより，それらを単独で使用するよりも，検出性能が高くなることが，ROC 曲線より確認された．この結果は，2 つの確信度は，「地面らしさ」に対して，それぞれ異なる評価を与えることを示しており，2 つの確信度を導入することの有効性を与えている．さらに，これらの結果に，中央値フィルタを適用するすることで，検出



(a) (b)

(c) (d)

図 8 地面領域抽出の実験結果.

性能が向上することも確認した．

提案手法は，1 フレームあたり 6.2 ミリ秒で処理ができ，ビデオフレームレートに対して，十分な余力を残している．したがって，より高度な視覚情報処理の初期処理として使うことができる．

参考文献

[1] D. H. Ballard and O. A. Kimball: Rigid Body Motion from Depth and Optical Flow, *Compt. Vision, Graphics, and Image Understand.*, Vol.22, pp.95–115 (1983).

[2] G. Adiv: Determining Three-Dimensional Motion and Structure from Optical Flow Generated by Several Moving Objects, *IEEE Trans. on Pat. Anal. Mach. Intell.*, Vol.7, No.4, pp.384–401 (1985).

[3] W. B. Thompson, P. Lechleider, and E. Stuck: Detecting Moving Objects Using the Rigidity Constraint, *IEEE Trans. on Pat. Anal. Mach. Intell.*, Vol.15, No.2, pp.162–166 (1993).

[4] J. P. Costeira and T. Kanade: A multibody factorization method for independently mving objects, *Int. J. Comput. Vision*, Vol.29, No.3, pp.159–179 (1998).

[5] 市村直幸, 富田文明: 形状行列からの特徴選択に基づく動きの分割, 電子情報通信学会論文論 (D-II), Vol.J82-D-II, No.12, pp.2757–2766 (1998).

[6] C. W. Gear: Multibody grouping from motion images, *Int. J. Comput. Vision*, Vol.29, No.2, pp.133–150 (1998).

[7] 黒澤典義, 金谷健一: 部分空間分離法とモデル選択による運動物体の分離, 情報処理学会研究報告, Vol.2000-CVIM-124, No.4, pp,25–32 (2000).

[8] 市村直幸: 形状空間への直交射影行列と判別基準を用いた複数運動の分割, 電子情報通信学会論文論 (D-II), Vol.J84-D-II, No.7, pp.1369–1377 (2001).

連絡先：

〒 226-8502

横浜市緑区長津田町 4259

東京工業大学 大学院総合理工学研究科

知能システム科学専攻

川本 一彦

電話：045-924-5682

FAX：045-924-5676

Email：kawa@hrt.dis.titech.ac.jp

ファジー推論を用いたディジタル画像の補間法

Digital image interpolation based on fuzzy rules

木村 誠聡
Tomoaki Kimura
日本アイビーエム株式会社
IBM Japan

田口 亮
Akira Taguchi
武蔵工業大学 工学部
Musashi Institute of Technology

Abstract A digital image enlarging method is especially important for a digital image processing. Generally, an image enlarging is realized by linear interpolation and cubic interpolation method. However, these methods can not produce high frequency components, which is lost by sampling.

In this paper, a novel scheme for edge/detail preserving image interpolation is introduced for enlarging the digital images, which is based on fuzzy rule. The proposed method reconstructs sharp edges and peaks accurately. Thus, the resolution of the enlarged digital image is increases by the proposed interpolation. Simulation results show the superior performance of the proposed approach, which respect to other linear interpolations techniques.

1. まえがき

ディジタル画像の処理の中でも拡大（解像度向上）処理は重要な処理の一つである.代表的な補間処理として，線形補間，３次畳込補間があるが，いずれの方法もサンプリング定理に基づいたsinc関数を基本とする方法である[1]．よって，画像を拡大する際に失われてしまった高周波数成分を補間時に復元することは困難であるため，それら表示画像にはボケが生じることになる．そこで高周波数成分を何らかの方法で保存することが望まれる．

画像信号にはステップエッジ信号や細部信号等の高周波数成分が含まれているが，ステップエッジ信号のような急激な変化成分を伴う不連続な信号をもつ画像に対しては従来の補間法ではその不連続性を保つことは不可能である．そこで文献[2]では補間すべき点の前後２点間の差分信号を用い，その差分信号の大小によって，不連続性を持つ信号部を見つけだし，ステップエッジと判断される信号の保存を行う補間値を与えることで，ステップ信号の不連続性を保存可能な補間処理を提案している．さらに筆者らは文献[3]でステップエッジ信号以外の画像中に存在する細部信号パターンの代表的な山型信号と谷型信号のピークを保存する補間法を提案している．しかしながら，文献[2]，[3]の方法共に拡大率は２倍に限定されているため，任意倍率が可能でステップエッジ信号と信号ピークの保存が可能な補間法が望まれる．

本稿では文献[3]の方法を拡張し，ステップエッジ信号とピーク信号の保存を成し遂げ，任意倍率拡大が可能な補間手法を提案する．提案する手法は原信号間の任意の位置に補間値を与える必要があり，2 つの差分情報の値の大きさと符号によりステップエッジ信号パターンを見つけだし，補間すべき位置により近い原信号を補間値として与えることで，不連続部分の保存を可能とする．さらに，2 つの差分情報から文献[3]と同様に山型，谷型信号を判定し，それぞれの信号のピークも保存する．エッジ信号，山型，谷型信号の判定はファジー推論を用いて行い，各々の形状パターンに適した補間値を与えることで，従来のsinc関数を基本とした従来法よりも優れた任意倍率拡大が可能な補間法を実現する．本稿では提案法と従来法の比較を数値評価，および，視覚評価により行い，提案法の有効性を明らかにする．

2. 高周波数成分を保存する画像の補間法

提案する方法のコンセプトは入力信号がどのような形状パターンに属するかを分類し，その分類に従った補間値を与えることであり，高周波数成分の保存が可能で，かつ，任意の実数倍率拡大を可能な補間法とする．具体的には１次元信号を対象に補間すべき点の前後の 2 点間の差分情報 a-b および c-d の絶対的な大きさと符号を用い，不連続なステップエッジ信号，滑らかな信号，および，山形，谷形のピーク信号等のパターンに分類する．

図 1(A) に示すような不連続の位置が異なる典型的なステップエッジ信号列に対して低域フィルタを施した信号列を図 1(B) に，ダウンサンプリング処理を施し解像度を低下させた信号列を図1(C) に示す．ここでは図1(C)の信号のｂ点とｃ点の間に補間を施すことを考え，与えるべき補間値を２つの場合に分ける．１つはｂ点に近い部分であり（図1 f_b），もう１つはｃ点に近い部分である（図1 f_c）．理想的な補間が行われれば，図1(A)が再現されることになるが,従来の線形フィルタに基づく補間(線形補間や３次畳込み補間）では図 1(D)に示すように，ｂ点の信号値とｃ点の信号値を直線で結んだ線上で補間値が決定され，補間によりエッジはボケたようになる．

提案法ではa-b，c-dのどちらも同じ符号で，かつ，その値が小さいとき，不連続なエッジ信号である可能性が強いと考え,与えるべき補間値を次式のように算出する．

$$\begin{aligned} &if\ (a-b)\ and\ (c-d)\ are \\ &\quad (positive\ small\ or\ negative\ small) \\ &\quad then\ f_b = b\ and\ f_c = c \end{aligned} \tag{1}$$

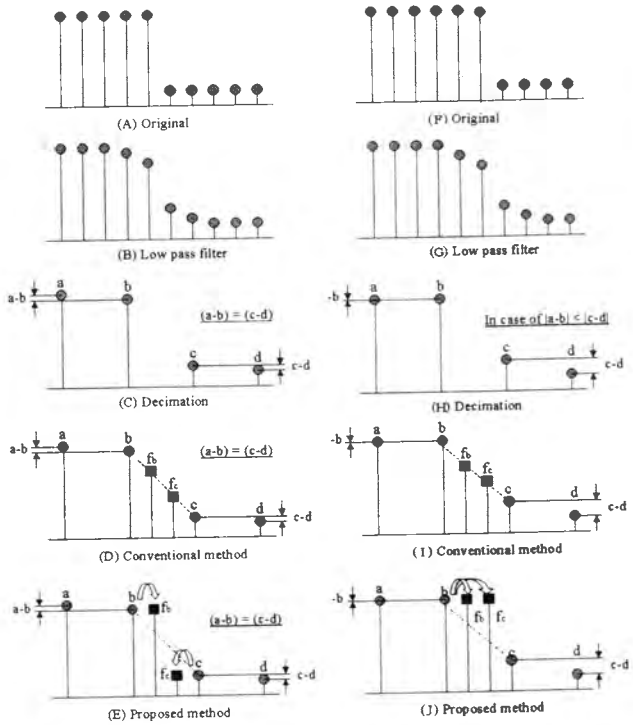


図 1 提案するエッジ補間例

また，ステップエッジ信号は図 1(H)に示すような信号列の場合も考えられる．一方の絶対値が大きく，他方の絶対値が小さい場合であり，ステップエッジ信号である可能性が強いと考え，与えるべき補間値を次式のように算出する．

$$\begin{aligned} &if\ |a-b| \gg |c-d|\ then\ f_b = f_c = c \\ &if\ |a-b| \ll |c-d|\ then\ f_b = f_c = b \end{aligned} \tag{2}$$

よって，式(1)および式(2)では与えるべき補間値を原信号である b 点および c 点の値を f_b および f_c の補間値とすることで，図 1(E)および図 1(J)に示すようにエッジ信号を保存した補間を成し遂げることができる．

図 2(A)に示すような山型の頂点を持つ信号列は，理想的な補間が行われれば図 2(A)が再現されるが，従来の線形補間では図 2(C)に示すように，その補間値は $(b+c)/2$ が与えられることになり，山型の頂点は再現しない．提案法では a-b の符号が負であり，c-d の符号が正の場合，与えるべき補間値を次式のように算出する．

$$\begin{aligned} &if\ (a-b)\ is\ negative\ and\ (c-d)\ is\ positive \\ &\quad and\ |a-b| \approx |c-d| \\ &\quad then\ \frac{b+c}{2} + \lambda \end{aligned} \tag{3}$$

これによって，図 2(D)に示す山型の頂点を保存する補間値を与えることができる．同様に図 3(A)に示すような谷型の頂点を持つ信号列の場合は，a-b の符号が正であり，c-d の符号が負となり，この場合は $(b+c)/2$ よりも負の方向に λ だけずらせばよい（図 3(C)）．ここで λ は以下のように与えられる．

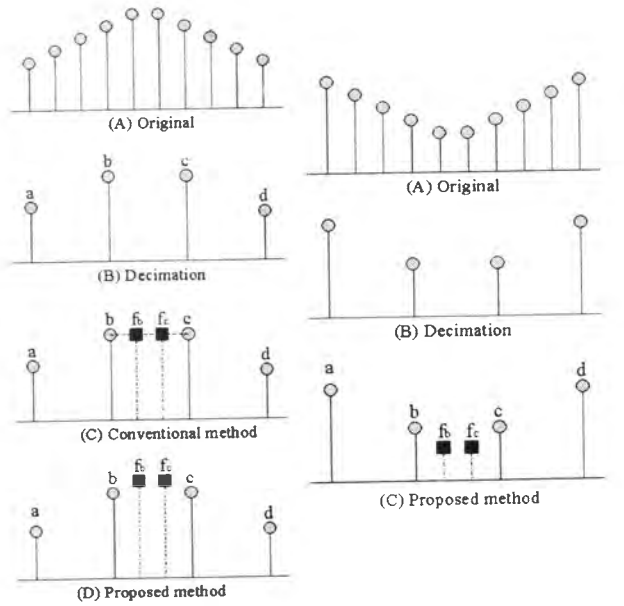


図 2 山型信号補間例間例　　図 3 谷型信号補間例

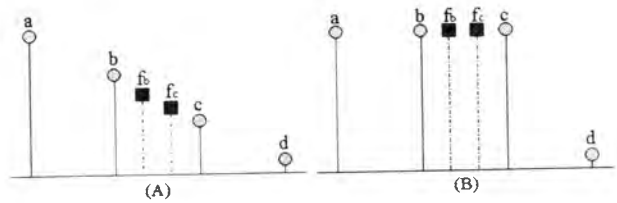


図 4 エッジやピーク信号を持たない信号の補間例

$$\lambda = \begin{cases} \frac{|a-b|}{2} & if |a-b| \le |c-d| \\ \frac{|c-d|}{2} & otherwise \end{cases} \tag{4}$$

図 4 に示すステップエッジや頂点を持たない信号列に対しては，線形的な補間値を与える．例えば，図 4(A) は a-b および c-d の差分値が大きく，かつ，同じ符号である場合であり，図 4(B)および(C)は符号に関係なく a-b または c-d のどちらかの差分値が大きく，他方が小さい場合である．

このようにステップエッジ信号や細部信号に対して与えるべき補間値を考慮することで任意の実数倍拡大における不連続なエッジ信号の保存，および，山型，谷型信号の頂点を保存できる補間法が可能となる．

3. ファジー推論を用いた任意倍率拡大可能な画像の補間法

3.1. ファジー推論によるステップエッジ，細部信号を考慮した補間

文献[3]の方法の任意倍率拡大法への拡張を図るため，その基本コンセプトを **2** で明らかにした．ここではそのコンセプトをファジー推論の型で表現し，具体的な補間点の算出方法を明らかにする．

提案法では前件部に差分情報を，後件部には各々の分類に応じた補間値を与えるファジールールを構成する．具体的には式(5)に示すファジールールを与え，**2** で示し

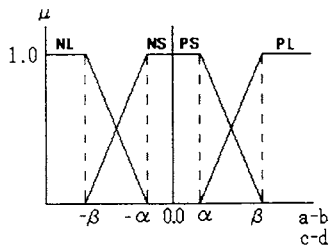


図5 提案法のファジー集合

たコンセプトは表1のルールテーブルに集約される.

$$if\ (a-b)\ is\ A_p\ and\ (c-d)\ is\ B_q$$
$$then\ f\ is\ w_r \tag{5}$$
$$(p=1,\ldots,P,\ \ q=1,\ldots,Q,\ \ r=1,\ldots,p\cdot q)$$

f は非ファジー手続きにより以下のように算出される.

$$f=\frac{\sum_{r=1}^{P\cdot Q}\mu_r\cdot w_r}{\sum_{r=1}^{P\cdot Q}\mu_r} \tag{6}$$

$$\mu_r=min(\mu_{A_p}(a-b),\mu_{B_q}(c-d)) \tag{7}$$

ここで, 式(7)の μ_{A_p}(a-b), μ_{B_q}(a-b) はファジー集合 A_p, B_q に対するメンバーシップ関数であり, 各情報 a-b, c-d に対するファジー集合を図6のように設定する. 局所情報 a-b, c-d の差分値の大きさと符号を考慮し, 4つのファジー集合 NL(Negative Large), NS(Negative Small), PS(Positive Small), PL(Positive Large) を設定する. これらのファジー集合は 2 つのパラメータ α および β のみで定義される.

3.2. ファジールールの最適化

提案するファジー推論に基づく補間法における 4 つのファジー集合 PS, NS, PL, NL のチューニングを行う. ファジー集合のチューニングは α と β の 2 つのパラメータのみで行われる. 提案する方法は1次元アルゴリズムであるが, 画像信号への適用を前提にしていることから, それらの値の適正化は画像 Lena(256×256 pixels, 8bit)を用いて行う. 具体的には, まず画像 Lena に水平方向次数 5 のガウシアンフィルタ処理を施す. 出力画像を行展開し, 1 次元信号化し, ダウンサンプリングすることで解像度 (サイズ) を 1/2.5 と 1/3.5 に低下させたテスト信号を得る. その解像度を低下させたテスト信号から逆に元の解像度の信号を得るための補間処理を通じて提案法におけるメンバーシップ関数のパラメータ α と β のチューニングを行う.

α, β を種々変化させ, 提案法により補間を行った結果を平均二乗誤差 (MSE)で評価した. その結果から, 1/2.5 倍では α=0～40, β=50～100 のパラメータ範囲で MSE が 700 程度で最低となり, 1/3.5 倍では α=0～20, β=40～100 のパラメータの範囲で MSE が 560 程度で最低となった. 2 つの 1 次元化データを用いたチューニング結果から提案法におけるファジー集合を定義するパラメータ α, β は, 処理対象信号の倍率にそれほど依存せず, α=0, β=70 程度に定めれば良いことになる.

表1 提案法のファジールール

$a-b$		$c-d$			
		Small		*Large*	
		+ (*PS*)	- (*NS*)	+ (*PL*)	- (*NL*)
Small	+ (*PS*)	(1)	$\frac{b+c}{2}-\lambda$	*b*	
	- (*NS*)	$\frac{b+c}{2}+\lambda$	(1)		
Large	+ (*PL*)	*c*		$\frac{b+c}{2}$	$\frac{b+c}{2}-\lambda$
	- (*NL*)			$\frac{b+c}{2}+\lambda$	$\frac{b+c}{2}$

* if f is near '*b*' or '*c*' then (1) is '*b*' or '*c*' else (1) is $\frac{b+c}{2}$

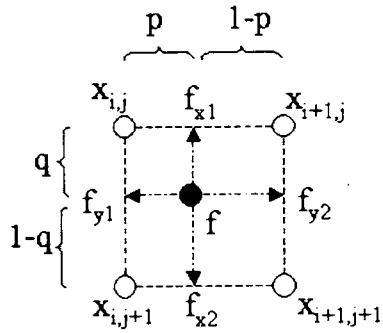


図6 提案する補間法の画像信号への適用

3.3. 1 次元信号補間法の画像への適用法

2 で説明した方法は 1 次元信号を対象にした補間法であり, この補間法を用いて画像に対する補間を与える. その手法は図6で示すように格子点に囲まれた部分の点の補間に対するものである. 格子点 *x(i,j), x(i+1,j), x(i,j+1), x(i+1,j+1)* の 4 つの点に囲まれた点 *x(i+k,j+l)* の補間は,

$$f_x=(1-q)\cdot((1-p)\cdot x_{i,j}+p\cdot x_{i+1,j}) +q\cdot(1-p)\cdot x_{i,j+1}+p\cdot x_{i+1,j+1})) \tag{8}$$

$$f_y=(1-q)\cdot((1-p)\cdot x_{i,j}+p\cdot x_{i,j+1}) +q\cdot(1-p)\cdot x_{i+1,j}+p\cdot x_{i+1,j+1})) \tag{9}$$

$$f=\frac{(f_x+f_y)}{2} \tag{10}$$

つまり, 水平, 垂直のそれぞれの方向に独立に f_x, f_y を求め, その平均値を格子点に囲まれた部分の補間値とする.

4. 適用例

提案法の有効性を実際の適用例から明らかにする. 比較対象に用いる補間法は3次畳込補間[1]である.

ここでは数値評価を行うために適用例として与えられた画像からガウシアンフィルタ処理とダウンサンプリングを行うことによりサイズを小さくした画像へ各補間手法を適用する. さらに, 原画像にそれぞれの補間手法を適用し未知の拡大画像を作成し, それを用いて視覚評価を行う.

4.1. 縮小画像からの拡大による性能評価

画像 Lena (256×256 pixels, 8bits)に対して，水平，垂直方向ともに 1/1.2 から 1/16 に解像度を低下させた画像を作成する(5×5 窓ガウシアンフィルタとダウンサンプリング). サイズを小さくした画像に対しそれぞれ提案法と比較対象手法を適用し，元のサイズに戻した画像と原画像との MSE を求め，さらに提案法と 3 次畳込補間法との比(MESR)を次式のように求める.

$$MSER = \frac{MSE\ of\ the\ proposed\ method}{MES\ of\ the\ cubic\ convolution} \quad (11)$$

MSER が 1.0 未満の場合，提案法が 3 次畳込補間法と比べて優れていることを示しており，1 を超える場合には 3 次畳込補間法より劣っていることを示している.

図 7 は 1.2 から 16 倍までの MSER の結果を示しており，提案法が 2 倍以上の拡大率において 3 次畳込補間より優れた結果を示しているのがわかる．特に 3〜11 倍の範囲は安定して良好な結果が得られている.

4.2. 任意倍率拡大時の視覚評価

視覚評価のために原画像を各補間法によって 4.5 倍に拡大させた画像を図 8 に示す．図 8 から 3 次畳込補間法では背景と人物の境界部分にアーティファクトの影響が見られるが，提案法ではその影響がない．この特徴を明確化するために水平方向の断面図の一部（垂直 94Line，水平 126〜156 Line）を図 9 に示す．図 9 から提案法が 3 次畳込補間法に比べエッジ信号を保存し，かつ，アーティファクトの影響がないことがわかる．図 9 にみられるアーティファクトの原因はギブス現象であると考えられる．提案法は補間前後の 4 個の信号を用いているが，補間点の算出には補間点前後の 2 点しか用いておらず 1 次元信号において補間点の前後 3 点，計 6 点を用いる 3 次畳込補間に比べ任意拡大時に優れたエッジの保存を導き出していることは明らかである.

5. むすび

本稿では入力信号の形状パラメータをファジー推論によって分類し，分類に従った補間値を与えることで，高周波数成分信号を保存する任意倍率可能な補間手法を提案した．提案する手法は従来の補間法と比較して 2 倍を超える任意の拡大率に対して優れた性能を示し，拡大率を上げても鮮明な補間画像が得られることを確認した.

文　献

[1] 高木幹雄，下田陽久 監修，“画像解析ハンドブック，”pp.441-444，東京大学出版会，1991

[2] S.Carrato，G.Ramponi，S.Marsi，“A Simple Edge-Sensitive Image Interpolation Filter,” International Conf. on Image Processing，pp.711-714，1996，Sep，IEEE

[3] 木村誠聡，田口 亮，村田 裕，“ファジールールに基づく信号細部変化を保存する補間手法，”電子情報通信学会論文誌(A)，J83-A，9，pp.1099-1108，Sep.2000

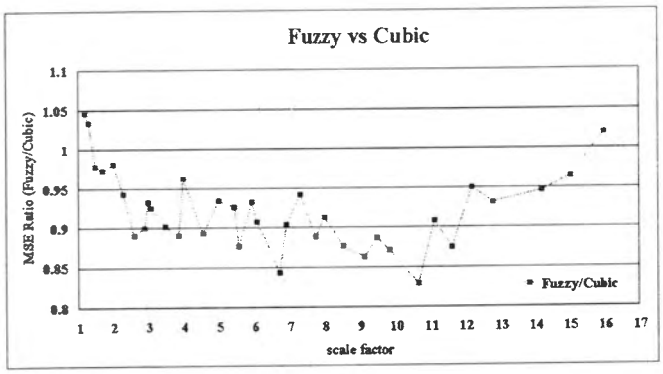


図 7　3 次畳込補間法と提案法との比 (MSER)

(a)　3 次畳込補

(b)　提 案

図 8 拡大画像（4.5 倍，Cameraman）

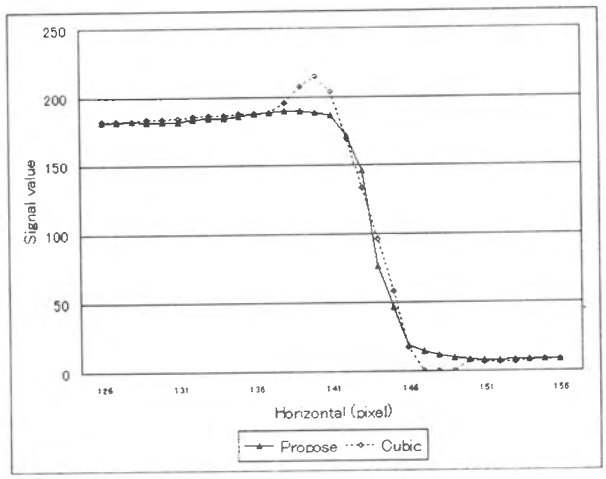


図 9 各補間法のエッジ部の断面図

低照度下撮影カラー画像における肌領域探索
Detecting human skin region in color images taken under low illumination

畠山 豊, 廣田 薫
Yutaka HATAKEYAMA, Kaoru HIROTA

東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻
Department of Computational Intelligence and Systems Science
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology

Abstract An algorithm for detecting human skin region in color images taken under low illumination is proposed that is constructed with color change vectors in [1]. Proposed algorithm extracts target regions with color information. Skin regions are calculated with weighted color that is defined by color change vectors recursively calculated. Experimental results show that skin regions detected with the proposed algorithm increase by 30% than the regions of skin color. The algorithm will be used as a basis for surveillance camera system.

1. はじめに

カラー画像の色彩情報を用い、画像中における顔領域の認識を行うアルゴリズム[2],[3]が提案されている。しかし、理想的な撮影環境で得られた画像のみを対象としており、劣悪な環境下で撮影された画像に適用しようとすると認識精度が必ずしも十分ではない。

監視用などの目的で撮影された低照度下撮影画像を対象とし適切な色補正を行うことを目的として、低照度下及び標準照度下での色彩情報を対にした事例を用意し、事例の色彩情報を基にした復元ベクトルを用いて、画素毎に色彩情報を復元するアルゴリズム[1]が提案されている。このアルゴリズムにより監視用として十分な画質（色差）の復元画像が得られることが示されている。そこで本研究では、このアルゴリズムを利用した、低照度下撮影カラー画像における肌領域を抽出するアルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムは復元ベクトルを再帰的に計算し、肌の色に復元される色彩情報（L*a*b*空間）を推定する。この色彩情報に基づき肌領域を探索する。また、提案アルゴリズムに基づく低照度下撮影カラー静止画像中の肌領域探索実験を行い、復元アルゴリズム[1]によって復元された画像に対し探索を行った結果と比較を行い、提案アルゴリズムの有効性を示す。

2．では提案する肌領域探索アルゴリズムについて述べ、3．では探索実験結果を示し考察を行う。

2． 肌領域探索アルゴリズム

本研究では、色彩情報復元アルゴリズム[1]の復元ベクトルを用い、肌の色を推定する。本研究で用いる色彩情報は、復元アルゴリズムで用いているL*a*b*表色系で表現する。

2.1 色彩情報復元ベクトル

低照度下と標準照度下の色彩情報を対にした事例に基づき作成された復元ベクトルを本研究で用いる。

入力及び出力の色彩情報（CI）を

$$CI_{in}, CI_{out} = \{L^*, a^*b^*\} \quad (1)$$

とする。復元ベクトルを

$$CCV(CI_{in}) = CI_{out} \quad (2)$$

とする。Fig.1は復元ベクトルを示している。

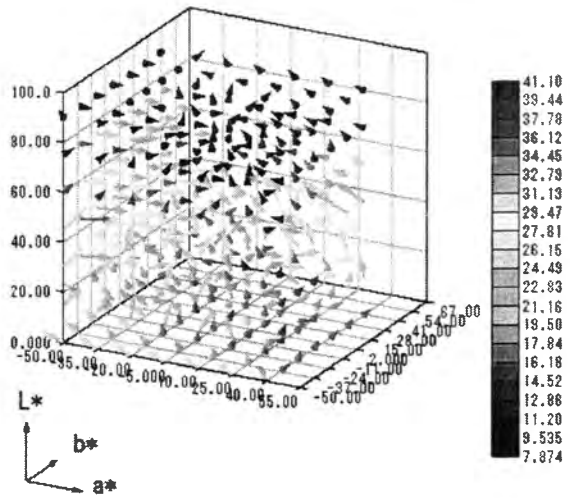


Fig.1　色彩情報復元ベクトル

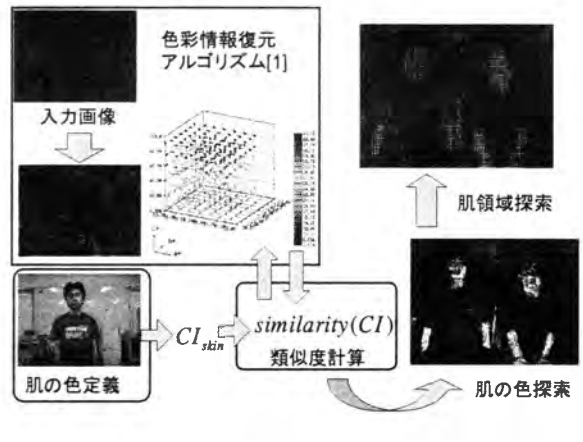


Fig.2 肌領域探索アルゴリズム

2.2　肌領域探索

復元ベクトル及び、復元画像を用いた肌領域探索の概略を Fig.2 に示す。画素毎に肌領域の色（$\mathbf{CI}_{cal_skin}$）であるかの判定を行う。以下に具体的な処理を示す。

あらかじめ標準照度下で撮影された画像を用い、標準照度下における肌の色($\mathbf{CI}_{skin}$)の定義を行い、復元ベクトルを計算する。（本実験では、$\mathbf{CI}_{skin}$ を

$$\mathbf{CI}_{skin}=\{CI_{skin}\mid 60\le L^*\le 80, 10\le a^*\le 40, \quad 10\le b^*\le 40\} \qquad (3)$$

と定義する。）入力画像を復元アルゴリズム[1]を用い復元する。

本研究において肌の色は、上述の $\mathbf{CI}_{skin}$ だけでなく $\mathbf{CI}_{skin}$ に復元される色彩情報及び、その近傍色彩情報を加えて定義する。肌の色を推定する際に、それぞれの色彩情報の肌の色に対する類似度計算を行う。

復元ベクトルを再帰的に計算し、$\mathbf{CI}_{skin}$ に復元される色彩情報及び、その近傍の色彩情報の肌の色に対する類似度を式(5),(6)で与える。また、近傍の色彩情報（**NCI**）を

$$\mathbf{NCI}(CI)=\{NCI\mid a^*_{NCI}-a^*_{CI}\le 5, \quad b^*_{NCI}-b^*_{CI}\le 5, \quad a^*_{NCI}, b^*_{NCI}>0\} \qquad (4)$$

と定義する。

肌の色の類似度（*similarity*）を以下に定義する。$\mathbf{CI}_{skin}$ の類似度を 1 とする。

$$similarity(CI_{skin})=1 \ (CI_{skin}\in \mathbf{CI}_{skin}) \qquad (5)$$

対象の色彩情報（CI）に対し、復元ベクトルによって復元される色彩情報（$CCV(CI)$）または近傍の色彩情報（**NCI**）が、$\mathbf{CI}_{skin}$ 及び「$\mathbf{CI}_{skin}$ に復元される色」（*similarity*>0）の場合、CI を「$\mathbf{CI}_{skin}$ に復元される色」とする。この処理を再帰的に行い、肌の色を推定する。

N（$1\le N\le 9$）回目の処理における対象の色彩情報（CI）の類似度を、

$$similarity(CI)=\{1-N/10 \mid similarity(CCV(CI))>0 \text{ or } similarity(NCI)>0, NCI\in \mathbf{NCI}(CI)\} \qquad (6)$$

とする。

復元画像に対し画素毎に肌領域の色であるかの判定を行う。対象の類似度（$similarity(CI)$）が、あらかじめ用意された閾値を超えている場合に肌領域の色

（$\mathbf{CI}_{cal_skin}$）と判定する。

$$CI \in \mathbf{CI}_{cal_skin}$$

$$(similarity(CI) > threshold_{pixel}) \quad (7)$$

（3．での実験では$threshold_{pixel} = 0.4$としている。）

画素毎の探索を行った後、10×10 の領域毎に対し肌領域の色（$\mathbf{CI}_{cal_skin}$）が含まれている割合を計算し、閾値（$threshold_{region}$）以下の場合 $\mathbf{CI}_{cal_skin}$ から除く。（3．での実験では$threshold_{region} = 0.3$としている。）

3. 肌領域探索実験

2．で提案した探索アルゴリズムを低照度下で撮影した静止カラー画像に適用し、評価実験を行う。その際、以下の撮影条件を仮定している。

1．　屋内で撮影
2．　均一照明下で撮影
3．　被写体は一人の人物

これらの仮定は復元アルゴリズム[1]から設定されている。以下に探索結果を示す。

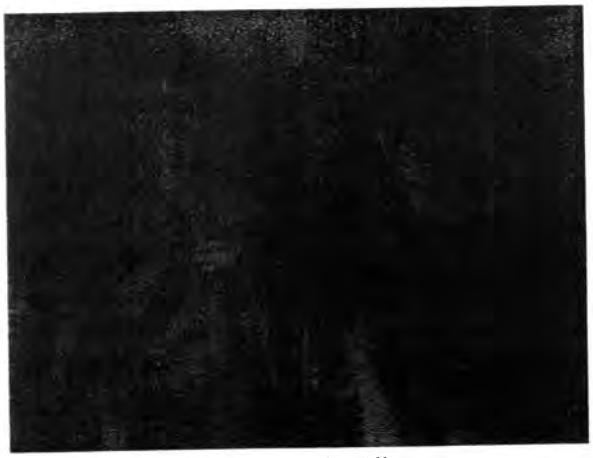


Fig.3　入力画像

Fig.4　復元画像

Fig.5　画素毎に探索した画像

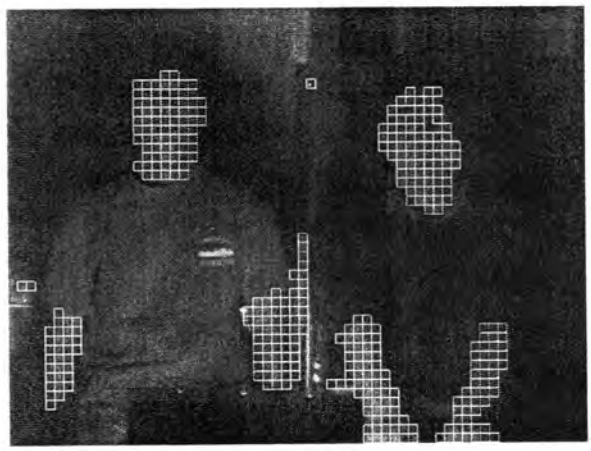


Fig.6　肌領域探索を行った画像
（提案アルゴリズム）

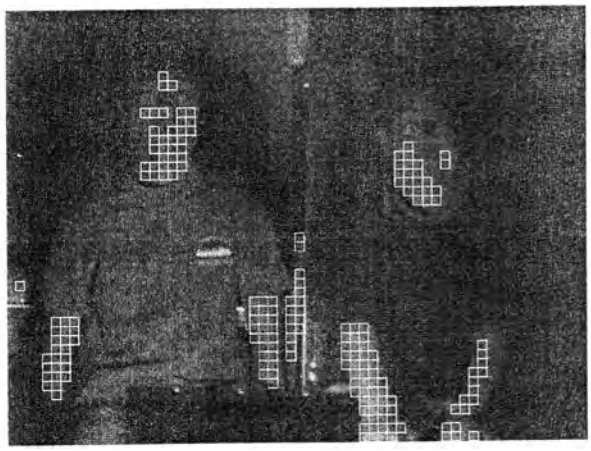


Fig.7　肌領域探索を行った画像

（$\mathbf{CI}_{skin} = \mathbf{CI}_{cal_skin}$ の場合）

Fig.3 は入力画像（低照度下撮影）であり、Fig.4 は復元アルゴリズム[1]で復元した画像である。提案アルゴリズムで画素毎の探索まで行った画像が Fig.5 であり、最終的な探索結果が Fig.6 となる。Fig.7 は、$\mathbf{CI}_{skin} = \mathbf{CI}_{cal_skin}$ の場合における探索結果となっている。Fig.5 において $\mathbf{CI}_{cal_skin}$ と判定された画素は、白く塗りつぶされている。Fig.6 及び Fig.7 において白い正方形（10×10）で囲まれている領域が、肌領域と判定された領域である。

Fig.6 と Fig.7 を比較した場合、正しい肌の領域が増えていることがわかる。他の画像に対し肌領域探索を行い、提案アルゴリズムが $\mathbf{CI}_{skin} = \mathbf{CI}_{cal_skin}$ の場合における探索結果との比較において、肌と判定された領域（10×10 の領域個数）について 30%程度の精度向上を確認した。

Fig.6 及び Fig.7 において、誤認識されているが存在している。これは、提案アルゴリズムが色彩情報のみで判定を行っているため、肌の色と同じ物体も肌領域と判定されてしまっていると考える。また、実際に肌領域であっても色彩情報が完全に欠落してしまっている状態では、肌と判定されない結果となっている。

本研究では、画素毎の判定及び領域の判定の際に一意に定義した閾値で判定を行ったが、各画素の肌の色に対する類似度を考慮した判定を行うことで探索精度の向上が期待できる。

4．おわりに

復元ベクトルを再帰的に計算することで肌の色を推定し、低照度下撮影カラー静止画像に対する肌領域探索を行うアルゴリズムを提案した。また、肌領域探索実験を行い、探索精度の向上（30%程度）を確認した。

肌の色に対する類似度を考慮した領域判定が今後の課題である。本アルゴリズムにより、侵入者の同定や異常の発見を目的とする、防犯・警備などセキュリティシステムの構築が期待できる。

参考文献

[1] Y. HATAKEYAMA, K. HIROTA , "Color Restoration Algorithm in Low Luminance Conditions with Color Change Vectors", Joint 1st International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (CD-ROM proceeding 22P4-5) (2002)Oct (Tsukuba)

[2] J. Cai, A. Goshtasby "Detecting human faces in color images", Image and Vision Computing 18 (1999) 63–75

[3] Hongxun Yao, Wen Gao "Face detection and location based on skin chrominance and lip chrominance transformation from color images", Pattern Recognition 34 (2001) 1555-1564

【連絡先】

〒226—8502

神奈川県横浜市緑区長津田町4259

東京工業大学 大学院総合理工学研究科

知能システム科学専攻 廣田研究室

畠山 豊

TEL:045-924-5682

FAX:045-924-5676

E-mail:hatake@hrt.dis.titech.ac.jp

線形外挿のファジィ推論に基づく画像拡大手法

An Image Enlargement Based on Linear Extrapolation Employing Fuzzy Inference

○麻生 隆史 † 末竹 規哲 †† 山川 烈 †††

Takashi Aso Noriaki Suetake Takeshi Yamakawa

† 九州工業大学大学院 情報工学研究科

Graduate School of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

†† 山口大学 理学部

Faculty of Science, Yamaguchi University

††† 九州工業大学大学院 生命体工学研究科

Graduate School of Life Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract: We propose a new image enlargement method which is based on linear extrapolation employing fuzzy inference in order to realize simultaneous smoothing and sharpening in image enlargement. In the proposed method, the estimated value of unknown pixel values in the image are obtaind by fuzzy inference employing linear extraplation of the neigboring two pixeles. And the fuzzy inference is simplified by using absolute value of pixel information. Experimental results show the performances of the proposed method are superior to other typical image enlargement methods. The calculation time is reduced drastically in comparison with other methods which realize the enlargement accuracy same to the proposed method.

1 はじめに

画像の拡大は，ディジタル画像処理において一般的な処理の一つであり，画素間に画素を補間し，画素数を増やすことで実現される．多くの画像処理ソフトウェアでは，代表的な画像拡大手法として最近隣内挿法（NNI），共一次内挿法（BLI），3次畳み込み内挿法（CCI）[1]が利用されている．しかしながら，これらの方法は処理が単純であるという特長をもつが，エッジの鮮明さを保持しながら滑らかに画像を拡大するという点において問題があった．そこで筆者らは，エッジの鮮明さと画像の滑らかさの両方を同時に実現する拡大手法として，コードブックに基づく画像拡大手法（CB）[2], [3]を提案し，良好な拡大結果を得ている．しかし，この手法では，多数のコードを事前に作成する必要があるので処理に時間がかかるということと，コードブックを作成するために用いた画像と類似した画像にしか適用できないという問題点があった．

一方で，Carratoらはステップエッジ状の不連続性を保存する補間手法[4]を，また木村らはファジィ推論を応用してcarratoらの手法をより発展させた手法[5]を提案している．特に，後者の手法では，ステップ状のエッジ部のみならず，信号の細部変化をも保存する高精度な画像拡大が実現されている．

本研究では，高詳細な拡大画像をより高速に得るために，線形外挿のファジィ推論に基づく画像拡大手法を提案する．提案手法では，まず，補間したい画素の周辺にある既知画素から補間画素に対する線形外挿値を求める．その後，得られた複数の外挿値を利用したファジィ推論によって補間したい画素の値を決定する．本論文では，提案手法と他の手法との比較実験を行い，提案手法の画像拡大の精度，並びに計算速度を検証する．

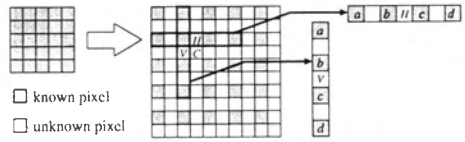


図 1: ディジタル画像の拡大と水平方向，垂直方向の拡大

2 線形外挿のファジィ推論に基づく補間

2.1 画像の拡大

画像の拡大は，未知の画素値を周辺の既知の画素値から決定することである．画像を拡大するにあたり，図1に示すように，推定すべき画素を水平方向の画素H，垂直方向の画素V，クロス方向の画素Cの3種類に分けて考えることができる．本研究では，水平，垂直方向に関しては，それぞれ画像信号を1次元信号とみなして，既知の画素 (a, b, c, d) からH, Vの補間を行う．また，クロス方向に関しては，水平方向，垂直方向の補間後に，それらの補間結果をもとに別途行う．

2.2 水平方向，垂直方向の補間

水平方向，垂直方向に関しては，入力変数を $|a-b|$, $|c-d|$ の2つとした簡略型ファジィ推論を用いて未知の

表 1: 水平・垂直方向のファジィテーブル.

$\lvert a-b\rvert$ \ $\lvert c-d\rvert$	*small*	*large*
small	$\frac{E_{a,b}+E_{c,d}}{2}$	$E_{a,b}$
large	$E_{c,d}$	$\frac{E_{a,b}+E_{c,d}}{2}$

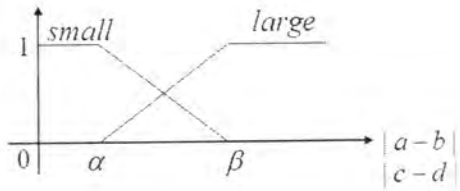


図 2: 水平・垂直方向の前件部メンバーシップ関数.

画素値を決定する．ここでは，木村らの手法と同様に信号の細部変化 (山型，谷型の形状)，及びエッジ部を保存することを目的にファジィルールを決定した．ここで用いたファジィルールテーブルを表 1 に，前件部メンバーシップ関数を図 2 にそれぞれ示す．α，β はそれぞれメンバーシップ関数'*small*' および'*large*' の範囲を決定するパラメータである．このとき，H および V は，

$$\begin{aligned} H,V = \; & \mu_S(|a-b|)\cdot\mu_S(|c-d|)\cdot\tfrac{E_{a,b}+E_{c,d}}{2} \\ & +\mu_S(|a-b|)\cdot\mu_L(|c-d|)\cdot E_{a,b} \\ & +\mu_L(|a-b|)\cdot\mu_S(|c-d|)\cdot E_{c,d} \\ & +\mu_L(|a-b|)\cdot\mu_L(|c-d|)\cdot\tfrac{E_{a,b}+E_{c,d}}{2} \end{aligned} \tag{1}$$

で示されるファジィ推論によって求める．μ_S，μ_L はそれぞれメンバーシップ関数 '*small*'，'*large*' の適合度を表す．$E_{a,b}$，$E_{c,d}$ は，それぞれ画素 a，b，画素 c，d による線形外挿結果であり，次式で表される．

$$E_{a,b} = \frac{3b-a}{2} \tag{2}$$

$$E_{c,d} = \frac{3c-d}{2} \tag{3}$$

図 3 に典型的な場合を例にとり，提案手法における補間の様子を示す．2 つの入力変数がともに大きい (図 3(a))，またはともに小さい場合は，a，b 及び c，d からの外挿結果の平均値を補間値とし，一方の入力変数が大きく，他方が小さい場合 (図 3(b)) には，小さい方に関する外挿結果が補間値となる．これらのことより，画像信号の細部変化（谷型や山形の形状）やエッジ部分を保存した画像の補間が行われることがわかる．

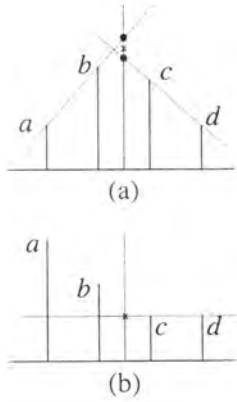


図 3: 線形外挿を利用した補間.

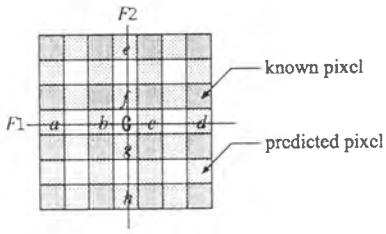


図 4: クロス方向の補間.

2.3 クロス方向の補間

クロス方向の補間に関しては，水平方向，垂直方向の補間によって決定された画素値を用いて行う．具体的には，図 4 に示すように，F_1 方向と，F_2 方向に関して，上述の水平，垂直方向の補間法を用いて補間値の候補 f_h，f_v を求める．その後，補間すべき画素 C の近隣画素の絶対差 $|f-g|$，$|b-c|$ の 2 つを入力とした簡略型ファジィ推論を用いて補間値を決定する．ここでは，信号の連続性を考慮し，近隣画素の傾き (絶対差) が小さい方から求められた補間の候補値を優先することとしてファジィルールを決定した．その際に用いたファジィルールテーブルおよび，前件部メンバーシップ関数をそれぞれ表 2，図 5 に示す．γ，ϵ はそれぞれメンバーシップ関数'*small*' および'*large*' の範囲を決定するパラメータである．

表 2: クロス方向のファジィテーブル.

$\lvert b-c\rvert$ \ $\lvert f-g\rvert$	*small*	*large*
small	$\frac{f_h+f_v}{2}$	f_v
large	f_h	$\frac{f_h+f_v}{2}$

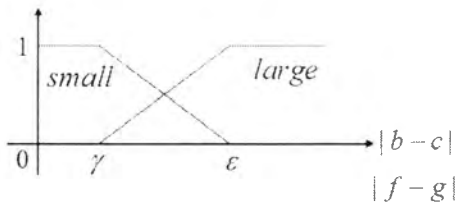


図 5: クロス方向の前件部メンバーシップ関数.

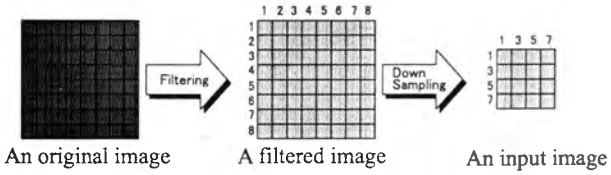


図 6: 入力画像作成の手順.

C は,

$$
\begin{aligned}
C = \quad & \mu_S(|f-g|)\cdot\mu_S(|b-c|)\cdot\tfrac{f_h+f_v}{2} \\
& +\mu_S(|f-g|)\cdot\mu_L(|b-c|)\cdot f_v \\
& +\mu_L(|f-g|)\cdot\mu_S(|b-c|)\cdot f_h \\
& +\mu_L(|f-g|)\cdot\mu_L(|b-c|)\cdot\tfrac{f_h+f_v}{2}
\end{aligned}
\tag{4}
$$

で示されるファジィ推論によって求める. μ_S, μ_L はそれぞれメンバーシップ関数 '*small*', '*large*' の適合度を表す.

3 画像拡大への適用

本研究では, 図 6 に示すように, 原画像をローパスフィルタによって処理し, その後, ダウンサンプリングして縮小した画像を入力画像として用いた. 具体的には, 標準画像 "Airplane", "Barbara", "Boat", "Bridge", "Building", "Cameraman", "Girl", "Lax", "Lena", "Lighthouse", "Text" を上述の処理によって 4 分の 1 (128×128 画素) に縮小したものを用いた. 評価は, 拡大後画像と原画像の間の誤差を見ることで行った. また, NNI, BLI, CCI, Carrato らの手法, 木村らの手法, 1500 のコードを用いた従来のコードブック手法 (CB), 及び提案手法により拡大した結果によって, 手法間の比較を行った. 提案手法では, すべての画像に対して前件部メンバーシップ関数のパラメータ α 及び γ の値を 10, β 及び ϵ の値を 50 とした.

図 7 に "Woman" の拡大結果を示す. 紙面の都合上, 拡大画像 (256×256 画素) の一部 (80×80 画素) を切り出した結果を示す. 表 3 に, それぞれの手法による拡大結果の平均自乗誤差 (Mean Square Error:MSE) を示す. 表 3 より, いずれの画像についても, 提案手法

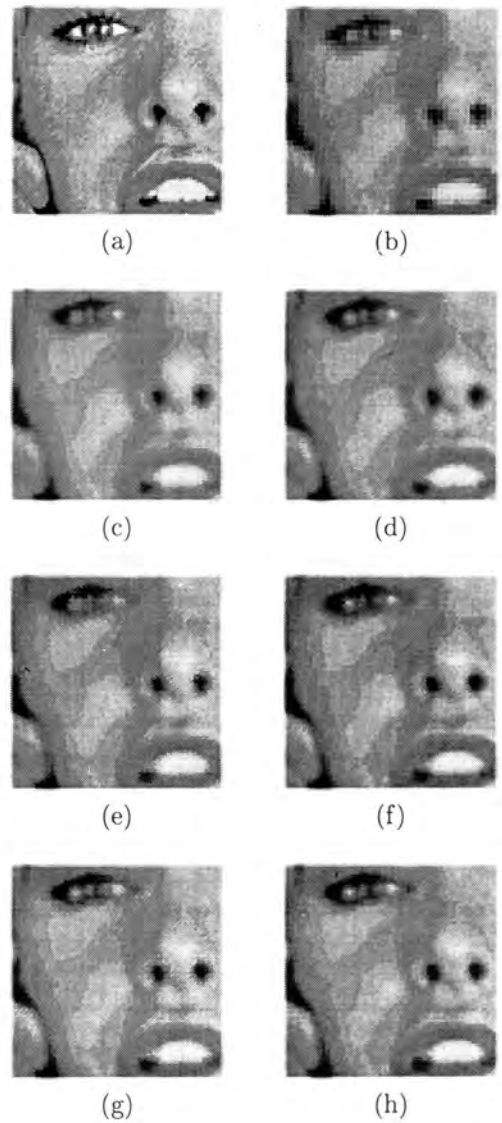


図 7: "Woman" の画像拡大の結果. (a) 原画像, (b)NNI, (c)BLI, (d)CCI, (e)Carrato's, (f)Kimura's, (g)CB, (h)Proposed.

が他の手法よりも優れた画像拡大処理を実現していることがわかる. 表 4 に主観評価の結果を示す. 評価方法は, 21 才から 70 才までの男女 62 名を被験者とし, 画像ごとに 7 種類の拡大手法により得られた拡大画像 (256×256 画素) をランダムな位置に配置し, 高解像度プリンタを用い A4 サイズで出力し, 30cm 離れて "スムーズかつシャープな画像" 順に順位をつけてもらい, 得られた結果から各手法の平均順位を算出しておこなった. 表 4 より, MSE を用いた評価の順序とは必ずしも一致しないが, 提案手法は主観的評価からもスムーズかつシャープな画像を得ることのできる手法であることが確認された. また, 提案手法の画像拡大に要する演算時間を同一コンピュータ上で比較した結果, 木村らの手法と比較して約 1/2 倍程度となり, 高速な処理が実現されていることも確認した.

表 3: 各手法における拡大結果の MSE.

	NNI	BLI	CCI	Carrato's	Kimura's	CB	**Proposed**
"Airplane"	263.8	207.3	170.8	189.9	159.2	154.9	147.8
"Barbara"	384.1	343.4	328.3	342.3	327.0	321.8	322.2
"Boat"	160.4	120.6	96.8	109.6	89.5	87.7	82.7
"Bridge"	457.9	400.5	362.6	385.0	351.0	349.8	336.9
"Building"	226.5	180.2	147.0	160.2	134.6	139.2	122.1
"Cameraman"	325.5	264.8	227.6	240.2	207.7	204.0	197.2
"Girl"	96.9	67.6	52.2	61.5	48.9	49.7	44.0
"Lax"	464.9	427.2	401.5	421.7	395.8	390.9	385.5
"Lena"	189.2	135.5	108.5	121.9	98.5	93.3	89.7
"Lighthouse"	436.0	380.4	341.1	358.8	327.4	326.2	314.2
"Text"	445.7	322.5	255.5	268.9	222.4	241.4	211.8
"Woman"	164.7	123.0	101.7	117.9	98.0	96.6	92.8

表 4: 主観評価 (62 名の被験者による平均順位).

	NNI	BLI	CCI	Carrato's	Kimura's	CB	**Proposed**
"Airplane"	6.37	5.19	3.73	4.81	2.52	2.68	2.68
"Barbara"	5.69	4.89	3.15	5.15	2.66	3.45	3.02
"Boat"	5.90	5.68	2.69	5.05	2.94	3.00	2.74
"Bridge"	6.24	5.50	3.16	4.85	2.82	3.29	2.11
"Building"	6.50	4.85	3.87	4.61	2.63	3.06	2.47
"Cameraman"	6.63	5.13	3.79	4.79	2.27	3.03	2.32
"Girl"	6.60	5.29	3.40	3.55	3.35	2.82	2.98
"Lax"	6.21	5.76	3.02	4.44	2.81	3.29	2.48
"Lena"	6.31	4.94	2.66	5.06	2.90	3.23	2.90
"Lighthouse"	6.15	5.02	3.89	3.52	3.35	3.48	2.60
"Text"	6.24	5.03	4.05	3.90	3.31	3.05	2.40
"Woman"	6.44	4.40	3.08	4.00	3.47	3.11	3.44
"Average"	6.27	5.14	3.37	4.48	2.92	3.13	2.68

4 おわりに

本論文では，高詳細な拡大画像を高速に得るために，線形外挿のファジィ推論に基づく画像拡大手法を提案した．提案手法は，従来よく用いられている手法 (NNI, BLI, CCI) と比較して高詳細な画像を得ることができ，さらに同程度の画質を得ることのできる手法 (木村らの手法) と比較して演算速度が 2 倍程度速いことを画像拡大実験を行い確認した．また，提案手法は，補間画素の近隣画素の絶対画素値差を入力情報として用いているために，ベクトル情報 (例えば, RGB 成分等からなるカラー画像) に対しても容易に適用することができるという利点をも持つ．

参考文献

[1] 高木幹雄，下田陽久監修，画像解析ハンドブック，pp. 441-444，東京大学出版会，1991.

[2] 麻生隆史, 末竹規哲, 山川烈, "自己組織化マップを用いたコードブックの生成と汎用的利用を目的とした画像拡大手法," 電学論 (C), Vol.123, No.1, pp.108-117, 2003.

[3] T. Aso, N. Suetake and T. Yamakawa, "A Code-reduction Technique for SOM-based Image Enlargement Employing Fuzzy Inference," IEEJ Tran. EIS, Vol.123, No.6, pp.1182-1183, 2003.

[4] S. Carrato, G. Ramponi and S. Marsi, "A Simple Edge-sensitive Image Interpolation Filter," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Image Processing, pp.711-714, Lausanne, Switzerland, Sep.,1996.

[5] 木村誠聡, 田口亮, 村田裕, "ファジィルールに基づく信号細部変化を保存する補間手法," 信学論 (A), Vol.J83-A, No.9, pp.1099-1108, 2000.

[問い合わせ先]

麻生 隆史

〒 808-0196 北九州市若松区ひびきの 2-4

九州工業大学大学院生命体工学研究科 (山川教官室)

Tel: 093-695-6123, Fax: 093-695-6133

E-mail: aso-takashi@edu.brain.kyutech.ac.jp

MR Cholangiography 画像における ファジイ推論を用いた膵管追跡法

Fuzzy Inference Based Tracking of the pancreatic duct in MR Cholangiography images

小橋昌司[1] 近藤克哉[1] 畑 豊[1] 今脇節朗[2] 内田發三[2]
Syoji Kobashi[1] Katsuya Kondo[1] Yutaka Hata[1] Seturo Imawaki[2] Hatsuzo Uchida[2]

[1]姫路工業大学大学院工学研究科
[1]Graduate School of Engineering, Himeji Institute of Technology
[2]石川病院
[2]Ishikawa Hospital

Abstract: Fuzzy inference is an effective approach for system control, decision-making, etc. This paper shows a new application of fuzzy inference in the field of medical imaging. Our purpose is to enhance the pancreatic duct in MR cholangiography (MR-C) images. Our method tracks the representative line of the pancreatic duct by finding the most suitable direction that is decided by means of fuzzy inference techniques. Then, the region around the RL is enhanced. The tracking performance was evaluated in computer simulation and by applying our method to MR-C images of tube-formed phantoms. The results showed that the proposed method could correctly find the RL of the objects. In addition, we applied the proposed method to MR-C images of four normal subjects and one patient. In all case, the pancreatic duct was clearly visualized.

1 はじめに

現在、MR Cholangiography(MR-C)画像は膵管の診断に広く用いられている。膵管は約 30 枚の冠状断層像で得られるため、医師による画像診断にはMIP(最大値投影)法が一般的に用いられているが、膵管以外の他の組織も高い輝度値をもつとき、膵管領域が観察できない。そこで、手作業で不要領域を除去した target MIP 画像で膵管の観察を行う。しかし、手作業による不用領域の除去は多大な労力を必要とし、操作者間誤差も問題となることから、計算機による膵管領域の自動抽出が要望されているが、その手法は未だ明らかになっていない。

管状組織抽出の従来法として Brown らの気管支抽出法[1]があるが、途切れた管には適用できない。途切れを考慮した手法としてBullittらのMRA画像からの血管分割[2]があるが、これは過抽出部分を手動削除しており、また途切れた部分は処理の最期に連結するので、膵管への適用は困難である。

一方、MR-C 画像のスライス厚(3mm)に対して膵管も 4mm 程度と細いため、画像上で膵管全体が描出されない場合も多い。さらに、0.5Tesla などの低磁場の MRI 装置を用いると膵管壁付近での MR 信号値が低下し、膵管と他軟部組織との境界が不明瞭となる。また、膵管の瘤や結石などの疾患では、画像上で狭窄、欠落して描出される。

そこで本研究では、膵管領域を抽出するのではなく、膵管の中心線を追跡する手法を提案する。これにより、領域境界が不明瞭な場合や、膵管が狭窄、欠落している場合に対しても適用できる。また、追跡した中心線を用いた膵管部のみの画像強調、膵管径の推定なども行える。中心線の追跡は、多種多様なMR-C画像に効率的に適用できるようにするため、ファジィ推論を用いて行う。実験では、本手法の精度を数値的に評価するため、計算機シミュレーションによる人工生成画像、膵管を模したプラスチックチューブを撮影した MR-C 画像を用いて、中心線の追跡及び管径の推定精度を評価した。さらに、健常者 4 例、疾患者 1 例の膵管画像強調へ適用し、本手法の有効性を検証した。

2 準備

本研究では、健常ボランティア 4 名の男性(subject A-D;69.75±27.75 才)と、疾患ボランティア 1 名の女性(subject E;82 才、膵炎)に対して、ヘルシンキ宣言に基づく規定のインフォームドコンセントを得た上で撮影した MR-C 画像を対象とした。

MR-C 画像は、GE Medical Systems 社(Milwaukee、WI)の Genesis Signa 1.5Tesla MRI scanner を用い、single slice first spin echo(FSE)法により撮影した。主な撮影パラメータは TR=75790.7msec、TE=188.2msec、画素数 512×512、スライス数約 30 枚、スライス厚 3.0mm、スライス間隔 3.0mm、ボクセルサイズ 0.47×0.47×3.0mm^3、FOV は 240×240mm^{2}である。MR 信号値は 12bits で格納された。原画像は図 1 に示すような冠状断層像である。MR-C 画像上で膵管は高い輝度値で描出される。

提案法の評価のためにファントムデータとして、空泡の生じないように水で満たされた内径 2.2mm

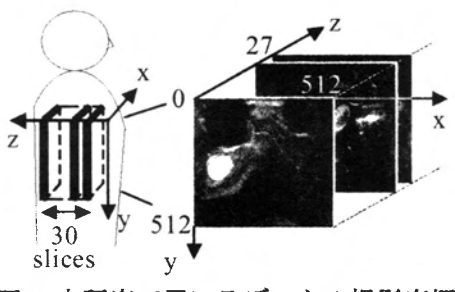


図 1 本研究で用いるデータの撮影座標

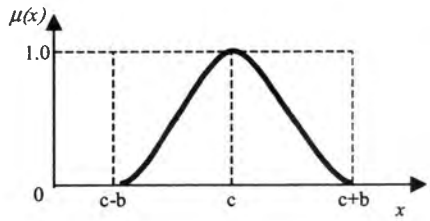


図 2 釣鐘型メンバーシップ関数

と内径 3.5mm のプラスチックチューブを撮影する。本撮影法では、水に高信号を、プラスチックは空気と同程度の信号を与える。なお、スライス数は 3 枚とし、3.5mm の管には狭窄を人為的に作る。

本提案手法では、次式で定義される釣鐘型メンバーシップ関数を用いる。

$$\omega(x;b,c)=\begin{cases}S(x;c-b,c-b/2,c) & x\le c\\ 1-S(x;c,c+b/2,c+b) & x>c\end{cases}$$

$$S(x;a,b,c,)=\begin{cases}0 & x\le a\\ 2\left(\dfrac{x-a}{c-a}\right)^2 & a<x\le b\\ 1-2\left(\dfrac{x-a}{c-a}\right)^2 & b<x\le c\\ 1 & x>c\end{cases} \quad (1)$$

同メンバーシップ関数は図 2 のような形状となる。

3 提案手法

本提案法は、抽出対象の管状組織内に設定された開始点より、最も中心線らしい方向を随時ファジィ推論により探索し、探索された方向へ中心線を延ばすことで、管状組織の中心線を追跡する。

中心線は一定間隔 d におかれたノードで表現する。中心線追跡は管状組織内に与えられた初期ノード 2 点より開始し、図 3 に示すように、端ノード P(t)を中心とした半径 d の円周上で、中心線の延長方向を探索する。

中心線延長方向を探索するため、探索円周上で次ノードである度合い μ_{next} を以下の知識により求める。

[膵管に関する知識]

- **管は滑らかに曲がる。**
- **管の径は急激に変化しない。**
- **膵管領域は高い輝度値をもつ。**

これをファジィ IF-THEN ルールで表現すると以下のようになる。

[ファジィ IF-THEN ルール]
円周上の注目点について

IF　曲がりの変化が小さい、
AND　径の変化が小さい、
AND　**輝度値が高い、**
THEN　**次ノードである。**

これより、前件部の各知識に属する所属度をそれぞれ、μ_{curve}、μ_{radius}、$\mu_{intensity}$ としたとき、後件部の知識に属する度合い μ_{next} を

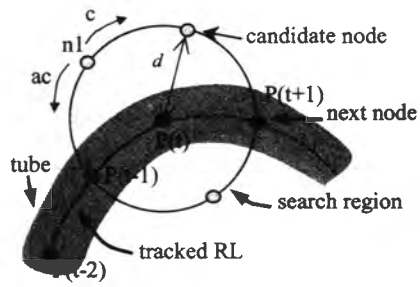


図 3 中心線の追跡アルゴリズム.

$$\mu_{next}=\min\left\{\mu_{curve},\ \mu_{radius},\ \mu_{intensity}\right\} \quad (2)$$

として与える。μ_{curve}、μ_{radius}、$\mu_{intensity}$ はそれぞれ以下の様に定義される。

μ_{curve} は中心線の形状に関する膵管への所属度で、次のように与えられる。図 3 において、$P(t)$を端ノード、$P(t+1)$を候補ノードとすると、$P(t+1)$における管の曲がり具合 ϕ を次式より算出する。

$$\phi(\mathrm{P}(t+1))=\cos^{-1}\frac{\vec{\mathrm{v}}_{ref}\cdot\vec{\mathrm{v}}_{t+1}}{\left|\vec{\mathrm{v}}_{ref}\right|\left|\vec{\mathrm{v}}_{t+1}\right|} \quad (3)$$

ここで $\vec{\mathrm{v}}_{ref}$ は $\vec{\mathrm{v}}_2$ から $\vec{\mathrm{v}}_t$ の平均と $\vec{\mathrm{v}}_{t+1}$ の平均ベクトルである。μ^{curve} は $\mu_{curve}(\phi)=\varpi(\phi;\pi,0)$ で得られる。

μ_{radius} は管径に関する膵管への所属度で、点 p における推定管径を $r(p)$とし、管径の変化率を

$$\gamma(\mathrm{P}(t+1))=\frac{r(\mathrm{P}(t+1))}{r(\mathrm{P}(t))} \quad (4)$$

とするとき、$\mu_{radius}(\gamma)=\varpi(\gamma;1.0,1.0)$ で与える。また、膵管断面の管径 $r(p)$は、膵管断面の輝度値変化が正規分布に類似することから、正規分布のフィッティングにより推定する。

$\mu_{intensity}$ は濃度値に関する膵管への所属度で、$I(p)$を p 点における濃度値としたとき、

$$\mu_{intensity}=\frac{I(P(t+1))}{\max_{k\in S}\left\{I(k)\right\}} \quad (5)$$

で与えられる。ここで、S は円周上で $\mu_{curve}\ge th_{curve}$ を満たす領域である。

以上の処理で円周上の全点について、次ノードである度合い μ_{next} が求められる。ここで、最も高い μ_{next} をとる点で $\mu_{next}\ge th_{next}$ の時、その点を探索線に加え探索線追跡処理を繰り返す。一方、$\mu_{next}<th_{next}$ の時、追跡線が膵管の終端に達したかどうかを判断するため、探索領域を端ノード $P(t)$を中心とした半径 2×d として、上記の中心線探索を行う。同探索円周上で $\mu_{next}\ge th_{next}$ の点が見つかれば、その点を探索線に加え探索線追跡処理を繰り返す。また、次ノードが見つからないとき、探索処理を終了する。

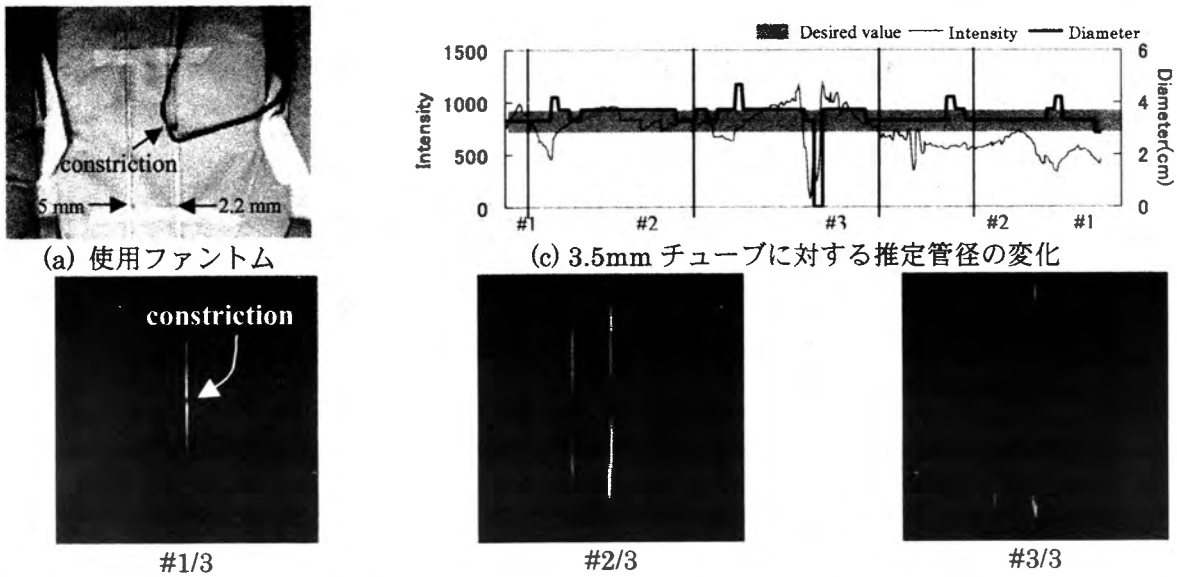
4 実験結果及び評価

4.1 計算機シミュレーション

提案手法の中心線追跡能力を評価するため、図 4(a)に示すような計算機により生成した直径 11 ボクセルの欠落を持つ管状オブジェクトに適用した。図 4(b)、(c)に追跡の途中結果、最終結果を示す。同

(a) 初期状態　(b) 13 ステップ　(c) 最終結果　(d) 中心線における径変化

図 4　人工生成データ



(a) 使用ファントム　(c) 3.5mm チューブに対する推定管径の変化

#1/3　#2/3　#3/3

(b) 撮影された MR-C 画像

図 5　ファントムデータ

図より欠落を有するデータに対しても、良好に中心線を追跡できることが確認できた。さらに、図(d)に推定した管径変化を示す。同図より管径は 11 ボクセル、屈折箇所で 13 ボクセルと得られた。さらに、欠落点も 22 番目のノードで管径 0 ボクセルとして抽出できた。

4.2 ファントム実験

図 5(a)に示す 3.5mm と 2.2mm のファントムを 3 枚撮影した、(b)図の MR-C 画像に適用した結果、両ファントムに対して本手法は良好に中心線を検出できた。(c)図に 3.5mm ファントムに対する管径変化を示す。同図で径が 0 のノードは補間したノードである。同図より径の値はスライスの変化時、少し大きく算出される傾向があった。これはスライスの変化時に膵管の輝度値が低くなるため、径のフィッティングが正確に行われなかったと考えられる。2.2mm、3.5mm ファントムの管径推定の平均誤差はそれぞれ 0.23mm、0.28mm であった。径はボクセルサイズから算出されるので、3.5 mm の理論値は、(c)図の網掛けで示すように、7 ボクセル×0.47mm=3.29、8 ボクセル×0.47mm=3.76 より、平均 3.525mm、誤差 0.235mm となる。したがって、径はほぼ正しく算出されていると言える。本実験では、追跡した全ノードの内 90%以上がこの理論値の範囲内となった。

4.3 健常者及び疾患者の MR-C 画像への適用

本手法を MR-C 画像における膵管領域の画像強調に適用した。本手法を用いることで、すべての例に対して、管の中心線探索は良好に行えた。Subject A、B、E に対する、従来の MIP 画像、中心線追跡結果、強調画像の MIP 画像をそれぞれ図 6、7、8 に示す。同図より中心線追跡が良好に行え、また膵管が明瞭に描出されることが確認できる。健常被験者 C と疾患被験者 E に対して推定された管径変化を図 9、10 に示す。グラフ中の破線は近似曲線である。健常者と疾患者の径変化を比較すると、膵炎疾患者は径が大きく変化していることが確認できた。

5 むすび

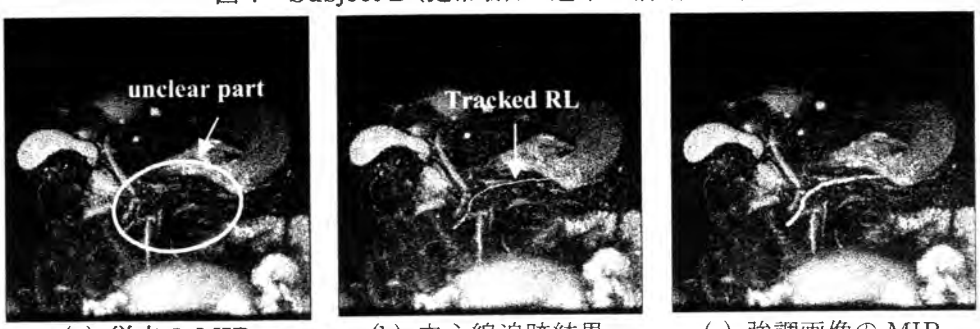
本文では、MR-C 画像に対する新しい計算機診断支援として、ファジィ推論を用いた膵管自動追跡法を提案した。本手法は、医師が視認で行う膵管追跡を、ファジィ推論により計算機上で実現した。本手法を用いることで、膵管径推定や、膵管のみの画像強調などを可能とする。本提案法は、計算シミュレーション、ファントムデータを用いて、その追跡能力、管径推定能力を評価された。本評価実験においては、全例で中心線が追跡され、またファントム実験においても、90%以上の精度で管径推定が行えることが確認された。さらに、健常者 4 例、疾患者 1 例の MR-C 画像に本手法を適用した結果、全例で中心線が追跡されることが確認できた。また、追跡された中心を用いて、膵管の画像強調を行った結果、従来の MIP 画像と比べて明瞭に膵管が描出され、本手法

(a) 従来の MIP. (b) 中心線追跡結果. (c) 強調画像の MIP.

図 6 Subject A (健常者). 不連続な膵管の例

(a) 従来の MIP. (b) 中心線追跡結果. (c) 強調画像の MIP.

図 7 Subject B (健常者). 途中で消滅した例



(a) 従来の MIP. (b) 中心線追跡結果. (c) 強調画像の MIP.

図 8 Subject E (疾患者). 膵炎の例.

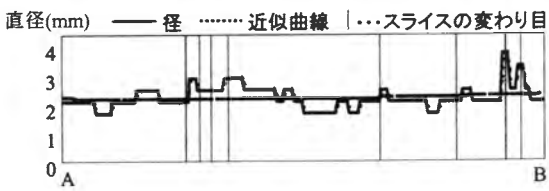


図 9 健常者 C の膵管径変化

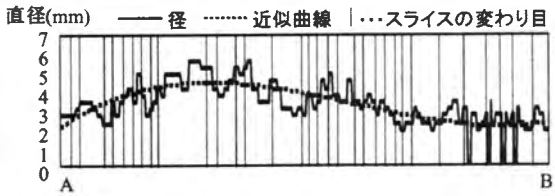


図 10 膵炎疾患者 E の膵管径変化

は診断に極めて有効であることが確認された。さらに、健常者と膵炎疾患者の管径の推定結果を比較すると、その違いが明確に確認でき、新しい膵炎診断支援法の可能性が示された。一方、本実験で対象としている MR-C 画像は、撮影時間の短縮、SN 比の向上を目的に、3mm と厚いスライス厚で撮影を行っている。そのためスライスの変わり目で管径の推定誤差が生じる。そこで、今後はスライスの変わり目に生じる推定誤差を減少させる方法論の開発を行う。

参考文献

[1] M. S. Brown, G. J. Goldin, M. F. McNitt-Gray, L. E. Greaser, A. Sapra, K. Li, J. W. Sayre, K. Martin, and D. R. Aberle, "Knowledge-based segmentation of thoracic computed tomography images for assessment of split lung function," Medical Physics, vol. 27, 2000.

[2] E. Bullitt, S. Aylward, K. Smith, S. Mukherji, M. Jiroutek, and K. Muller, "Symbolic Description of Intracerebral Vessels Segmented from MRA and Evaluation by Comparison with X-Ray," Angiograms. Medical Image Analysis, vol. 5, pp.157-169, 2001.

連絡先:
〒671-2201 姫路市書写２１６７
姫路工業大学大学院工学研究科
電子情報工学部門 情報システム研究室
小橋昌司
電話： 0792-67-4989 · FAX： 0792-67-4989
Email： kobashi@comp.eng.himeji-tech.ac.jp

Extended Component-Separating Nonlinear Digital Filter and Its Application to Face Image Beautification

Kaoru Arakawa and Hiroo Naito
Department of Computer Sciences
Meiji University
1-1-1, Higashimita, Tama-ku, Kawasaki, 214-8571 Japan
Tel: +81-44-934-7445, Fax: +81-44-934-7912
E-mail: arakawa@cs.meiji.ac.jp

Abstract: An extended form of a component-separating nonlinear digital filter (CS filter for short) is proposed. The CS filter, proposed by authors before, aims at reducing small-amplitude random noise superposed on signals which contain both continuous and abrupt changes. This filter can perform such noise reduction to some extent, however, this filter is not powerful enough to suppress low-frequency noise. The extended CS filter (ECS filter) proposed here can avoid the drawback of the CS filter and realize quite high performance in noise reduction for both high and low-frequency noise. Moreover, a method for its optimum design is also proposed. As to application, this filter is shown to be quite effective for face image processing to make the skin look smooth and beautified.

1. Introduction

In order to reduce small-amplitude random noise superimposed on signal with abrupt changes, authors proposed before a nonlinear digital filter named as an ε-filter[1]. This filter is powerful to reduce small-amplitude random noise, while keeping the abrupt component in the signal unchanged. However, the performance of the ε-filter is not satisfactory enough, when the signal contains continuous changes, such as a slope and a sinusoidal hump, since the ε-filer is designed to be ideal when the signal contains just flat components and discontinuous jumps. When the signal contains continuous changes, noise remaining and signal distortion occur. In order to solve this problem, authors proposed a component separating nonlinear digital filter (CS filter for short)[2][3]. The CS filter first subtracts a rough signal structure from the input, then applies ε-filtering to the residual and finally reconstructs the output as the summation of them. Since continuous changes in the input is subtracted before ε-filtering, noise remaining and signal distortion are avoided. However, in this case, low-frequency noise cannot be reduced adequately, because the remaining low-frequency noise in the rough structure is summed up to the output.

In this paper, an extended CS filter is proposed to improve the performance of the CS filter. This filter can reduce the small-amplitude random noise adequately including the low-frequency component, while avoiding the defect of the original ε-filter. Moreover, the way to design this filter optimally is shown in minimum mean square error sense. Moreover, as to application, this filter is shown to be quite effective for face image processing to make the skin look smooth and beautified.

2. Principle of Extended CS Filter

2.1 Principle of ε-filter

The input-output relationship of the ε-filter is represented as

$$y(n) = x(n) + \sum_{i=-N}^{N} a_i (x(n-i) - x(n)) \tag{1}$$

where $x(n)$ and $y(n)$ are the input and the output signal at time n respectively. $x(n)$ is supposed to be the sum of an original signal and small-amplitude random noise. a_i is the filter coefficient of a linear non-recursive low-pass filter, satisfying the following condition to keep the DC level unchanged.

$$\sum_{i=-N}^{N} a_i = 1 \tag{2}$$

F is a nonlinear function which takes a form as Fig.1, bounded within a certain value ε as follows.

$$|F(p)| \le \varepsilon \qquad ;-\infty \le p \le \infty \tag{3}$$

When $|p| \le \varepsilon$, $F(p)=p$ and this filter works as a linear nonrecursive low-pass filter. Thus, if the amplitude of the input is less than $\varepsilon/2$ in the filter window, this filter smoothes the input as a linear low-pass filter. On the other hand, if the input signal largely changes, this filter preserves the value of the changes, since the difference between the input and the output of this filter is limited to a certain value ε' as follows.

$$|y(n)-x(n)| = \left| \sum_{i=-N}^{N} a_i F(x(n+i)-x(n)) \right| \le \sum_{i=-N}^{N} |a_i| \varepsilon \equiv \varepsilon' \tag{4}$$

Thus, this filter smoothes small-amplitude random noises, while preserving large-amplitude changes in the original signal even if these changes contain high-frequency components. This filter is named as an ε-filter. When the value ε is large enough or the fluctuation in the input is small enough, the ε-filter corresponds to a linear nonrecursive low-pass filter as

$$y(n) = \sum_{i=-N}^{N} a_i x(n-i) \tag{5}$$

2.2 Principle of CS Filter

The Component-separating nonlinear digital filter (CS filter) consists of two filters as shown in Fig. 2. In Fig. 2, first, the filter H extracts a certain component s(n) from the input signal x(n). Next, the residual t(n) is obtained by t(n)=x(n)-s(n) and is processed by the filter E. Finally, the output y(n) is given by adding v(n) to s(n) as

$$s(n) = x(n) + \sum_{k=-M}^{M} b_k F_H(x(n-k) - x(n)) \quad (6)$$

$$t(n) = x(n) - s(n) \quad (6)'$$

$$v(n) = t(n) + \sum_{i=-N}^{N} a_i F_E(t(n-i) - t(n)) \quad (6)''$$

$$y(n) = x(n) + \sum_{i=-N}^{N} a_i F_E(t(n-i) - t(n)) \quad (6)'''$$

Here, b_k is a filter coefficient of a linear low-pass filter as a_i and F_H and F_E are nonlinear functions as F. Both H and E are ε-filters, but H adopts a large value for ε, which means that H is close to a linear low-pass filter and accordingly, s(n) corresponds to a rough structure in the input signal. On the other hand, E works as a nonlinear smoothing filter, which filters out small-amplitude random noise while preserving the large-amplitude abrupt changes in the input signal.

2.3 Proposal of Extended CS Filter

Suppose that the original signal is completely flat and small-amplitude random noise is added to it. When the CS filter is applied, the filter H and E work as a linear low-pass filter. If we denote the transfer function of H and E as H(z) and E(z) respectively and the input and the output as X(z) and Y(z) in the z-plane, Y(z) is expressed as follows.

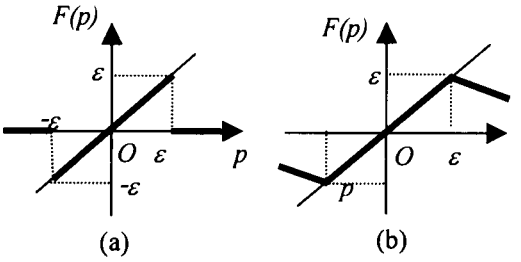


Fig.1 Examples of nonlinear function F.

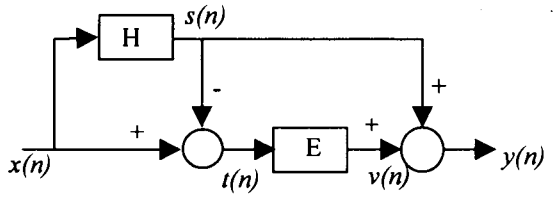


Fig.2 Schematic diagram of CS filter.

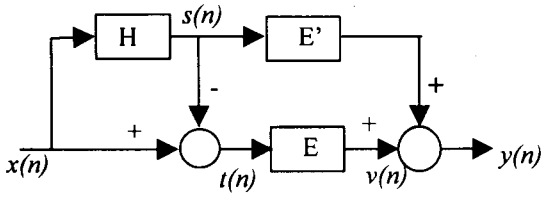


Fig.3 Schematic diagram of ECS filter.

$$\begin{aligned} Y(z) &= \{(1 - H(z))E(z) + H(z)\}X(z) \\ &= E(z)X(z) + H(z)(1 - E(z))X(z) \end{aligned} \quad (7)$$

If we compare this output with that of the simple ε-filter as E(z)X(z), we can see that the output of the CS filter additionally contains low-to-middle frequency component, not including the DC level, as the second term of the lower equation in eq.(7). In order to reduce the low-frequency component the cut-off frequency of H must be low enough, however, since H must extract the rough structure of the input signal, the cut-off frequency cannot be lowered so much.

Here, if another ε-filter E', the transfer function of which is the same as E(z), is added as shown in Fig. 3, the output becomes the same as that of the filter E as follows.

$$\begin{aligned} Y(z) &= \{(1 - H(z))E(z) + H(z)E(z)\}X(z) \\ &= E(z)X(z) \end{aligned} \quad (8)$$

In this case, if the cut-off frequency of E is low enough, we can adequately reduce the noise. We call this filter Fig.3 as an extended CS filter (ECS filter for short).

In the above discussion, the original signal is supposed to be flat. When we apply this filter to actual signals, we must consider the change of the signal. In this case, the value of ε and the form of the nonlinear function F_E must be different between E and E'. Suppose that the nonlinear function and ε in E' is expressed as F'_E and ε', the output of the extended CS filter is expressed as

$$y(n) = x(n) + \sum_{i=-N}^{N} a_i (F_E(t(n-i) - t(n)) + F_E'(s(n-i) - s(n))) \quad (9)$$

Thus $|y(n) - x(n)|$ is limited to $\sum |a_i|$ (ε+ε') and ε' must be small enough to keep this difference small.

3. Optimum Design of Extended CS Filter

The nonlinear functions in the ECS filter can be approximated as a piecewise linear function as Fig.4. Using this approximation, the ECS filter is expressed as follows.

$$\begin{aligned} s(n) &= x(n) + \sum_{k=-M}^{M} b_{ki} p_m(x(n-k) - x(n)) \\ &= x(n) + \sum_{k=M}^{M} \beta_{im}(x(n-k) - x(n)) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} y(n) &= x(n) \\ &\quad + \sum_{i=-N}^{N} a_i \{q_r(t(n-i) - t(n)) + q'_{r'}(s(n-i) - s(n))\} \\ &= x(n) + \sum_{i=-N}^{N} \{\alpha_{ir}(t(n-i) - t(n)) + \alpha'_{ir'}(s(n-i) - s(n))\} \end{aligned} \quad (11)$$

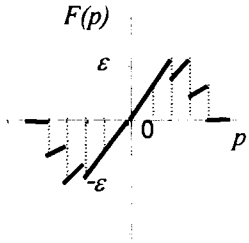


Fig.4 Piecewise linear approximation of the nonlinear function.

Here, m denotes the piecewise region on the horizontal axis in Fig,4, in which the value $x(n-k)-x(n)$ is included, and p_m denotes the gradient of the piecewise linear function in the m-th region. Similarly, r and r' are the piecewise regions in which the values $t(n-i)-t(n)$ and $s(n-i)-s(n)$ are included respectively, and q_r and $q'_{r'}$ the gradients of the piecewise linear functions in these regions. The ECS filter can be designed optimally by setting all the values of β_{km}, $\alpha_{ir,}$, and $\alpha'_{ir'}$ in each piecewise region, so that the mean square error of the filter output be the minimum. One of the simplest method to obtain these values is an iterative training method for some training signal, the characteristics of which are supposed to be close enough to the signal to be processed. Especially, as to the latter part of this filter, α_{ir} and $\alpha'_{ir'}$ can be easily obtained by the LMS algorithm as follows.

$$\alpha_{ir}(n+1) = \alpha_{ir}(n) + \mu\big(y(n) - d(n)\big)\big(t(n) - t(n-i)\big) \quad (11)$$

$$\alpha'_{ir'}(n+1) = \alpha'_{ir'}(n) + \mu'\big(y(n) - d(n)\big)\big(s(n) - s(n-i)\big) \quad (11)'$$

Here d(n) denotes the original signal and $\alpha_{ir}(n)$ and $\alpha'_{ir'}(n)$ are the value of α_{ir} and $\alpha'_{ir'}$ at time point n. μ and μ' are the parameters for convergence.

As to the former part of this filter, since this system is so much influenced by the local minimum, it is difficult to get the optimum values for β_{km} from such a gradient method. Thus the following method is adopted here.

1. Prepare several candidates of values for β_{km} for each m as $\beta_{km}=\lambda_m\delta$,where λ_m is an integer 0,1,2,...,K, and δ takes a value as b_k / K.
2. Change λ_m from 0 to K, and at each λ_m, perform the training for $\alpha_{ir,}$ and $\alpha'_{ir'}$ as eq.(11)(11)' then get the mean square error of the output.
3. Select λ_m at which the mean square error in 2. is the smallest.

Here, the value b_k is supposed to take the same value for k for simplicity. By apply the procedure 1.2.3 above for all m, the values β_{km} , which can be considered as the quasi-optimum ones, are obtained.

4.COMPUTER SIMULATIONS

4.1 Computer Simulation for Artificial Test Signals

An artificial test signal as shown in Fig. 5 is used as the original signal for training. Here, the whole sequence is used 80 times, while changing its amplitude by multiplying a factor from 0.8 to 1.2 at each time. White gaussian noise with zero mean and variance 0.01 is added.

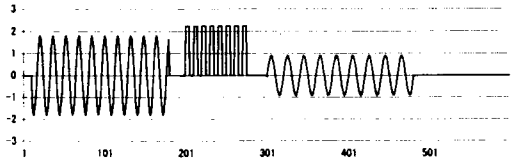


Fig.5 Original test signals used for training.

Filter \ Input	Training signal +noise	Sinusoidal signal +noise	Squared signal +noise
ε-filter	0.0048	0.0101	0.0068
CS filter	0.0035	0.0066	0.0100
ECS filter	0.0035	0.0078	0.0085

Table1 Mean square error of the filter output for three types of inputl signals.

Two other signals are used as the input original signal to this optimized filter, one is a continuously changing sinusoidal signal and the other is an abruptly changing squared one. White gaussian noise with zero mean and variance 0.01 is also added to them. Table 1 shows the mean square error of the output of the ε-filter, the CS-filter, and the ECS filter for these input signals. These filters are all designed optimally for the training signal Fig.5. We can see that the ε-filter is quite effective for the squared signal which is composed of just flat parts and abrupt jumps, but not for the sinusoidal one which contains continuous changes. On the other hand, the CS filter is effective for the sinusoidal signal, but not for the squared one. We can also see that the ECS filter is relatively effective for both the sinusoidal and the squared signals. In this way the ECS filter can reduce noise adequately in both the continuously changing part and the flat part.

4.2 Application to Beautification of Face Image

Authors showed before that the ε-filter is effective to remove small fluctuation on skin such as wrinkles and spots in human face images, and make the face look younger and beautified. Moreover, authors showed that the CS filter can make the face image look more natural than the original ε-filter[2] because it can effectively filter out noisy component on continuously changing signals. However, since the CS filter cannot suppress the low-frequency component in the fluctuation on skin adequately, the output face images look somewhat unclear. Here we show that we can get quite a natural and clear face image by applying the ECS filter.

Fig. 6 (a) shows the training input image and (b) the desired output, which corresponds to the original training signal. The desired output is made by partially smoothing the image (a) by hand work with an image processing tool. Fig.7 shows the input face image and the output of the ε-filter, CS filter and the ECS filter All the filters are optimized for the image Fig.6. We can see that the output of the ε-filter is a little artificial, because the gradation between the light part and the dark one in too sharpened. In the case of the CS filter, the gradation is soft and

natural, but some small-amplitude low-frequency fluctuation appears stronger on the skin, especially on the cheek and the forehead. The output of the ECS filter looks natural and clear. We can see the gradation is as smooth as that of the CS filter, while the flat area on the skin is as flat and clear as that of the ε-filter.

5. CONCLUSIONS

An extended CS filter is proposed for noise reduction of nonstationary signals containing both abrupt changes and continuous ones. This filter is realized by adding one more ε-filter to the CS filter and can realize effective noise reduction in both a flat part of the signal and a continuously changing one. This filter can be designed optimally by iterative training for some known training signals. Here, the optimization is performed by approximating this filter as a piecewise linear system, and the gradient in each piecewise region is obtained, so that the mean square error of the output be the minimum. As an application of this filter, the face image beautifying system is proposed. In computer simulations, it is shown that the ECS filter can filter out small-amplitude fluctuation on skin quite effectively, while keeping the natural gradation of the face image.

As to further work, how to simplify this training algorithm in order to reduce the training time and how to select the training signal are to be considered.

(a) Input image for training. (b)Desired output.

Fig.6 Input image and the desired output used in training.

(a) Input image. (b) Output of ε-filter.

(c) Output of CS filter. (d) Output of ECS filter.

Fig.7 Comparison of the output with other filters.

References

[1] H. Harashima, K. Odajima (Arakawa), Y. Shishikui and H. Miyakawa, "ε-separating nonlinear digital filter and its applications", *IEICE Trans.*, vol.J-65-A, no.4, pp.297-304, April, 1982.

[2] H. Watabe, Y.Arakawa, and K.Arakawa, "Nonlinear filters for multimedia applications", *Proc.IEEE ICIP '99,* 27AO3.6, pp.174-148, Oct.1999.

[3] K. Arakawa, K. Matsuura, H. Watabe, and Y.Arakawa, "A method of noise reduction for speech signals using component separating ε-filters", *IEICE Trans,* vol..J85-A, no.10, pp.1059-1069, Oct.2002.

(連絡先)
〒 214-8571
川崎市多摩区東三田１－１－１
明治大学理工学部情報科学科
荒川 薫
e-mail arakawa@cs.meiji.ac.jp

管状組織情報に基づく胸部 MDCT 画像からの肺葉自動抽出法
Tubular Tissue-Based Segmentation of Lung Lobes from Chest MDCT Images

大川　喬弘† 小橋　昌司† 近藤　克哉†
Takahiro OHKAWA† Syoji KOBASHI† Katsuya KONDO†
畑　豊† 中野　知治‡
Yutaka HATA† Tomoharu NAKANO‡

†姫路工業大学大学院工学研究科
‡岡山大学大学院医歯学総合研究科腫瘍・胸部外科
†Computer Engineering Division, Graduate School of Engineering, Himeji Institute of Technology
‡Cancer and Thoracic Surgery, Graduate School of Medicine, Okayama University

Abstract: Segmentation of lung lobes from MDCT (Multidetector-row CT) images can provide effective information for functional assessments of each lobe and detection of pulmonary diseases such as the emphysema and lung cancers. To segment lung lobes, conventional studies for detecting pulmonary fissures that located between lung lobes have shown. Some parts of fissures may not observed because of artifacts or the adhesion of lung lobes. This paper proposes a novel method for segmenting lung lobes based on tubular tissues, which are the peripheral blood vessels and bronchus. Our method finds the boundary surface between lung lobes by fitting a curved surface. This segmentation result does not depend on the state of pulmonary fissures. The fitting is performed with fuzzy control, and it searches the boundary with low density of tubular tissues. As the result on four normal subjects, the boundary surface between lung lobes were correctly identified and then lung lobes were successfully segmented in all cases.

1．はじめに

解剖学的に，右肺は上葉，中葉，下葉の 3 つの肺葉，左肺は上葉，下葉の 2 つの肺葉からなる．各肺葉の境界である斜裂と水平裂は葉間裂と呼ばれる．胸部 CT 画像から肺領域を抽出し，さらに肺葉へ分割することは肺葉単位の解析を可能とし，肺気腫や肺癌などの肺病変の位置認識[1]や肺葉単位の機能評価の実現に有効な情報を提供できる．

従来の肺葉分割法[2]では，CT 画像から葉間裂を検出し，それを境界面として各肺葉への分割を行う．葉間裂検出法として，文献[3]では VanderBrug オペレータによって葉間裂の候補領域をスライス単位で強調し，3 次元 erosion，dilation 処理を用いて葉間裂を抽出する．しかしながら，葉間裂は非常に薄く，かつ低コントラストで視認しにくい部位が多い．さらに，ノイズの影響を受けやすく，葉間裂が部分的に欠落している場合も多い．すなわち，一般に葉間裂は肺葉境界として完全な状態で CT 画像上に描出されることが少ない．従って，肺葉分割において，CT 画像から抽出した葉間裂を用いる手法には限界があると言える．

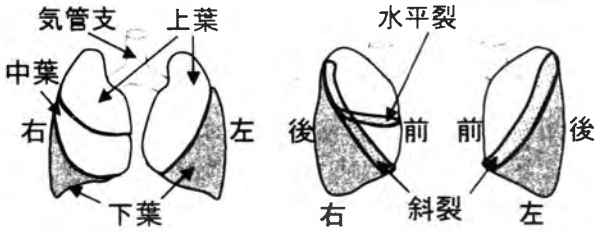
肺は解剖学的に肺葉単位に分割されているので，肺内部において末梢血管と末梢気管支は肺葉境界を交差して走行することはない．本文では，この末梢血管と末梢気管支をまとめて管状組織と呼ぶ．つまり，管状組織の密度は肺葉境界である葉間裂に近づくにつれて低くなる．そこで，本研究では葉間裂に依らない管状組織の密度に基づく肺葉境界推定法を提案する．肺葉境界の推定は，曲面を管状組織の密度が小さくなる方へファジィ制御によりフィッティングすることで行う．ファジィ制御を用いることで，フィッティング処理の時間短縮や多様な CT 画像への適用が可能となる．最後に，推定した肺葉境界面を用いて各肺葉へのラベリングを行う．よって，本提案法は CT 画像上の葉間裂を検出しない新しい肺葉分割法である．

2．準備

従来の CT 装置と比べて高分解能な画像を高速に撮影することができる画像診断装置として MDCT (Multidetector-row CT)が普及し始めている．高解像度な画像を用いることで効率的な画像処理を実現できるので，本研究では胸部 MDCT 画像を対象とする．本研究で用いる MDCT 画像は GE Medical Systems 社の LightSpeed Ultra16 で撮影された水平断層像である．1 被験者に対し，ボリュームデータは 400 枚以上のスライス画像からなり，肺尖から横隔膜を含むように撮影されている．主な撮影パラメータを表 1 に示す．また，肺の構造を図 1 に示す．同図に示す

表 1　主な撮影パラメータ

管電圧	120 KV
管電流	440 mA
スライス厚	0.625 mm
マトリクス	512×512 pixels
FOV	360×360 mm



(a) 正面図　　(b) 側面図

図 1　肺の構造

ように，右肺は上葉，中葉，下葉の 3 つの肺葉，左肺は上葉，下葉の 2 つの肺葉からなる．各肺葉の境界である斜裂と水平裂は葉間裂と呼ばれる．このように，肺は葉間裂によって肺葉単位に分割されるので，肺内部において末梢血管と末梢気管支は肺葉境界を交差して走行することはない．本文では，この末梢血管及び末梢気管支を管状組織と呼ぶ．

3．管状組織の検出

肺内部は空気で満たされているので，MDCT 画像上で肺野領域は他の組織よりも明らかに低い CT 値を持つ．本手法では肺野領域をしきい値処理，3 次元領域拡張法，3 次元 erosion，dilation 処理を用いて抽出する．気管支領域は気管内部に存在する空気領域を 3 次元領域拡張法により抽出する．

管状組織は MDCT 画像上で周囲の空気領域と比べて高い CT 値を持つ．そこで，肺野領域から気管支領域を除いた領域に対し，式(1)に示すオペレータを用いて管状組織の検出を行う．

$$\mu = I - I_{mean}. \tag{1}$$

ここで，I は注目ボクセルの CT 値，I_{mean} は注目ボクセルを中心とした 5×5×5 の近傍ボクセルの平均 CT 値である．肺野領域内において，式(1)により算出された μ がしきい値 Th 以上のボクセルを管状組織とする．さらに，抽出された管状組織の密度分布を，半径 r の球内に存在する管状組織ボクセル数から算出する．

4．管状組織密度に基づく肺葉分割法

肺葉分割のための肺葉境界面の推定は，平面による初期境界面の決定，管状組織の密度に基づいた初期境界面の変形により行う．

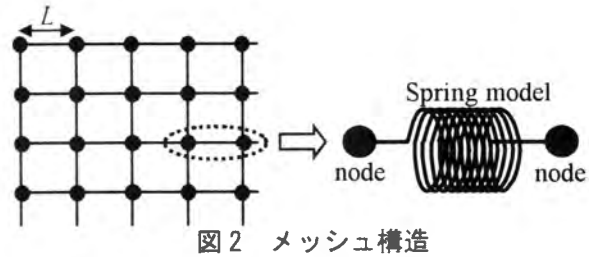


図 2　メッシュ構造

初期境界面は次のように求める．

STEP 1)肺野領域内を体軸方向に最も長く走行する直線を求める．

STEP 2)得られた直線上で管状組織の密度が最も小さい点 p を探索する．このとき直線の両端から長さ $2r$ は探索範囲から除く．

STEP 3)点 p を通り，平面上での管状組織の密度の総和が最小となる平面を求める．

STEP 4)求められた平面を図 2 で示すようなメッシュ構造に置換する．ここで，隣接する交点(ノード)間の初期距離は L とする．また，交点間はバネモデルで表現され，バネの自然長を L とする．

以上の処理によってノードとバネモデルで構成されたメッシュ構造の初期境界面が得られる．右肺では斜裂と水平裂の 2 つの肺葉境界面が存在するので，上記の処理を 2 回行う．

次に，初期境界面を変形させることで肺葉境界面へのフィッティングを行う．すなわち，初期境界面を構成する各ノードを移動させる．解剖学的に，肺葉境界では管状組織の密度は低く，また肺葉境界面は滑らかな面形状である．ファジィ制御による肺葉境界へのフィッティングでは，各ノードはこれらの特徴に基づいて移動される．ノードの移動量は左右方向 (x)，前後方向 (y)及び体軸方向 (z)のそれぞれについて計算される．x 軸方向について，ファジィ制御は以下に示すファジィ IF-THEN ルールを用いて，各ノードの移動量を決定する．

IF a_x is *small*　　THEN b_x is *small*.
IF a_x is *middle*　　THEN b_x is *middle*.
IF a_x is *big*　　THEN b_x is *big*.

ここで，$a_x \in \{g_x.\ n_x.\ s_x\}$ とし，g_x は注目ノードにおける管状組織密度分布の x 軸方向の微分値，n_x は注目ノードと隣接する 4 つのノードから求められる法線ベクトルの x 成分，s_x は注目ノードと隣接する 4 つのノードから求められるバネ張力ベクトルの x 成分，b_x は注目ノードの x 軸方向に沿った移動量である．すなわち，g_x は管状組織の密度の低い方への移動，n_x は面形状としての滑らかさ，s_x はノードの均一的な広がりを表す．$g_x.\ n_x.\ s_x$ は正規化され，−1.0 から 1.0 の範囲の値をとる．`small`，`middle` 及び `big` は

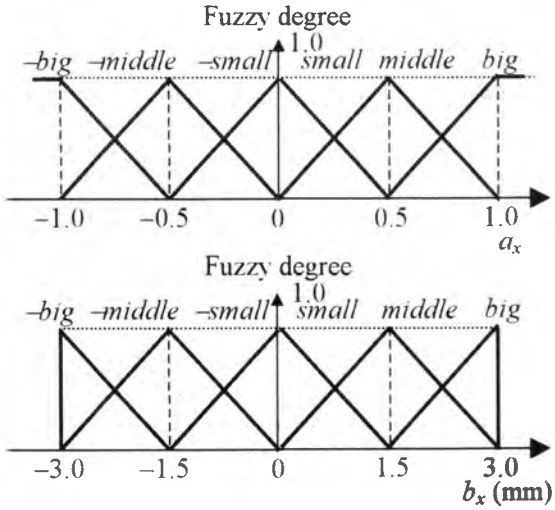


図3　ファジィメンバーシップ関数

図3に示すファジィメンバーシップ関数で定義されるファジィ集合である．なお，同図において符号「-」は x 軸に対する右の方向を表す．上述のファジィIF-THEN ルールによって，b_x に関して 3 つのファジィ集合が$\{g_x, n_x, s_x\}$のそれぞれから与えられる．本手法では MIN-MAX 推論法[4]をベースとした非ファジィ化を行う．ここでは，結果として得られる b_x に関する 9 つ(=3 つの特徴値×3 つのルール)のファジィ集合の MAX をとり，その重心 c_x を求める．y 軸，z 軸についても同様の処理を行い，重心 c_y, c_z を求める．よって，(c_x, c_y, c_z)が注目ノードの移動量として決定される．ここまでの処理を全てのノードに適用し，移動可能なノードがなくなるまで上記の処理を繰り返す．

以上のように初期境界面を肺葉境界にフィッティングし，得られた曲面を境界とした 3 次元ラベリングを行い，肺野領域を各肺葉へ分割する．

5．実験結果及び考察

本手法を健常者 4 名の胸部 MDCT 画像に適用した．健常者 1 の左肺の MDCT 画像と管状組織密度画像を図 4 に示す．同図において，CT 値が低い，または密度が小さいボクセルほど黒く描出されている．また，白い矢印で示すように斜裂は断層画像上では非常に細い線陰影として確認される．同図から，左肺斜裂すなわち肺葉境界では管状組織の密度が低いことが確認できた．なお，本実験では全ての例に対し，Th = 200 HU, r = 14 mm, L = 10 mm を用いた．

図 5, 6 に健常者 1, 2 の肺葉分割結果の立体表示画像を示す．また，全ての被験者に対する分割結果において各肺葉が占める体積の割合を表 2 に示す．これら肺葉の立体表示や体積測定は肺機能評価や術前計画の作成などに極めて有効である．

肺葉境界へのフィッティング処理に要した時間は，

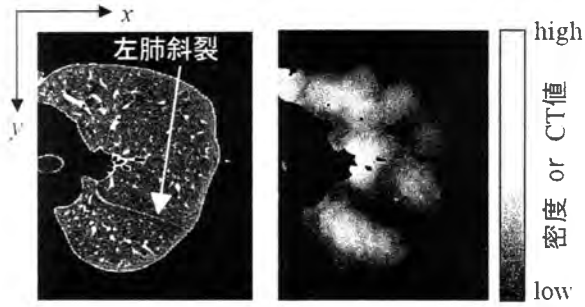
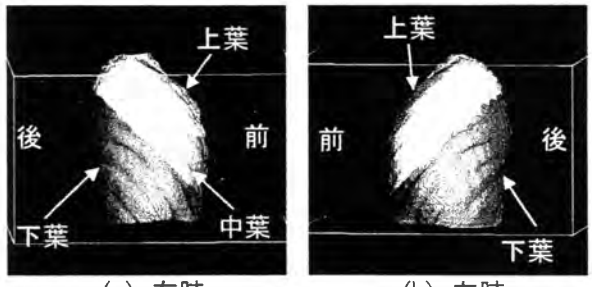
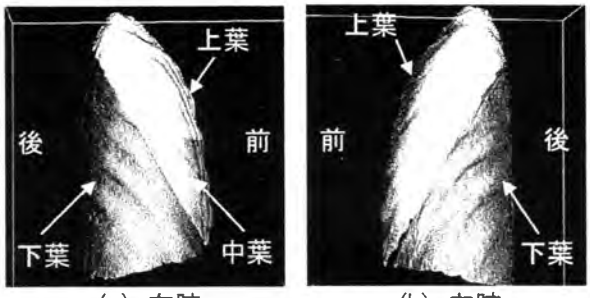


図4　MDCT 画像(左)と管状組織の密度画像(右)



(a) 右肺　(b) 左肺

図5　健常者 1 の肺葉分割結果



(a) 右肺　(b) 左肺

図6　健常者 2 の肺葉分割結果

表2　各肺葉の体積割合

		上葉	中葉	下葉	全体積
健常者 1	右肺	31.4 %	17.3 %	51.3%	3371.3 cc
	左肺	48.1 %		51.9 %	3069.7 cc
健常者 2	右肺	27.7 %	19.7 %	52.6 %	4989.6 cc
	左肺	56.6 %		43.4 %	3960.5 cc
健常者 3	右肺	33.1 %	16.9 %	50.0 %	4945.8 cc
	左肺	50.1 %		49.9 %	4524.3 cc
健常者 4	右肺	30.6 %	15.7 %	53.7 %	5573.8 cc
	左肺	45.0 %		55.0 %	4795.8 cc

ワークステーション(Linux, Pentium4 2.53 GHz Memory 2 Gbyte)上で，snakes[5]によるフィッティングでは 20 分以上であったのに対し，提案するファジィ制御によるフィッティングでは 1 分程度であった．従って，ファジィ制御を用いることによって，肺葉境界へのフィッティングを短時間で行うことができた．

肺葉分割結果の数値的な精度評価として，本手法によって推定された肺葉境界面と MDCT 画像上の

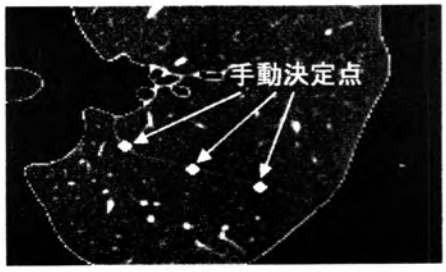


図 7　葉間裂の手動決定点の例

表 3　自動推定した肺葉境界面と手動で与えた葉間裂との比較(各 20 点の平均±分散)

	右肺斜裂 (mm)	右肺水平裂 (mm)	左肺斜裂 (mm)
健常者 1	3.2 ± 3.0	5.4 ± 2.8	3.0 ± 3.8
健常者 2	5.4 ± 4.2	8.3 ± 5.2	1.8 ± 1.2
健常者 3	6.1 ± 4.7	4.5 ± 3.0	3.4 ± 3.0
健常者 4	5.0 ± 3.5	5.8 ± 4.8	2.1 ± 2.7

葉間裂を比較した．一般に葉間裂は肺葉境界として完全な状態でCT画像上に描出されることが少ない．そこで，明らかに葉間裂と判断できる場所を左右肺においてそれぞれ 20 点手動で決定した．例えば，図 4 で示した左肺斜裂では，図 7 に示すような 3 点を決定した．ここで，提案法の精度を検証するため，各スライスの指定点から本手法によって推定された肺葉境界面までの最短距離を計測した．全被験者の肺葉分割結果に対する計測距離の平均と標準偏差を表 3 に示す．表 3 より，4 例とも本手法による肺葉分割精度は良好であったと言える．しかしながら，特に右肺において，手動で決定した葉間裂と本手法で推定した肺葉境界面との偏差が大きかった．その多くは肺野領域の境界付近で発生した．その原因として，肺野領域の境界付近では管状組織の密度が低いので，肺葉境界へのフィッティング時に肺野領域境界付近に配置されたノードが十分に移動できなかったからだと考えられる．本手法ではMDCT 画像上の葉間裂を検出せず，肺葉境界を周囲の管状組織の密度に基づいて推定するので，従来の葉間裂検出法と比較すると推定精度はやや劣る．しかし，本手法は不完全な葉間裂である分葉不全の場合でも肺葉分割を行える利点を有する．

6．むすび

本文では，管状組織情報に基づく胸部 MDCT 画像からの肺葉分割法を提案した．提案手法は肺葉境界では管状組織の密度が低くなるという知識をファジィ IF-THEN ルールで表し，ファジィ制御により肺葉境界面を自動推定する．本手法を健常者 4 名の胸部 MDCT 画像に適用した結果，良好に肺葉分割を行うことができた．しかしながら，主に肺野領域の境界付近において，手動により与えられた葉間裂と本手法によって推定された肺葉境界面との偏差がみられた．これは，肺野領域の境界付近では管状組織の密度が小さいので，フィッティングの時にノードが十分に移動できなかったためと思われる．しかし，本手法は分葉不全の肺に対しても肺葉分割を行える利点を有する．今後は精度向上のために，従来の葉間裂検出法と不完全な葉間裂にも適用できる本手法を組み合わせた肺葉分割法を検討する．

謝辞

本研究において実験で使用した MDCT 画像を提供して頂いた医療法人仁寿会石川病院に深く感謝致します．なお，本研究の一部は，医療法人仁寿会石川病院の援助を受けた．

参考文献

[1] R. A. Blechschmidt. R. Werthschutzky and U. Lorcher. "Automated CT Image Evaluation of the Lung: A Morphology-Based Concept." *IEEE Trans. on Medical Imaging*. vol. 20. no 5. pp. 434-442. May 2001.

[2] 財田伸介．安友基勝．久保 満．河田佳樹．仁木登．大松広伸．柿沼龍太郎．森山紀之．"葉間裂を用いた肺野区間分類の研究．" 信学技法．MI2002-102. pp. 37-41. Jan. 2003.

[3] M. Kubo. N. Niki, S. Nakagawa. K. Eguchi. M. kaneko. N. Moriyama. H. Omatsu. R. Kakinuma and N. Yamaguchi. "Extraction Algorithm of Pulmonary Fissures from Thin-section CT Image Based on Linear Feature Detector Method." *IEEE Trans. on Nuclear Science*. vol. 46. no. 6. pp. 2128-2133. Dec. 1999.

[4] Y. Hata. S. Kobashi. S. Hirano. H. Kitagaki and E. Mori. "Automated Segmentation of Human Brain MR Images Aided by Fuzzy Information Granulation and Fuzzy Inference." *IEEE Trans. Syst, Man, Cybern. C*, vol. 30. no. 3. pp. 381-395. Aug. 2000.

[5] T. McInerney and D. Terzopoulos. "Deformable Models in Medical Image Analysis: A Survey." *Medical Image Analysis*. vol. 1. no. 2. pp. 91-108. 1996.

[問い合わせ先]
〒671-2201 兵庫県姫路市書写2167
姫路工業大学大学院工学研究科 畑研究室 大川 喬弘
TEL:0792-67-4986　　FAX:0792-67-4986
E-mail: ohkawa@comp.eng.himeji-tech.ac.jp

ラプラシアンピラミッド表現に基づく画像の高解像度化

Super-resolution of digital image based on Laplacian pyramid representation

高橋靖正　　田口　亮
Yasumasa TAKAHASHI　　Akira TAGUCHI

武蔵工業大学工学部電気電子情報工学科
Department of Electrical and Electronic Engineering
Musashi Institute of Technology.

Abstract: Enlargement of digital images is one of the most basic processing. Image enlargement corresponds to narrowing the sampling interval of digital image. Thus, it is necessary to estimate the unknown higher-frequency components in the enlargement process. Recently, several methods, which include the prediction of unknown higher-frequency components, are proposed. We also proposed the image enlarging method based on Laplacian pyramid representation. However, we can get only a two times enlarged image by these methods. In this paper, we propose a new image enlarging method, which can realize an optional size enlarging based on a new Laplacian pyramid representation. The proposed method works well. And the computational effort of the proposed method is relative low.

1. まえがき

一度取得したディジタル画像の一部分を拡大表示したり，または，取得時に想定した画像サイズよりも大きなサイズが表示可能な表示装置を利用する場合など，ディジタル画像の拡大（解像度向上）処理は不可欠なディジタル画像処理の一つである．

ディジタル画像はデータ取得時のサンプリング間隔によって，画像の持つ最大周波数が決定されてしまう．画像を縮小することは，帯域を狭める処理であるから，従来の線形補間[1]や３次畳込み補間[1]などの利用によりほぼ問題なく行うことが可能である．しかしながら，画像の拡大とはサンプリング間隔を狭くすることと等価なため，拡大時に信号帯域の拡大を伴い，その拡大される帯域の高周波数成分を何らかの方法で推定する必要がある．

従来，ディジタル画像の拡大に対しても高周波数成分の推定を伴わない線形補間等の補間法が利用されてきた．当然，拡大率が高い場合，拡大画像にボケが生じることになる．近年，ディジタル画像拡大に対して，サンプリング時に失われた高周波数成分を推定する方法が提案されてきている[2]～[9]．その中で，文献[5]～[9]はラプラシアンピラミッド階層表現[10]に基づく方法である．

ラプラシアンピラミッド階層表現は帯域分割符号化を目的に明かにされたラプラシアン画像の多重解像度表現である．低階層（高解像度）のラプラシアン画像と高階層（低解像度）のラプラシアン画像間には強い相関があるため，その相関を利用して未知の低階層のラプラシアン画像を推定することで，未知の高周波数成分の推定を伴った拡大を成し遂げた方法が文献[5]～[8]である．それらの方法は，ラプラシアンピラミッドの階層表現に厳密に基づいていたため，いずれも２倍拡大に限定された方法となっていた．

従来のラプラシアンピラミッド階層画像は，ハーフバンドを通過帯域とするガウシアンフィルタとダウンサンプリングを連続的に施すことによって得られる．ここで，ガウシアンフィルタの通過帯域を変化させ，その帯域に応じた画素の間引き（補間）を行うことにより任意の階層間画像サイズ比率をもつ階層表現が可能となる．任意の画像サイズの比率をもつ階層間のラプラシアン画像にも従来のラプラシアンピラミッド階層画像間と同様の相関があることは言うまでもない．階層間の画像サイズの比率を任意にすることが推定する未知のラプラシアン画像サイズを任意サイズにすることに対応し，結果，任意拡大率をもつ画像拡大法が得られこととなる．この考え方に基づき筆者らは文献[9]において任意倍率拡大が可能な方法を提案した．文献[5]の方法同様に任意倍率可能な方法も２つのパラメータが介在しており，そのパラメータを適切に設定する必要がある．文献[9]においては，自然画像を用いて実験的にそれらパラメータの導出を行った．一方，文献[8]においては，文献[5]で明らかにされた２倍限定の拡大法に対して，２つのパラメータ導出をステップエッジ信号を用いて解析的に行っている．ここでは，推定された未知の低階層ラプラシアン信号の最大値と理想的なラプラシアン信号の最大値等を一致させるように２つのパラメータを求めている．

本論文では，文献[9]で提案した任意倍率設定可能な拡大法における２つのパラメータをステップエッジ信号を用いて解析的に導出する．すなわち，文献[8]の解析を任意倍率に一般化することになる．２つのパラメータは拡大率に依存するため，拡大率と２つのパラメータの関係を明らかにする．そして，導出されたパラメータの妥当性をそれらパラメータに設定した拡大法によって得られた拡大結果を用いて検証する．

2. ラプラシアンピラミッド階層表現に基づくディジタル画像の拡大法

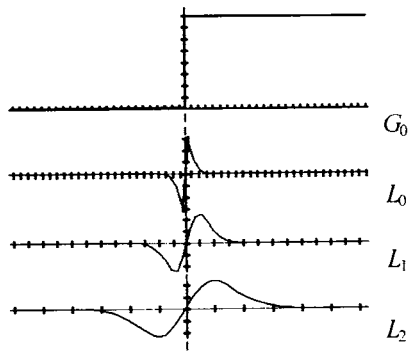


図1 ステップ信号のラプラシアンピラミッド

2.1 ラプラシアンピラミッドに基づく階層表現

ディジタル画像のピラミッド表現として低周波数成分の連なりであるガウシアンピラミッド表現と高周波数成分の連なりであるラプラシアンピラミッド表現がある．ガウシアンピラミッドは，原ディジタル信号にガウシアンフィルタ（W）処理とダウンサンプリング（DS）を1組とする処理を1回，2回，…，N回と繰り返し得られたガウシアン成分G_0，G_1，…，G_Nの連なりである．つまり，ガウシアン成分G_{n+1}は，

$$\bar{G}_{n+1} = W * G_n \tag{1}$$

$$G_{n+1} = DS(\bar{G}_{n+1}) \tag{2}$$

と与えられる．ここで，“*”は畳み込み演算を示す．また，このとき失われる高周波数成分をL_0, L_1, …, L_Nとし，この連なりをラプラシアンピラミッドという．ラプラシアン成分L_nは次式で算出される．

$$L_n = G_n - EXPAND(G_{n+1}) \tag{3}$$

$$EXPAND(G_{n+1}) = 4\times (W * G^0_{n+1}) \tag{4}$$

ここで，G^0_{n+1}はG_{n+1}に0を挿入（アップサンプリング）した信号であり，サイズはG_nと同じである．

なお，ラプラシアンピラミッド階層表現は画像の帯域分割符号化のために導出された表現であるため，G_nはG_{n-1}の縦横それぞれ2倍となっている．よって，G_0を原ディジタル画像とすれば，ガウシアン画像G_nは原ディジタル信号に対してその縦横サイズがそれぞれ2^{-n}倍の画像となる．

2.2 ラプラシアンピラミッド階層表現に基づくディジタル画像の任意倍率拡大法の考え方

1次元ステップ信号G_0に対するラプラシアンピラミッドを示したものが図1である．図1からステップエッジの位置はすべての階層のラプラシアン成分においてゼロクロスとして同じ位置に観測される．しかしながら，ゼロクロス近傍のラプラシアン成分の勾配は低階層（高解像度）信号ほど大きい．よって，高階層（低解像度）ラプラシアン成分のゼロクロス近傍の勾配を急峻にすることにより，低階層ラプラシアン成分が推定可能である[5]～[8]．その関係に基づけば，未知の高解像度信号G_{-1}は未知の高解像度ラプラシアン成分L_{-1}を推定することにより

$$G_{-1} = L_{-1} + EXPAND(G_0) \tag{5}$$

と求められることになる．なお，G_0が拡大対象画像であり，ラプラシアンピラミッド階層表現に基づいているため縦横G_{-1}はG_0の2倍のサイズの画像である．

未知の高解像ラプラシアン成分を求める方法の研究は文献[5]～[8]において成されてきている．しかしながら，それらの方法は2.1のラプラシアン階層表現に厳密に基づくため，拡大率は2倍に制限されていた．また，任意倍率への対応は2倍の手続きと高周波数成分の推定を伴わない補間（縮小）手続きを連続して施すことによって成されるものと考えていた．しかしながら，図1の関係は隣接2階層間のみ限定されたものではなく，さらに，ディジタル信号の拡大を考える場合，階層間のサイズの関係も互いに2倍に限定する必要がない．すなわち，式(5)は

$$G_r = L_r + (EXPAND)_r(G_0) \qquad (r<0) \tag{6}$$

のように0階層目と非整数階層rとの関係に一般化される．なお，G_rとはG_0に対して縦横サイズが2^{-r}倍の拡大画像である．

本論文では，式(6)におけるL_r（r：実数）をL_0から推定する手続きを文献[5]の考え方に基づき明らかにし，ディジタル画像の任意倍率拡大法に関する一提案を行う．

2.3 任意倍率拡大法への一般化[9]

ここでは，2.2の式(6)で示した考え方での任意倍率拡大法の説明を行う．具体的には式(6)における$(EXPAND)_r(G_0)$の導出法とL_rの推定法を明らかにすることである．

まず，式(6)の$(EXPAND)_r(G_0)$（$=\tilde{G}_r$）の算出方法について考える．$\tilde{G}_r$は非整数階層ガウシアン信号であるから，ガウシアン関数$W(x)$

$$W(x) = \frac{1}{2\sqrt{\rho\pi}} e^{-\frac{x^2}{\rho}} \tag{7}$$

を用いた補間により得ることができる．ρは通過帯域を考慮すれば$\rho=4/(9\pi)$となる．そして，拡大対象信号G_0の信号値 $g_0(i)$ (i=1, 2, 3, ..., M)からガウス関数による補間信号$\tilde{G}_r$の信号値 $\tilde{g}_r(j)$ [j =1, 2, 3, ..., (M×2^{-r})] が次式により求まる．

$$\tilde{g}_r(j) = \sum_{n=-2}^{2} W_r(n)\cdot g_0\left(\mathrm{int}\left(\frac{j}{2^{-r}}\right)+n\right) \tag{8}$$

$$W_r(n) = \frac{3}{4} e^{-\frac{9\pi}{16}(\Delta k - n)^2} \tag{9}$$

$$\Delta k = \mathrm{int}\left(\frac{j}{2^{-r}}\right) - \left(\frac{j}{2^{-r}}\right) \tag{10}$$

次に，Greenspanらによって提案されている非線形処理によるディジタル画像拡大法を考えてみる．Greenspanらの画像拡大法は，2.2で示した高階層（低解像度）ラプラシアン成分のゼロクロス近傍の勾配を大きくすることにより，低階層ラプラシアン成分が推定可能であることを利用し，拡大対象信号のラプラシアン成分L_0から一つ下の低階層（高解像度）のラプラシアン成分L_{-1}を推定する方法である．ラプラシアンピラミッド表現の基では隣接階層間の画像サイズの比は縦横とも2と限定されていた．しかしながら，非整数階層（任意倍率）の画像サイズへ

のガウス関数による補間が式(8)～(10)で可能となったため，Greenspanらの画像拡大法を非整数階層（任意倍率）における拡大法に拡張できる．すなわち，低解像度ラプラシアン成分L_0から式(8)を用い$(EXPAND)_r(L_0)$（$=\hat{L}_r$）を算出し，$\hat{L}_r$を用いて未知の高解像度ラプラシアン成分L_rを推定することにより，任意倍率可能なディジタル画像に対する拡大法が明らかにされる．

（手順1）

ラプラシアン信号$\hat{L}_r$の信号値$\hat{l}_r(i)$に対して定数倍としきい値処理を行う．

$$\bar{l}_r(i)=\alpha\times\begin{cases}T & if\ T\le\hat{l}_r(i)\\ \hat{l}_r(i) & if\ -T<\hat{l}_r(i)<T\\ -T & if\ -T\ge\hat{l}_r(i)\end{cases}\qquad(11)$$

$$T=(1-c)\times\hat{L}_{r\max}\qquad(12)$$

ただし，$\hat{L}_{r\max}$は$\hat{L}_r$の最大振幅値であり，“c”はしきい値，αは定数とする．ここで，αはゼロクロス近傍のラプラシアン成の勾配を急峻化させるパラメータで，しきい値cはラプラシアン成分の最大振幅を設定するパラメータである．

（手順2）

信号値が$\bar{l}_r(i)$であるラプラシアン成分$\bar{L}_r$にラプラシアンフィルタ処理を施し，未知のラプラシアン成分L_rの推定値とする．

$$\hat{L}_r=\bar{L}_r-W_r*\bar{L}_r\qquad(13)$$

以上の手続きで得た$\hat{L}_r$を式(6)のL_rに代入することにより，拡大画像G_rが求まることになる．

3. パラメータcとαの決定

ディジタル画像拡大法においては式(11), (12)における2つのパラメータcとαを適切に決定する必要がある．文献[8]において，2倍拡大限定ではあるが，この2つのパラメータをステップエッジ信号を用いて解析的に求めている．文献[5],[8],[9]の一連のラプラシアンピラミッド階層表現に基づく拡大法においてはステップエッジ信号が最も重要な信号となっていることからステップエッジ信号を取り上げることは妥当であろう．さらに，推定される高解像度ラプラシアン成分の最大値と理想的なラプラシアン成分の最大値を一致させ，かつ，ゼロクロス近傍のラプラシアン成分の勾配を合わせるようにパラメータの導出がなされている．そこで，以下では，文献[8]と同様に，ステップエッジ信号を用いて任意倍率拡大法に対する2つのパラメータを解析に導出することにする．なお，文献[8]の解析同様に，以下の解析においても拡大手続きの中の式(13)で示される手続きは省略して考える．

ステップエッジ信号をレンズ系からなる装置で取得し，サンプリング間隔"1"でディジタル化することを考える．レンズ系からなる装置の伝達特性はガウス関数でモデル化できることからステップエッジ信号のG_0成分は，文献[8]と同様に$\sigma_0=0.9$をもつガウス関数によってモデル化できる装置から取得されるものとする．

レンズ系で取得されたG_0成分のサンプリング間隔は“1”であるから任意倍率(2^{-r}倍)した信号のサンプリング間隔は“$1/2^{-r}$”となる．よって，サンプリング間隔と通過帯域の関係から，理想とする拡大されたステップエッジ信号成分G_rは，$\sigma_r=0.9/2^{-r}$のガウシアン関数でモデル化される装置によりステップエッジ信号を取得したものと仮定される．ステップ信号のG_0成分よりも高階層な成分G_1は式(1),(2)より，G_0成分に対して$1/2$に帯域を制限するガウシアンフィルタWを畳込みこむことによって得られる．よって，ステップエッジ信号のG_1成分は，$\sigma_1=1.345$（$\sigma_1^2=\sigma_0^2+\sigma_w^2$）のガウス関数でモデル化される装置でステップエッジ信号を取得したとも考えられる．

ここでは，まず，ステップエッジ信号$U(x)$のラプラシアン成分を$L_0\{U(x)\}$の最大値およびその位置を算出する．ラプラシアン成分を$L_0\{U(x)\}$は，

$$L_0\{U(x)\}=G_0\{U(x)\}-G_1\{U(x)\}\qquad(14)$$

となる．ここで，$G_i\{U(x)\}$はステップエッジ信号$U(x)$のG_i成分を示している．ステップエッジ信号をガウス関数をモデルとする装置で取得した場合の出力信号は，ガウス分布の累積度数分布で示される．ここで，平均0，標準偏差σ_iのガウス関数のxまでの累積度数分布を$ErrorF(x/\sigma_i)$とすれば，式(14)は

$$L_0\{U(x)\}=ErrorF(x/\sigma_0)-ErrorF(x/\sigma_1)\qquad(15)$$

となる．$L_0\{U(x)\}$の最大値をとる位置を$x=x_{\max}$とするとき，

$$ErrorF'(x_0\max/\sigma_0)-ErrorF'(x_0\max/\sigma_1)=0\qquad(16)$$

が成立し，よって

$$G(\sigma_0)_{x_0\max}-G(\sigma_1)_{x_0\max}=0\qquad(17)$$

となる．式(17)を解けば，

$$x_0\max=sqrt(2\log(\sigma_1/\sigma_0)/(1/\sigma_0^2-1/\sigma_1^2))\qquad(18)$$

となり，σ_0とσ_1を前述した値を用いれば，

$x_0\max=1.085$，$L_0(x=x_0\max)=0.097$　と求まる．

取得画像G_0と任意倍率画像G_r間で定義されるラプラシアン成分L_rの最大値およびその位置を同じ手続きで求めることができる．

$$x_r\max=sqrt(2\log(\sigma_0/\sigma_r)/(1/\sigma_r^2-1/\sigma_0^2))\qquad(19)$$

$$L_r(x=x_r\max)=ErrorF(x_r\max/\sigma_r)-ErrorF(x_r\max/\sigma_0)\qquad(20)$$

以上の情報から提案した方法を用いてL_0からL_rを推定する．推定するラプラシアン成分の最大値を一致させるためには式(11)より次式の関係が成立する必要がある．

$$\alpha\times(1-c)\times L_0(x=x_0\max)=L_r(x=x_r\max)\qquad(21)$$

さらに，$L_0\{U(x)\}$及び$L_r\{U(x)\}$でのゼロクロス近傍の傾きを等しくする条件を課す．

$$\alpha \times ErrorF'(x=0/\sigma_0) = ErrorF'(x=0/\sigma_r) \tag{22}$$

ここで，

$$\begin{aligned} ErrorF'(x=0/\sigma_0) &= G(\sigma_0)_{x=0} - G(\sigma_1)_{x=0} \\ &= (1/(\sigma_0 \times \sqrt{2\pi}) - 1/(\sigma_1 \times \sqrt{2\pi})) \\ &= 0.1467 \end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned} ErrorF'(x=0/\sigma_r) &= G(\sigma_r)_{x=0} - G(\sigma_0)_{x=0} \\ &= (1/(\sigma_r \times \sqrt{2\pi}) - 1/(\sigma_0 \times \sqrt{2\pi})) \\ &= (2^{-r} - 1)/(0.9 \times \sqrt{2\pi}) \end{aligned} \tag{24}$$

となる．よって，

$$\alpha = 3.012 \times (2^{-r} - 1) \tag{25}$$

であり，式(21)から

$$\begin{aligned} c &= 1 - (L_r(x = x_r \max)/\alpha L_0(x = x_0 \max)) \\ &= 1 - (L_r(x = x_r \max)/(0.293 \times (2^{-r} - 1))) \end{aligned} \tag{26}$$

が導かれる．

4. 適用例

3.で算出したパラメータを用いた提案法の有効性を示すために視覚評価を行う．Building画像（256×256サイズ，8ビット）を1.52（$r=-0.6$），2.00（$r=-1.0$），2.30（$r=-1.2$）倍に拡大した結果を図2に示した．図2のガラス窓の付近の拡大結果から分かるように，ボケが生じず，非常に鮮明であることがわかる．よって，提案法により，視覚的に最も敏感なエッジ部に劣化を生じさせずに拡大画像が得られることから，視覚特性の優れた手法とも言える．

(a) Original Image

(b) Enlargement scale = 1.52
α = 1.6,　C = 0.35

(c) Enlargement scale = 2.00
α = 3.0,　C = 0.45

(d) Enlargement scale = 2.30
α = 3.9,　C = 0.50

図2　拡大画像

5. むすび

本論文では，ラプラシアンピラミッド階層表現に基づく任意倍率設定可能な拡大法における2つのパラメータをステップエッジ信号を用いて解析的に導出した．この解析手法は，2倍拡大の場合に対して明らかにされていた．本論文はその解析方法を，筆者らが提案した任意倍率可能な拡大法へ適用した．提案法において，2つのパラメータは拡大率に依存するため，拡大率との関係の導出を行った．導出されたパラメータの妥当性は，導出したパラメータ値に設定した提案法による拡大結果より，明らかにした．

文献

[1] 高木幹雄，下田陽久監修，“画像解析ハンドブック，”pp.441-444，東京大学出版会，1991.

[2] 新堀英二，高木幹雄，“DCTを用いたGerchberg-Pappoulisの反復法を適用した高画質画像拡大，”信学論（D-II），vol.J76-D-II, no.9, pp.1932-1940, Sept. 1993.

[3] 田中　章，今井英幸，宮腰政明，伊達　惇，“多重解像度解析を用いたディジタル画像の拡大，”信学論（D-II），vol.J76-D-II, no.5, pp.819-825, May 1996.

[4] 中静　真，江部裕路，菊地久和，石井郁夫，牧野秀夫，“多重スケール輝度こう配平面における画像高解像度化，”信学論（D-II），vol.J81-D-II, no.10, pp.2249-2258, Oct. 1998.

[5] H.Greenspan and C.H.Anderson, “Image enhancement by non-liner extrapolation in frequency space,” SPIE Vol.2182 Image and Video Processing II, pp.2-13, 1994.

[6] 関和大介，田口　亮，村田　裕，“ニューラルネットワークを用いたラプラシアンピラミッドによるディジタル画像の拡大，”信学論(A), vol.J80-A, no.9, pp.1499-1508, Sept. 1997.

[7] 高橋靖正，田口　亮，“ラプラシアンピラミッド階層表現に基づくディジタル画像の一拡大法，”信学論(A), vol.J82-A, no.11, pp.1731-1740, Nov. 1999

[8] H.Greenspan, C.H.Anderson and S.Akber, “Image enhancement by nonlinear extrapolation in frequency space”, IEEE Trans. Image Processing, Vol.9, No.6, June 2000.

[9] 高橋靖正，田口　亮，“高周波数成分推定を伴う任意倍率可能な画像拡大法，”信学論（A），vol.J84-A, no.9, pp.1192-1201, Sept. 2001.

[10] P.J. Burt and E.H. Adelson,“The Laplacian Pyramid as compact image code,” IEEE Trans. Commun., vol.COM-31, pp.532-540, 1983.

Max t-ノルム合成ファジィ関係方程式に基づく動画像圧縮

A Motion Compression Method based on Max T-norm Composite Fuzzy Relational Equations

○延原 肇　　廣田薫

{nobuhara, hirota}@hrt.dis.titech.ac.jp

東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻

Tokyo Institute of Technology

A motion compression method by max t-norm composite fuzzy relational equations (MCF) is proposed, where a motion sequence is divided into intra-pictures (I-pictures) and predictive-pictures (P-pictures). The I-pictures and the P-pictures are compressed by using uniform coders and non-uniform coders, respectively. A design method of non-uniform coders is proposed to perform an effective compression and reconstruction of the P-pictures, based on an overlap level of fuzzy sets and a fuzzy equalization. An experiment using 10 P-pictures confirms that the root means square errors of the proposed method is decreased to 89.4% of that of the uniform coders, under the compression rate 0.0057. An experiment of motion compression and reconstruction is also presented to confirm the effectiveness of the MCF based on the non-uniform coders.

1 はじめに

ファジィ関係方程式に基づいた画像圧縮法 (ICF)[1] が提案されて以降、ファジィ行列理論、特にファジィ関係計算技法に基づく各種画像処理技術の提案・研究が行われている [2][3]。本研究では、ファジィ行列理論に基づく画像処理技術の新しい展開として、ファジィ関係方程式に基づいた動画像圧縮法 (MCF) を提案する。MCF では、対象の動画像を I フレーム (Intra-Frame) と P フレーム (Predictive-Frame) からなる静止画像系列と見なす。ここで I フレームは、原静止画像系列から適切に撰択したものであり、P フレームは、原静止画像系列の各画像間の差分に対応する。I および P フレームを、静止画像圧縮法 ICF[1] を用いて圧縮をおこなうが、P フレームのような画素値の分布に偏りがある場合、画像の局所部分を対象とする非一様分布型符号器の方が良い圧縮・再構成を実現できる。本研究では、P フレーム圧縮・再構成のための非一様分布型符号器の設計手法を、ファジィ集合のオーバーラップ・レベル [4] とファジィ量子化 [5] に基づき提案する。テスト用標準動画像'Tennis' から生成した P-フレームを用いて実験を行い提案設計手法の有効性を確認する。

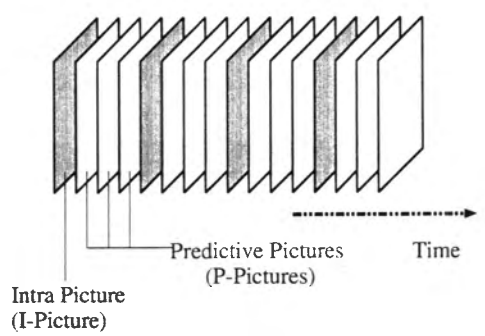


図 1: MCF における動画像表現

2 ファジィ関係方程式に基づいた動画像圧縮 (MCF)

2.1 MCF における動画像表現

ファジィ関係方程式に基づいた動画像圧縮法 (Motion Compression method by Fuzzy relational equations : MCF) では、動画像を P フレーム (Predictive-Frame) および I フレーム (Intra-Frame) からなる静止画像系列と見なす (図 1)。I および P フレームの例を図 2 に示す。I および P フレームの構成比率は、対象画像の特性および設計者の裁量に依存する。本研究では、この構成比率を、$I : P = 1 : 4$ に設定する。MCF では、これら I および P フレーム (各フレームサイズ $M \times N$ 画素) の各画素値を $[0, 1]$ に正規量子化することで、大きさ $M \times N$ のファジィ関係の系列 $\{R_1, R_2, \ldots, R_k, \ldots\} \subset F(\mathbf{X} \times \mathbf{Y}), \mathbf{X} = \{x_1, x_2, \ldots, x_M\}, \mathbf{Y} = \{y_1, y_2, \ldots, y_N\}$ として取扱う。これら静止画像を、順にファジィ関係方程式による静止画像圧縮法 (ICF)[1] で圧縮するが、図 2 に示すような P フレームの場合、画像全体に一様に符号器を配置するよりも、画素値の変化の急峻な部分

に集中して符号器を配置する、非一様分布型の方が良好な画像圧縮・再構成を実現できる。よって MCF では、図 3 に示すように I および P フレームを、一様分布型 ICF(U-ICF) と非一様分布型 ICF(N-ICF) で、それぞれ圧縮・再構成を行う。

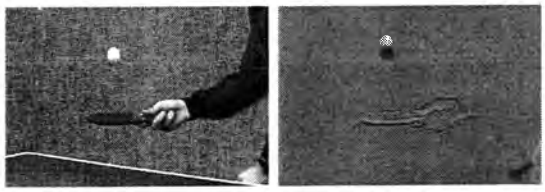


図 2: I フレーム (左) と P フレーム (右)

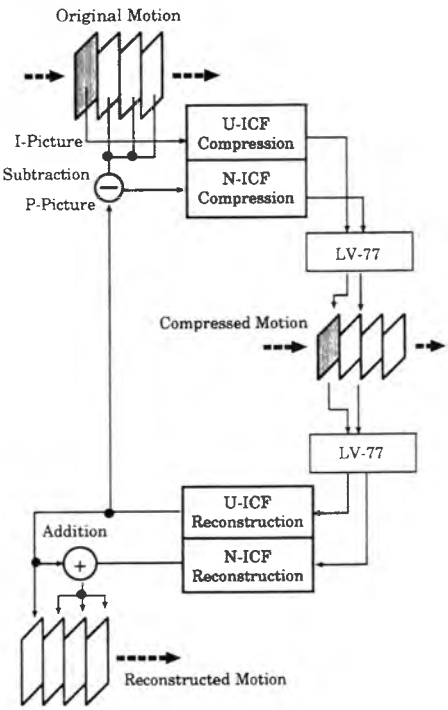


図 3: MCF の概要

2.2 U-ICF

U-ICF は I フレームを対象に圧縮・再構成を行う。まず静止画像系列内の k 番目の I フレーム、$R_k^{(I)} \in F(\mathbf{X} \times \mathbf{Y})$ を、ファジィ関係方程式

$$G_k^{(I)}(i,j) = \max_{y \in \mathbf{Y}} \left\{ B_j(y)\ t\ \max_{x \in \mathbf{X}} \left\{ A_i(x)\ t\ R_k^{(I)}(x,y) \right\} \right\}, \tag{1}$$

で圧縮を行う。ここで t は連続な t ノルムであり、$A_i \in \mathbf{A} \subset F(\mathbf{X})$ および $B_j \in \mathbf{B} \subset F(\mathbf{Y})$ は、

$$\mathbf{A} = \{A_1, A_2, \ldots, A_I\}, \tag{2}$$

$$A_i(x_m) = \exp\left(-Sh\left(\frac{iM}{I} - m\right)^2\right), \tag{3}$$

$$(m = 1, 2, \ldots, M),$$

$$\mathbf{B} = \{B_1, B_2, \ldots, B_J\}, \tag{4}$$

$$B_j(y_n) = \exp\left(-Sh\left(\frac{jN}{J} - n\right)^2\right), \tag{5}$$

$$(n = 1, 2, \ldots, N),$$

で定義する一様分布型符号器である。式 (1) により、サイズ $I \times J$ の圧縮ファジィ関係 $G_k^{(I)} \in F(\mathbf{I} \times \mathbf{J})$ を得る。U-ICF の画像再構成は、圧縮画像 $G_k^{(I)}$ および符号器 $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ が既知という条件下で、再構成画像 $\tilde{R}_k^{(I)} \in F(\mathbf{X} \times \mathbf{Y})$ を求める逆問題に定式化できる。この逆問題の近似解は、

$$\tilde{R}_k^{(I)}(x,y) = \min_{j \in \mathbf{J}} \left\{ B_j(y) \varphi_{t'} \min_{i \in \mathbf{I}} \left\{ A_i(x) \varphi_{t'} G_k^{(I)}(i,j) \right\} \right\}, \tag{6}$$

で求めることができる [1]。ここで $\varphi_{t'}$ は t-相対擬補元であり

$$a \varphi_{t'} b = \sup\{c \in [0,1] | at'c \leq b\}, \tag{7}$$

で定義され、t ノルム t' は、以下の条件

$$a, b \in [0,1], \quad atb \leq at'b. \tag{8}$$

を満たすように選択する。

2.3 N-ICF

非一様分布型符号器を用いた N-ICF は、P フレームを対象に圧縮・再構成を行う。N-ICF が U-ICF と異なる点は、式 (1) および (6) の符号器 $\mathbf{A}$ および $\mathbf{B}$ の符号器を非一様に分布させることである。N-ICF の場合、良好な P フレームの画像圧縮・再構成を行う鍵は、符号器 $\mathbf{A}$ および $\mathbf{B}$ の設計にある。本研究では、P フレームの標準偏差に対しファジィ量子化 [5] を適用し、ファジィ集合のオーバーラップ・レベルを利用して符号器を適切に分布させる設計法を提案する。

3 非一様分布型符号器設計法

P フレーム圧縮・再構成のための非一様分布型符号器設計手法を以下に示す。この節では、簡単化のために符号器 $\mathbf{A}$ の設計手順についてのみ説明する。まず、符号器 $\mathbf{A}$ を構成するファジィ集合を、以下のような非対称ガウス型ファジィ集合とする。

$$\mathbf{A} = \{A_1, A_2, \ldots, A_I\}, \tag{9}$$

$$A_i(x_m) = \begin{cases} \exp\left(-Sh_{left}^{(A_i)}(A_i^c - m)^2\right), \\ \quad if\ m \leq A_i^c, \\ \exp\left(-Sh_{right}^{(A_i)}(A_i^c - m)^2\right), \\ \quad if\ m > A_i^c, \end{cases} \tag{10}$$

$(m = 1, 2, \ldots, M)$.

ここで A_i^c は、ファジィ集合 A_i の中心を表し、$Sh_{left}^{(A_i)}$ および $Sh_{right}^{(A_i)}$ はファジィ集合 A_i の左右の拡がり具合を表す。非一様分布型符号器を設計することは、これらのパラメータを適切に調整することに対応する。

1. P フレームの y 軸方向についての標準偏差 $\sigma(x_m)$ を

$$\sigma(x_m) = \frac{1}{N}\{\sum_{y\in\mathbf{Y}}(R_k^{(P)}(x_m, y) - E(x_m))^2\}, \quad (11)$$

$$E(x_m) = \frac{1}{N}\sum_{y\in\mathbf{Y}} R_k^{(P)}(x_m, y), \quad (12)$$

$(\mathrm{m} = 1,\ldots,\mathrm{M})$,

で計算する。

2. 等分割指標 σ_T/I を

$$\sigma_T/I = \frac{1}{I}\sum_{x\in\mathbf{X}}\sigma(x), \quad (13)$$

で計算する。

3. $\mathbf{X}$ の最小要素 x_{min} から出発し,

$$\sum_{x\in\mathbf{X}}\sigma(x) \quad (14)$$

が等分割指標 σ_T/I に一致する場合の $\mathbf{X}$ の最大要素 x_{max} を求める。この最小要素および最大要素によって構成する区間 $\{x_{min}, \ldots, x_{max}\}$ を π_i とする 。最大要素 x_{max} を、x_{min} に置き換え、次の区間 π_{i+1} を求める処理を続ける (ファジィ量子化 [5])。

4. ステップ 3 で得られた中心 A_i^c、および 式 (9) - (10) に基づき、符号器 $\mathbf{A}$ を初期化する。図 4 は求めた区間、図 5 はファジィ集合 A_i の中心、およびそれに基づきファジィ集合を初期化したところを示している。

5. 符号器 $\mathbf{A}$ 内の隣り合うファジィ集合間 $A_{i-1}, A_i \in \mathbf{A}$ のオーバーラップ・レベル $\alpha(A_{i-1}, A_i)$ を、

$$\alpha(A_{i-1}, A_i) = \min_{x\in\mathbf{X}_{(i-1)}^{(i)}}\{\max(A_{i-1}(x), A_i(x))\}, \quad (15)$$

で定義する。ここで $\mathbf{X}_{(i-1)}^{(i)} = \{x_m \in \mathbf{X} | A_{i-1}^c \le x_m \le A_i^c\}$ である。このオーバーラップ・レベルに基づき、各ファジィ集合の拡がり具合を以下の手順で調整する (図 5)。

5-A) もし $\alpha(A_{i-1}, A_i) \ge \alpha_{opt} + \epsilon$ ならば、ファジィ集合 A_{i-1} の $Sh_{right}^{(A_i)}$ および A_i の $Sh_{left}^{(A_i)}$ を小さくする。ここで α_{opt} は、最適オーバーラップ値 0.85 を表し [4]、更新係数 ϵ は 0.05 に設定する.

5-B) もし $\alpha(A_{i-1}, A_i) \le \alpha_{opt} - \epsilon$ ならば、ファジィ集合 A_{i-1} の $Sh_{right}^{(A_i)}$ および A_i の $Sh_{left}^{(A_i)}$ を大きくする。

5-C) もし $\alpha_{opt} - \epsilon \le \alpha(A_{i-1}, A_i) \le \alpha_{opt} + \epsilon$, を満足すれば、$A_{i-1}$ および A_i の調整を終了する。

6. $\mathbf{A}$ 内のファジィ集合すべてに対し、ステップ 5 の処理を繰り返す。

この設計手法では、$\mathbf{A}$ の最右端と最左端のファジィ集合は台形型のファジィ集合として取扱う (図 5)。

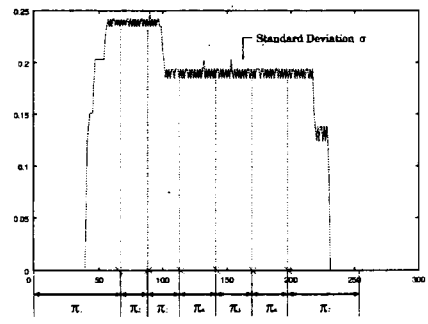


図 4: P フレームの標準偏差 $\sigma(x)$ およびファジィ量子化

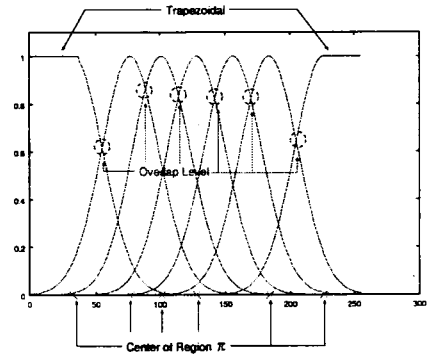


図 5: 符号器 $\mathbf{A}$ のオーバラップ・レベルと配置の様子

4 画像圧縮・再構成実験

4.1 P フレーム圧縮・再構成実験

標準動画像データベースより選定した'Tennis' から、図 2(右) に示すような P フレームを 10 枚作成する。この 10 枚の P フレーム (画素数 352 x 240) を、一様分布型符号器および非一様型符号器 $\mathbf{A} = \{A_i \in F(\mathbf{X}), i = 1, \ldots, 88\}$ $\mathbf{B} = \{B_j \in F(\mathbf{Y}), j = 1, \ldots, 60\}$ で圧縮・再構成を行う。表 1 に、それぞれの圧縮率および平均 2 乗誤差根を示す。(ここで、圧縮率は ρ = 圧縮後のファイルサイズ/原フレームのファイルサイズ、と定義する。) 表 1 より、P フレーム圧縮・再構成のための非一様分布型符号器設計法の有効性が確認できる。

表 1: 平均 2 乗誤差根の比較

Compression Rate	RMSE (N-ICF)	RMSE (U-ICF)
0.0057	9.899	11.071

4.2 MCFによる動画像圧縮・再構成

図6に示すような動画像'Tennis'(静止画像系列)を、図3に示すU-ICFおよびN-ICFを組み合わせたMCFで圧縮･再構成を行う。ここで、I-フレーム圧縮を一様型符号器 $\mathbf{A} = \{A_i \in F(\mathbf{X}), i = 1, \ldots, 176\}$ $\mathbf{B} = \{B_j \in F(\mathbf{Y}), j = 1, \ldots, 120\}$ で圧縮・再構成を行い、P-フレーム圧縮を非一様型符号器 $\mathbf{A} = \{A_i \in F(\mathbf{X}), i = 1, \ldots, 88\}$ $\mathbf{B} = \{B_j \in F(\mathbf{Y}), j = 1, \ldots, 60\}$ で圧縮・再構成を行う。図7にMCFによる再構成フレーム系列を示す。

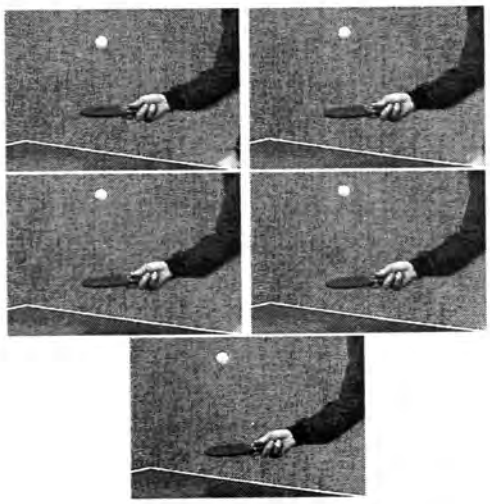


図6: 原フレーム系列

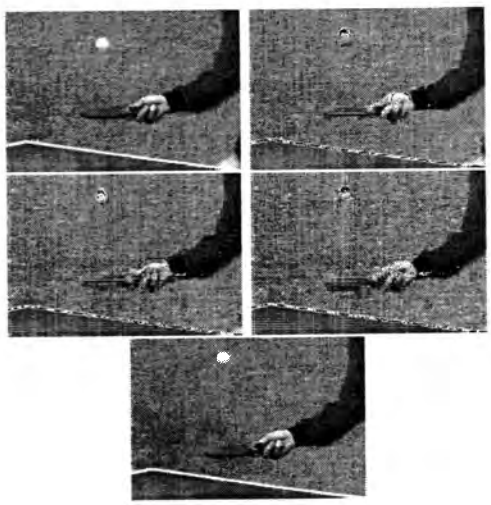


図7: MCFによる再構成フレーム系列

5 おわりに

ファジィ関係方程式による動画像圧縮法(MCF)において、効率的なPフレーム圧縮・再構成のための非一様分布型符号器設計手法を、ファジィ量子化およびオーバーラップ・レベルに基づき提案した。テスト用動画像'Tennis'から作成した10枚のPフレームを用いた画像圧縮・再構成実験において、提案手法に基づき設計した非一様分布型符号器の方が、一様分布型に比べ、圧縮率0.0057の条件下、平均2乗誤差根が89.4%減少することを確認した。さらに、IおよびPフレームの構成比率 $I : P = 1 : 4$ の条件下、MCFによる動画像'Tennis'の圧縮・再構成例を示した。

参考文献

[1] H. Nobuhara, W. Pedrycz, and K. Hirota, "Fast Solving Method of Fuzzy Relational Equation and its Application to Image Compression/Reconstruction," *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, Vol. 8, No. 3, (2000) 325–334

[2] H. Nobuhara, K. Hirota, S. Sessa, and W. Pedrycz, "Fast Iterative Methods of Decomposition of a Fuzzy Relation for Image Compression/Decompression Processing," *Soft Computing Journal*, (to appear)

[3] H. Nobuhara, and K. Hirota, "Eigen Fuzzy Sets of Various Composition and their Application to Image Analysis," *The 7th World Multi Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2003)*, Orlando, USA, July 27-30, (2003).

[4] H. Nobuhara, W. Pedrycz, and K. Hirota, "Fuzzy Relational Image Compression using Non-uniform Coders Designed by Overlap Level of Fuzzy Sets," *International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD'02)*, CD-ROM Proceeding, (2002), Singapore.

[5] W. Pedrycz, "Fuzzy equalization in the construction of fuzzy sets," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 119, no. 3, pp. 329-335, (2001).

[問い合わせ先]
〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259
東京工業大学大学院総合理工学研究科

延原 肇
Tel:045-924-5682, Fax: 045-924-5676
E-mail: nobuhara@hrt.dis.titech.ac.jp

視覚的類似性に基づくトップページ検索手法の提案

Finding Top Page Based on Web Page Similarity as Image

三橋 憲晃 Noriaki Mitsuhashi
山口 亨 Toru Yamaguchi
高間 康史 Yasufumi Takama

東京都立科学技術大学
Tokyo Metropolitan Institute of Technology

Abstruct: When we search information on the Web using search engines, they only analyze the text information collected from the source files of Web pages. However, there is a limit to analyze the layout of a Web page only from its source file, although Web page design is the most important factor for a user to estimate a page. In particular, it often happens on the Web that the pages of similar design offer similar information. We propose a method to compare the design of pages by treating the displayed page as image.

1 はじめに

ネットワーク上の情報は膨大であり，必要としている情報を検索する手法が重要である．ネットワーク上で情報検索を行う際，検索エンジンではWebページのソースファイルから抽出したテキスト情報を用いている [1]．しかし，ソースファイルからテキスト情報を集めるだけでは，Webページのレイアウトや表示された時の様子を解析するには限界がある．実際にはWebページを見る際，人間はソースファイルの情報ではなく画面上に表示されたものを視覚的に捉え情報を集めていると考える．そこで本稿では，類似した情報を提供しているWebページでは，デザインが似ている場合が多いことに注目し，Webページを視覚的に画像として扱う事によりデザインの比較を行う方法を提案する．提案手法により，トップページなどの特徴的なページを判定可能である事を実験により示す．

2 webページ比較方法の概要

まず，目的のWebページを画像に変換し，エッジを検出するために輝度成分であるY画像と色差成分であるCb,Cr画像へ変換を行う．輝度成分は，人間の視覚にあたえる影響が大きいためY画像を用いて処理を行う．Y画像をn×n画素ブロックに分割し，ブロックの平均値を求め，ブロック平均値で各画素値を割った値を用いてエッジ検出を行い，2値化された画像を抽出する．2値化された画像をもとに文字・画像などの分類を行う．

3 レイアウト解析方法

Webページを比較する前処理のレイアウト解析法について説明する．本節では，文字・画像を一つの領域として分割し，判別する方法を述べる．

3.1 エッジ検出

まず，エッジ検出を行う前に対象画像をRGB空間からYCbCr空間へと変換を行いY空間を用いて処理を行う．これはエッジ検出を行う際，RGBすべての値に対し処理を施すよりY空間だけで処理を行ったほうが効率的だからである．エッジ検出では，Y画像を2×2画素ブロックに分割し，それぞれのブロックで平均値Xを算出する．算出されたブロック平均値Xで各画素値x_iを割った値α_iを求める．

$$\alpha_i = \frac{x_i}{X} \quad \begin{array}{l} x_i : \text{画素値} \\ X : \text{ブロック平均値} \end{array} \tag{1}$$

このα_iの平均値は，隣接画素間の相関性の高さから$\alpha_i = 1.0$に集中するため，α_iはブロック平均値に対する急峻性を表していることになる．つまり，$\alpha_i = 1.0$が平坦部であり，$\alpha_i = 1.0$から離れると急峻性が高くなる [2]．その特徴を利用し，α_iがある閾値を超える場合エッジ部と判定しエッジ検出を行う．

3.2 Webページにおける領域分割法

エッジ検出を行い2値化された画像を用いて，領域分割を行い文字・画像を一つの領域として抽出する．Webページでは文字・画像などが混在しているが，文章や画像など一つのまとまった領域は，文字・画像のエッジ間の距離が小さい．逆に，文章と画像など違った情報の領域は同じ種類の領域に比べエッジ間の距離が大きい．今回は，エッジ間の距離dを用いて領域分割を行った．領域分割を行う際に閾値aを定め，距離dが閾値aを超えるかどうかで同じ領域に属するかの判定を行う．また，背景色の変化などによるエッジや閾値の値によって目的の領域より大きいサイズで領域分割されてしまうことがある．この問題を解決するために，一定の大きさを超える領域では，さらにその領域内で

閾値 a の値を小さくし領域分割行う．この操作を施すことにより正確に領域を検出しやすくする．

3.3 文字・画像の抽出

文字列を含む領域は図 1 に示すように，ラスター方向に検索をしていくとエッジが検出されるピクセル列と検出されないピクセル列が現れる．文字列を抽出する際，最初に検出されたピクセル列からエッジが検出されないピクセル列までの位置情報を記録しておき，その部分で文字かどうかの判断を行う．図 2 に示すように，一定の間隔でエッジが連続して出現した場合文字と判断する．また，画像やイラストの場合不規則にエッジが出現したり，エッジが検出されないピクセル列がなかったりする．その場合，画像・イラストと判断する．また，その両方が存在する場合その領域を画像・文字の混ざった領域とみなす．この処理を行うことで，抽出された領域の属性を決めることができる．

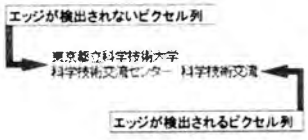


図 1: 文字列検出

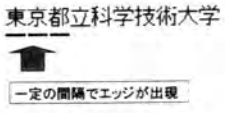


図 2: 文字判断

4 Web ページの比較方法

抽出された領域のレイアウトによって Web ページを比較する方法を提案する．Web ページから抽出された領域の属性は文字・画像・文字と画像の 3 つに定め，それぞれ重み付けを行い Web ページを 1 つのパターンとみなす．重み付けは正の値を用い，文字を 1，画像を 2，文字と画像を 3，その他を 0 と画素単位で設定しベクトルを生成した．比較する 2 つの Web ページのパターンを，$\mathbf{w_i}$, $\mathbf{w_j}$ とベクトルで表現した時の距離 S_w は，式 2 で表される．

$$S_w = \frac{\mathbf{w_i} \cdot \mathbf{w_j}}{\| \mathbf{w_i} \| \cdot \| \mathbf{w_j} \|} \qquad (2)$$

S_w は 0 ～ 1 をとり，1 に近づくほど比較した 2 つの距離が近いことを示している．

5 結果

図 3 に Web ページの原画像を，図 4 に Web ページを領域分割した結果を示す．また，Web ページの比較については，表 1 と表 2 に示す．領域分割では，図 4 からわかるようにおおむね正確に領域分割を行うことができている．表 1 と表 2 では，検索サイトである goo と他の Web ページとの比較を示しているが，レイアウトによって単純類似度を算出し比較を行った結果と視覚的な判断を行った結果において，ほぼ同等の結果を得ていることがわかる．

表 1: 単純類似度

ページ名	類似度
yahoo!	0.522
infoseek	0.503
onkyo	0.300
daihatsu	0.299

表 2: 視覚的評価

ページ名	視覚的判断
yahoo!	6/7[人]
infoseek	7/7
onkyo	0/7
daihatsu	0/7

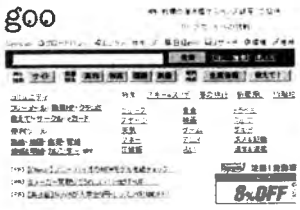


図 3: 原画像

図 4: 領域分割画像

6 まとめ

6.1 結論

本稿では，Web ページを視覚的に画像として扱う事によりデザインの比較を行う方法を提案した．Web ページを画像として扱い，領域分割を行って目的の領域を抽出することができ，レイアウトを解析し類似度を計算することによって Web ページの比較を行うことができた．また，Web ページ比較の結果と人間の評価ついてほぼ同一の結果を示せた．今後の課題として，カラーヒストグラムなどを用いた文字・画像抽出の精度の向上や Web ページの比較に背景色などを用いる事が考えられる．

参考文献

[1] Sergey Brin, Lawrence Page "The Anatomy of a Large-Scale Hypertextual Web Search Engine" Computer Networks and ISDN Systems, vol.30, no.1-7, pp.107-117, 1998.

[2] 松坂　健治，佐藤和弘　「凹凸係数を用いた画像処理アルゴリズムの検討」　電子情報通信学会 2001 大会論文集, D-11-57, pp142 (2001)

連絡先:
〒 191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6
東京都立科学技術大学　三橋　憲晃
E-mail:noriaki@krectmt3.tmit.ac.jp

交通事故推計のためのファジィ推論モデルの作成

Construction of Fuzzy Reasoning Model for Traffic Accidents Estimation

村瀬　満記　　秋山　孝正　　奥嶋　政嗣
Mitsunori MURASE　　Takamasa AKIYAMA　　Masashi OKUSHIMA
岐阜大学大学院　　岐阜大学　　岐阜大学
Graduate School of Gifu University　　Gifu University　　Gifu University

Abstract　The causality of the plural factors have to be clarified in the estimation of traffic accidents at the intersection. Simultaneously, the high estimation accuracy in the modeling is necessary. The model with fuzzy reasoning was introduced to the estimation of the number of traffic accident in the intersection. The parameter of membership function is optimized by learning with the neural-network.

1．はじめに

都市道路網における有効な交通安全対策立案のためには、交通事故多発交差点の的確な交通事故要因の把握と、交通事故軽減効果の推定が必要不可欠である。すなわち経年的な交通事故状況から、効果的な交通安全対策を導出できる知識を蓄積する。

このため本研究では、交差点交通事故推計において、ファジィ推論を用いた知識利用型モデルを構築する。言語変数を基本とした知識ベースを構成することで、交通安全対策の現実的検討における知見が整理され、交通事故推計過程が明確となる。これにより、交通安全対策の与える交差点交通事故発生要因の減少に関する意味論的な分析が可能となる。したがって、効果的な交通安全対策の導出を目指した交通事故推計が可能となる。

2．ファジィ推論による交通事故推計モデル

(1) 交差点交通事故推計の概要

本研究では、図1に示す岐阜市内の交通事故多発地点24箇所を対象とする。ここで、事故多発地点とは、年間の交通事故の発生が20件を超える交差点をいう。また、交通事故件数は、人身事故・物損事故からなる件数である。

交通事故件数推計に関しては、既存研究において階層型ニューラルネットワークを用いた事故類型区分別推計モデルが提案されている[1]。ここでは、事故の発生に対してその要因を明確に表現できるファジィ推論を用いることを検討する。

交通事故の発生を減少させるため、都市道路網に

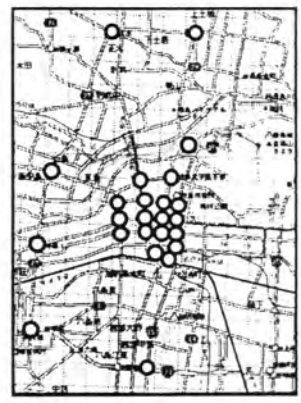


図1　岐阜市における対象交差点

おける道路交差点において、有効な交通安全対策案立案を実施することを考える。そのため、各年次におけるそれぞれの交差点の状況から、その年に発生する交通事故件数を予測する推計モデルを構築する。

交通事故に関わる要因を表す数値として、H7からH12までの各交差点における交通流動、交差点構造、交通事故防止対策に関するデータを用いる。この具体的な例として、図2にパチンコサミット前交差点の場合を挙げる[2]。事故に関わる指標のうち、交通安全対策に関わるものは、「明色滑り止め舗装」、「視線誘導標の設置」がある。また、この交差点には、つぎに挙げるような構造的危険要因が存在する。①北側道路がカーブしている、②道路の交差が直角でない、③東進方向の右折車線が2車線設置されている、の3点である。これらの要因も交通事故指標として推計モデルに反映される。

これらを用いて説明変数を設定し、ファジィ推論モデルを構築したうえで、交通事故件数推計を行う。

(2)　ファジィ推論モデルの構築

前節において整理した交通事故発生に関連する指標を用い、交通事故推計モデルを構築する。この際、H7からH9の3年分のデータを構築用として用いた。各種のパラメータの値は、この3年分のデータをもとに決定していく。さらにH10からH12までのデータを検証用として用い、モデルの再現性を検証する。

ここでは蓄積した知識をもとに、交通事故発生要因を、10種類の変数として整理した。ここでの要因は、多数の測定可能な変数から構成できる。

つぎに、交通事故発生要因と交通事故件数の関係を推定するファジィ推論モデルを構築する。ここでは、簡略ファジィ推論を用いて、基本的なルール構成を考えたモデルを構築する（これを「基本モデル」とする）。また、前件部のメンバシップ関数には、(1)式に示すGaussian関数（釣鐘型メンバシップ関数）を用いる。例として、交通量のメンバシップ関数を図3に示す。言語変数に関しては、small、medium、large、very largeの4ラベルを設定した。関数の形状を規定する各パラメータ値は、各交差点における交通量の値のばらつきを考慮し、試行錯誤法により決定した。

$$\mu_k(x) = \exp(-\frac{(x-a_k)^2}{b_k}) \quad \cdots (1)$$

交通事故の発生メカニズムは、言語的には理解できるが定量的には把握の難しい部分もあり、ファジィ推論の導入により、明示的な交通事故発生状況を記述した推計モデルが作成できるものと思われる。

つぎに、各要因に対応した推論ルールを決定する。規定された推論ルールを、図4に示す。例としてルール18は、車線における変形度が大きいために、発生する交通事故は非常に多いことを示す。

(3)　交通事故推計結果の検討

ここでは、ファジィ推論モデルの構築のために、H7～H9の交通事故関連データを用いた。ファジィ推論モデルを規定するパラメータ決定は試行錯誤法により、これら3箇年の実績に対する適合性をもとにモデルを規定した。これより、経年的な推計が可能となった。推計結果としては、絶対誤差の総和707.9、RMSE=11.9となった。

また、今回のモデル作成時には使用していないデータ（H10からH12まで3年間）をモデル検証用として利用する。検証用データにおける推計結果を、図5に示す。パラメータ推計時の現況再現結果（H7～H9）と比較して、推計精度の低下がみられる。

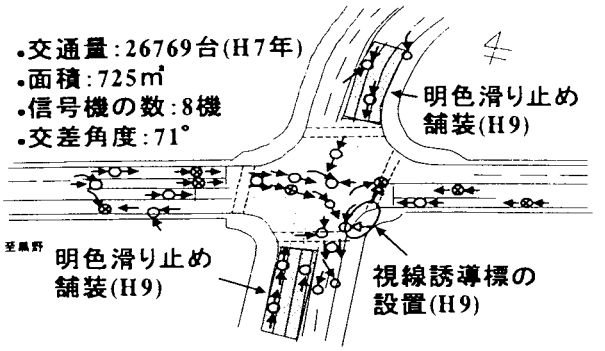


図2　パチンコサミット交差点における交通事故指標

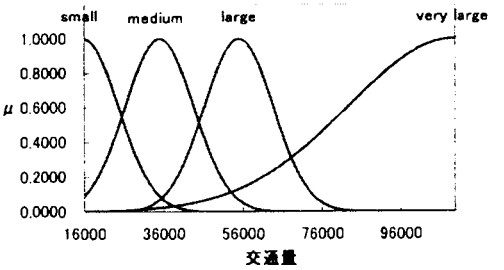


図3　交通量メンバシップ関数

Rule-1	if TDE	is small	then TAC	is small
Rule-2	if TDE	is medium	then TAC	is medium
Rule-3	if TDE	is large	then TAC	is large
Rule-4	if TDE	is very large	then TAC	is very large
Rule-5	if SPA	is small	then TAC	is small
Rule-6	if SPA	is medium	then TAC	is medium
Rule-7	if SPA	is large	then TAC	is large
Rule-8	if SPA	is very large	then TAC	is very large
Rule-9	if SPE	is medium	then TAC	is large
Rule-10	if SPE	is large	then TAC	is very large
Rule-11	if ATT	is large	then TAC	is small
Rule-12	if DRI	is large	then TAC	is very large
Rule-13	if LAM	is medium	then TAC	is medium
Rule-14	if LAM	is large	then TAC	is small
Rule-15	if PST	is large	then TAC	is large
Rule-16	if IND	is large	then TAC	is small
Rule-17	if SAF	is large	then TAC	is small
Rule-18	if PLA	is large	then TAC	is very large

TAC:交通事故件数

TDE：交通流　　LAM：灯機整備水準
SPA：交差点規模　　PST：構造的変形度
SPE：車両走行状態(スピード)　　IND：標示等誘導性
ATT：視認性程度　　SAF：歩行者安全性
DRI：運転難易性(錯綜度合い)　　PLA：車線変形度

図4　ファジィ推論のルール

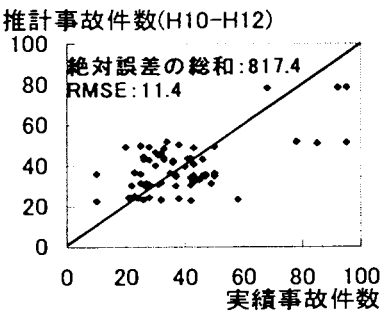


図5　検証用データによる推計精度

3 箇年分の検証用データ全体を通して特に推計誤差が過大となったのは、金華橋交差点である。H11の実績値が58件であるのに対し、推計値は23.5件となり、著しく過少に推計された。この交差点の最大の特徴は、その形状がT字型であるという点である。このため、右左折交通量が通常の交差点より多く、このとき追突や右折時衝突の事故が多発する。現行モデルではこの誘因を考慮し、推論ルールに導入している。しかしながら、T字型形状の交差点の危険性をさらに推計モデルに反映させる必要がある。

3．ファジィニューロによる交通事故推計

本章では、推計精度の高いモデルの構築を目指して、ニューロ的ファジィモデルによる交通事故件数推計を行う。推計事故件数の実績との比較により、ファジィニューロモデルの適用について検討する。

(1) ニューロ的ファジィモデルの構築

ここでは、さきの簡略ファジィ推論による「基本モデル」のルール構成に関しては変更せず、パラメータ推計に関して、ニューロ的ファジィモデルの方法を用いる[3),4)]。これを「改良型モデル」とする。具体的には、簡略ファジィ推論の前件部であるメンバシップ関数をRadial Basis Functionsとみなし、H7～H9の3年次における対象24交差点すべての交通事故件数実績データを教師データとして、ニューラルネットワーク的な学習により、メンバシップ関数のパラメータを推定する。ここでは5000回の学習により、36のパラメータを推定する。

(2) 推計モデルの比較検討

ニューロ的学習に用いたH7～H9の3年次における事故件数推計結果と実績値の比較を図6に示す。ここでは実績件数の少ない場合には過大推計、件数の多い場合には過小推計の傾向である。ニューロ的学習により、事故件数実績と推計の乖離は、「基本モデル」と比較し、減少はしているものの、ニューロ的ファジィモデルでは、再現精度の面では大きな向上が示されていない。

また、学習結果から、メンバシップ関数の形状が決定されるが、その一例として交通量のメンバシップ関数を図7に示す。ここでは、「large」、「medium」などが基本モデルの設定から大きく変化した。ニューロ的学習により、高度な非線形モデルが形成されたといえる。しかしながら、このメンバシップ関数の相互関係は、設定した言語変数の意味が反映されておらず、ルール構成を含めて再考する必要がある。

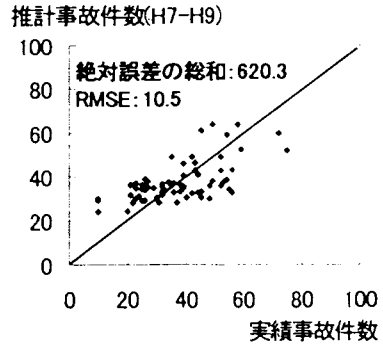


図6 ファジィニューロによる再現精度

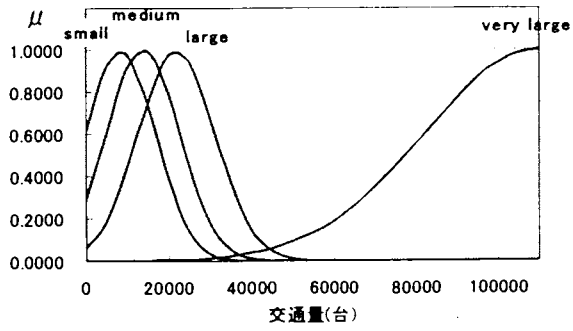


図7 交通量のメンバシップ関数（学習後）

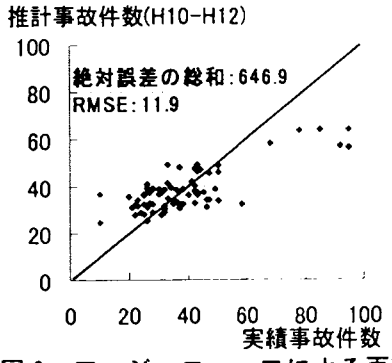


図8 ファジィニューロによる再現精度

(3) 交通事故推計結果の検討

推定したパラメータを用いて、H10～H12の3年次における事故件数を推計した。図8にファジィニューロによる推定精度を示す。経年的に変化した推計結果において、検証データの範囲では誤差が減少しており、推定面での適用性は高いことがわかる。

しかしながら、実績において65件以上の事故件数がある場合では、推計値はいずれも60件付近の件数である。これは学習データにおいて、65件以上の事故件数をもつ教師データが少ないことに起因する。そのため、事故件数の多い大規模交差点での推計精度は学習の効果が得られていない。

4．ファジィ推論モデルの適用性の検討

(1)　交差点の時系列変化の推計

ここでは、個別の交差点について、時系列な変化について分析する。分析対象の交差点としては、パチンコサミット前交差点を取り上げて検討をおこなう。この交差点では大きくカーブして進入している方向が存在しており、これが原因となって事故が多発する傾向にある。パチンコサミット前交差点の経年的交通事故件数の推定結果を、図 9 に示す。

Ｈ７～Ｈ９においては、交通量の増加に伴い実績事故件数の増加に追随して、推計交通事故件数も増加していく。ここではＨ８、Ｈ９については数件の過小推計となっている。H10～H12 においても、交差点安全対策の効果によりＨ９よりも、実績・推計ともに事故件数が減少している。このように、交通事故件数の実績に対して、推計結果は概ね時系列変化を表現できている。

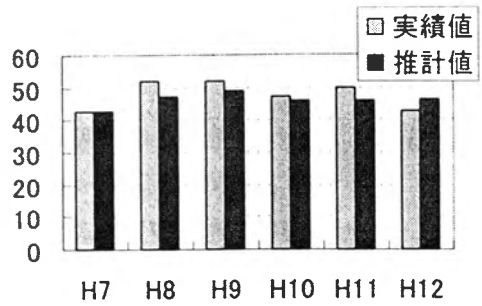


図 9　経年的交通事故変化に関する推定
（パチンコサミット前交差点）

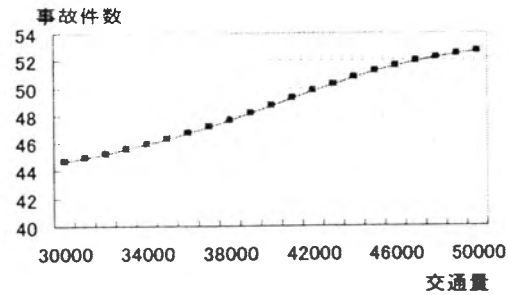


図 10　交通量の変化と事故件数の関係

(2)　交通事故要因変化に関する推計

ここでは、交通事故要因の変化として、交通量を対象として、パチンコサミット交差点にて、交通量が 30000 台～50000 台まで変化した場合の、交差点事故件数について分析する。交通量の変化と事故件数の関係を図 10 に示す。交通量の変化に対して、交通量のメンバシップ関数が非線形なガウス関数であることから、事故件数も非線形な推移となっている。このように交通量の増減に応じて、事故件数の増減を記述できている。

(3)　ファジィ推論モデルの課題整理

ニューロ的学習に用いたデータ範囲を超過した入力値（交通量など）が入力された場合、メンバシップ関数が反応しない場合も考えられる。事故件数の多い大規模交差点での推計精度の向上には、この点の改善が不可欠となる。

一部のメンバシップ関数の相互関係では、設定した言語変数の意味を反映した形で算定されたとはいいがたい部分がある。この点では、ルール構成を含めて再考する必要がある。

5．おわりに

本研究では、交差点の交通事故件数推計において、ファジィ推論による複数要因の因果関係を明確にするとともに、ニューロ的な学習を導入することにより推計精度の向上に取り組んだ。本研究の成果は以下のように整理できる。

①ファジィ推論における言語的な知識表現から、複数の交通事故発生要因と交通事故件数の明示的な関係が記述できた。これにより交通安全対策に対する安全性の向上が分析可能となった。

②ファジィニューロの適用により、ニューロ的学習による高度な非線形関係をもつ事故件数推計モデルを構築した。これより事故件数予測における推計モデルの適合性を改善できた。

【参考文献】

1) 小谷ゆかり，鈴木崇児，秋山孝正，武藤慎一：交差点での類型別事故推計モデルに基づく交通安全対策の評価手法，　土木計画学研究・論文集，　Vol. 18, No. 5, pp. 971-978, 2001.
2) 岐阜県警察本部交通部：交通事故多発場所等の分析と防止対策図（H6～H13）
3) 市橋，渡辺：簡略ファジィ推論を用いたファジイモデルによる学習型制御，　日本ファジィ学会誌, Vol.2,　No.3,　pp.429-437 (1990)
4) 市橋秀友：ニューロ的手法によるファジィルールの調整，　日本ファジィ学会誌，Vol.5, No.2,　pp.191-203 (1993)

【問い合わせ先】
〒501-1193　岐阜県岐阜市柳戸 1-1
岐阜大学大学院工学研究科土木工学専攻　村瀬満記
TEL　058-293-2446　　FAX　058-230-1528
E-mail：okushima@gifu-u.ac.jp

距離型ファジィ推論法 Part 17

――― ヒューマン推論エンジンの開発 ―――

Distance－Type Fuzzy Reasoning Method Part 17
Development of Human Reasoning Engine

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

1)：高知工科大学 2)：大阪電気通信大学 3)：北海道大学

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

Abstract ：We are developing human reasoning engine based on the fuzzy reasoning methods. This human reasoning engine will be explained in this paper. The following five reasoning algorithms and example of application are contained in this human reasoning engine. (1) Mamdani's fuzzy reasoning method. (2) Functional fuzzy reasoning method. (3) Simplified fuzzy method. (4)Product-Sum type fuzzy method. (5) Distance type fuzzy reasoning method.

１．はじめに

近年、情報技術の進歩につれて日常生活から思想と文化までは急速に変わってきており、物しか扱っていなかった工学分野においても、人間にやさしい設計工学思想のような、人間との関わりのある研究や開発も認められるようになってきた。すなわち、機械としての従来の概念枠組み内における「物」ではなく、人間のように他者に対して思いやりのある「物」を創る理論体系の構築が求められている。そのため、「物」には、人間の持っている知識を定量表現でき、未知の状況でも人間のように適切な結論を推論する能力を備えることが必要である。

このように人間関与システムの特性解明や設計に関する研究が盛んに行われている中で、個人特性を大事にしているファジィ工学の思想が再び注目され始めた。ファジィ工学が２１世紀のキーテクノロジーの一つになると予測されている[1]。そうなれば、あいまい知識を定量表現するファジィ集合論を実際のシステムへ活用する架け橋としてのファジィ推論が益々重要な役割を演じるに違いない。

今までMamdaniのファジィ推論法[2]、関数型ファジィ推論法[3]、簡略型ファジィ推論法[4] [5]、Product-Sum法[6] [7]をはじめ多数の推論法が提案され、実システムへの応用実績が数え切れない。著者らはファジィ集合間の距離概念に基づいて距離型ファジィ推論法を提案している [8] [9]。よって、これらの推論アルゴリズムを集約して、便利に使えるヒューマン推論エンジンシステムを開発するのが非常に有意義なことであると考え、15ヶ月の努力で幼形ができたので報告する。

２．開発方針

ファジィ集合に基づいて、ヒューマン推論エンジンを開発するにあたって、特に次の開発方針を守ることに努力している。すなわち、推論自身が人間らしい推論であることと、推論エンジンと人間のコミュニケーションつまり使いやすさとの二つの側面があって、次の五つの性質を備える。① クリスプ集合のみではなく、人間のように曖昧な概念や知識も取り扱う。② 人間のように状況に応じて選択的に知識（ルール）を利用して推論を行う。③ 未知の状況や不完全な知識に対しても、人間のようにロバストな推論を行う。④ 一定の事実に対して常に同じ結論を下す機械的推論ではなく、人間のように一定の事実でも必ずしも何時も同じ結論になるわけではない。

⑤ 知識の表現形式は数値的手法のみではなく、ビジュアル的手法をも持つので、推論エンジンと人間のコミュニケーションをビジュアル的に行っており容易に使える。

3．ヒューマン推論エンジンの構成

本推論エンジンは図１に示すように構成されている。

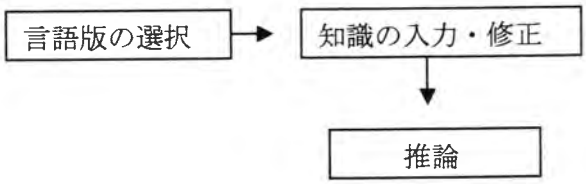


図１　推論エンジンの構成

この推論エンジンを幅広く応用されるには、英語版、日本語版、中国語版との３種類言語をサポートする。

３・１　知識の入力・修正

推論を行うには知識が必要である。本推論エンジンでは知識としてＩＦ～ＴＨＥＮ形式の言語ルールによって構成されるもので、ルール数、前件部と後件部との数、及び前件部と後件部と事実のファジィ変数の型（三角形など）が含まれている。これらの知識を図２の初期知識の窓で入力する。

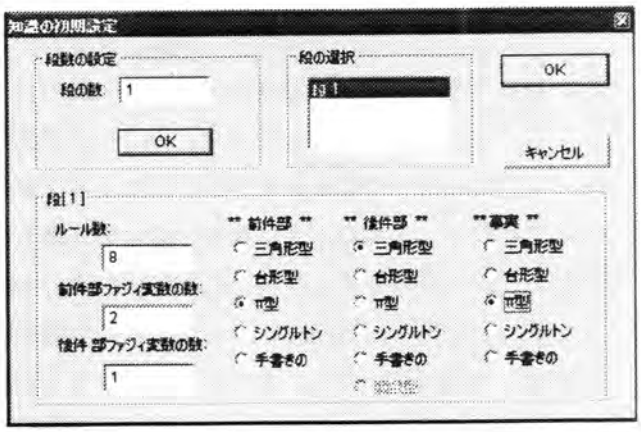


図２　初期知識の入力

使用の途中、応用状況に応じてルールも追加または削除することができ、またファジィ変数のメンバーシップ関数も図３に示す調整窓で修正することができる。

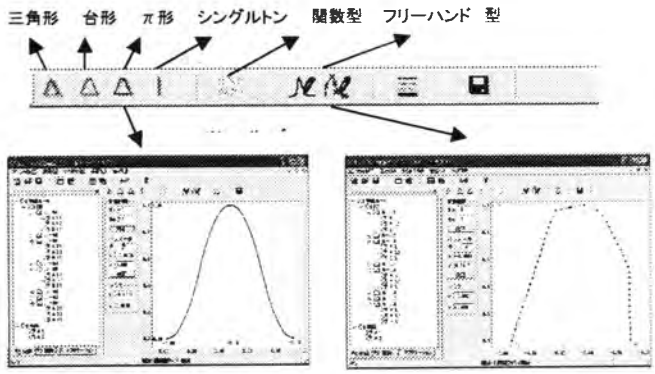


図３　ファジィ変数メンバーシップ関数の修正

図３において、前件部、後件部、事実のメンバーシップ関数を三角形、台形、π形、シングルトン、関数型の中から自由に選択でき、また三角形、台形、π形の曲線をマウスで引っ張ることにより、三角形、台形、π形のパラメータを自由に調整でき、更にフリーハンドにより描く任意形状のメンバーシップ関数を設定することができる。

３・２　推論アルゴリズム

本ヒューマン推論エンジンにおいて、下記の推論が含まれている。

① Mamdani 推論
② 高木―菅野ファジィ推論
③ 簡略型ファジィ推論
④ Product-Sum ファジィ推論
⑤ WTMS ファジィ推論
⑥ 距離型ファジィ推論
⑦ 真理値を考慮した距離型ファジィ推論
⑧ 多重多段距離型ファジィ推論
⑨ 学習機能を持つ距離型ファジィ推論
⑩ 特徴空間における距離型ファジィ推論

①～⑧の推論過程を表す窓は、図４に示すように上下の二つのビューに分けられ、上部のビューに前件部と事実、下部のビューに後件部と推論結果のファジィ変数のグラフを表示する。

図４において、前件部または後件部のメンバーシ

ップ関数グラフをマウスで引っ張って、そのグラフを移動または変形させるのは、ある事実に対して、言語ルールを動的に修正することである。また、事実のメンバーシップ関数グラフをマウスで引っ張って、そのグラフを移動または変形させるのは、与えられた言語ルールに対して、事実を動的に修正することである。更に、前件部、後件部または事実のメンバーシップ関数のグラフをマウスで引っ張るに連れて、推論過程の可視化を実現する。

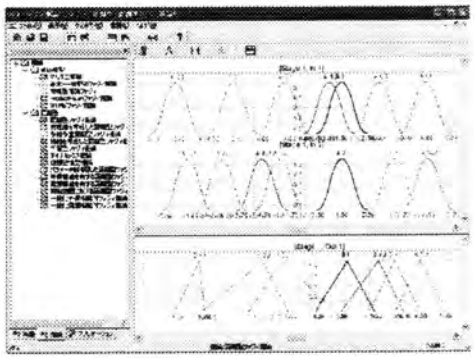


図４　推論の表示窓

人間は、環境から新しい知識を発見、理解そして正確に吸収する、また変化している環境に適用できなければ古い知識とみなして速やかに更新する、更に何らかの原因で間違った知識を認識し直ちに修正する、学習能力を持つ。本開発ではこの人間の学習機能を真似して、推論エンジンに学習型ファジィ推論機能を取り入れる。図５は学習型ファジィ推論の一例を示している。この例では、マウスで画面にランダムに入力したデータを教師信号として、推論の学習誤差が任意に指定でき、学習過程が高速で完成できる。ただし、曲線に限らず、より広い意味での曖昧な概念や知識も取り扱える。

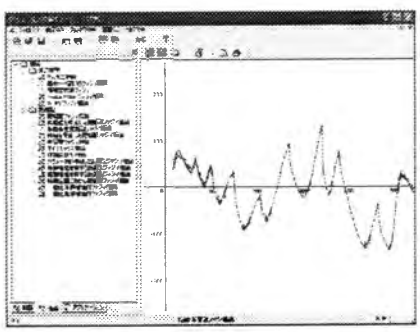


図５　学習型ファジィ推論

特徴空間における距離型ファジィ推論がパターン集合推論に応用する例は図６に示している。

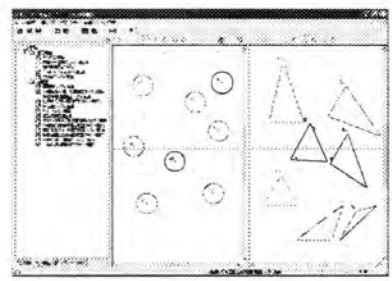


図６　特徴空間における距離型ファジィ推論

３・３　知識半径とロバスト半径について

人間が何かの結論を下すときには、持っている全ての知識をそのままに利用するのではなく、状況（事実）に応じて選択的に知識（ルール）を利用して結論を推論する。たとえば、すばやく結論を推論したいときには、入力された事実と最も関係のある知識だけを利用する。このように人間の行動を基にして、知識量が膨大である場合、この推論エンジンでは、知識半径を設定することにより知識（ルール）を選択的に利用して推論を高速的に行っている。具体的実現手法としては、ユーザに自由に選んでもらえる整数 k（$2 \leq k \leq$ ルール数）を、知識半径として、事実と前件部との距離値が最も近い k 個のルールだけを利用して高速的に推論を行う。

人間が結論を下すときには、推論はロバスト的に行っている。つまり与えられた事実がある程度でルールの前件部に似ていれば、そのルールの後件部を推論結果として下すのが特徴的である。距離型ファジィ推論が推論の分離規則を満たすため、この推論エンジンでは、ロバスト半径を設定することにより、人間のようにロバストな推論が行っている。ロバスト半径は指定された閾値であり、推論を行うときに、事実とあるルールの前件部との距離値が閾値より小さければ、このルールの後件部を推論結果として出力する。この推論エンジンでは、ロバスト半径を設定することを特徴とするため、推論の過程が簡略化でき、且つ不完全な事実に対しても、ヒューマン推論を行うことができる。

４．推論エンジンの応用

本推論エンジンの応用例として、図７に示すように竿灯制御を行う。竿灯を倒さないように制御する方法としては、手動制御、学習制御とファジィ制御を選択することができる。

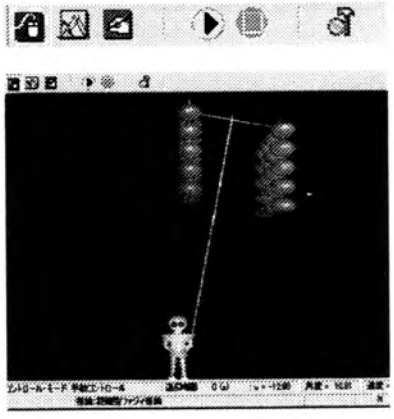


図７　竿灯制御

手動制御は、竿灯が右側へ傾きになる時、マウスを竿灯の右側に置き、竿灯を右側から左側へ押して(マウスを左側へ移動)、また左側へ傾きになる時、竿灯を左側から右側へ押して、竿灯を倒させないようにバランスを取ることである。

学習制御は、手動制御のデータから、エンジンにおける学習型ファジィ推論に基づいて人間の制御ノウハウを知識に抽出することにより、竿灯を立てることである。つまり、人の技能を真似して学習制御の有効性を示す応用例である。

ファジィ制御は、竿と垂直方向との角度を前件部、竿灯を倒さないような力を後件部とする、ファジィ制御により、竿灯を立てることである。

制御過程において竿灯制御に相応しい音楽も用意しており、楽しく遊べる。最後に成績表の窓が表示され、制御結果の評価を与える。

４．まとめ

本開発では、メンバーシップ関数と言語ルールを動的に修正でき、特にメンバーシップ関数をフリーハンド型で入力できる機能、並びに推論過程を可視化することで、この推論エンジンが非常に簡単に使える。また知識半径やロバスト半径を設定する処理方法を使うことで、推論の時間を減らし、推論の過程を簡略化することができる。

謝辞：ヒューマン推論エンジンは情報処理振興会の『未踏ソフトウエア創造事業プロジェクト』に採択されたプロジェクトで、プロジェクトマネジャー東京大学教授喜連川優先生をはじめ審査員の皆様に深くお礼申し上げます。開発にあたって、多くの著名なファジィ分野の先生方々に頂いた御評価及び貴重なアドバイスが無かったら、今のレベルまでには到達できません。本当に心からお礼申し上げます。また距離型ファジィ推論法のアプリケーションやヒューマン推論エンジンの開発にご協力いただいた北大、山形大、そして高知工科大の学生諸君、本当にありがとうございました。最後に大変いい加減な生活をしている開発者の夢に対して、いつも理解してくれる家族に褒詞を送りたい。

〒782-8502　高知県香美郡土佐山田町宮ノ口 185 番地
高知工科大学工学部知能機械システム工学科　王 碩玉
TEL: 0887-57-2306　FAX: 0887-57-2320
E-mail: wang.shuoyu@kochi-tech.ac.jp
http://www.mech.kochi-tech.ac.jp/staff/wang/index.html

参考文献

[1] 中島：工学は何を目指すのか－東京大学工学部は考えるー，東京大学出版会(2000)

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

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

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

[5] 市橋，渡辺：簡略ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習型制御，日本ファジィ学会誌，Vol.2, No.3, pp429-437(1990)

[6] 水本雅晴：ファジィ推論(2)，日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.3, pp.35-46, 1992

[7] Y. Nakamori and M. Ryoke: Identification of fuzzy prediction models through hyperellipsoidal clustering. IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics, Vol.SMC-24.No.8,pp.1153-1173,1994

[8] 王，土谷：距離型ファジィ推論法 Part 1 -距離型ファジィ推論法の提案-, 第 12 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp. 9 - 12(1996)

[9] 王，土谷，水本：距離型ファジィ推論法，バイオメデカルファジィシステム学会論文集, Vol.1, No. 1, pp.61-78(1999)

ファジィ推論における単調性解析

Monotonicity Analysis of Fuzzy Reasoning

奥田 良治（NTT DATA）　　稲井田 次郎（日本大学）
Yoshiharu Okuda (NTT DATA)　　Jiro Inaida (Nihon University)

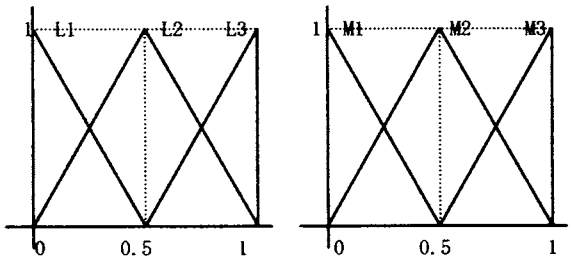
Abstract: We have used the fuzzy reasoning method "Min-Max Method", "Product- Sum-Gravity Method" and "Simplified Fuzzy Reasoning" for the fuzzy control and the soft science. The monotonicity is the important point for applying fuzzy reasoning to these fields. However the numerical reasoning functions of these methods do not always hold the monotonicity condition.

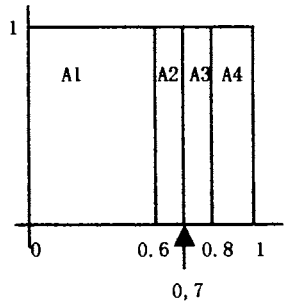
In this paper, by defining some fuzzy mathematical concepts, we obtain some sufficient conditions for the monotonicity of "Product- Sum- Gravity Method" .

1. はじめに

ファジィ理論を工学やソフトサイエンスへ応用する場合，マムダニのファジィ推論法，簡略化推論法および代数積－加算－重心法等のファジィ推論がよく用いられている．しかしながら，これらはいずれも単調性を持たない。特に，つぎのマムダニの方法における反例は重要である。

マムダニ推論法の非単調性の例





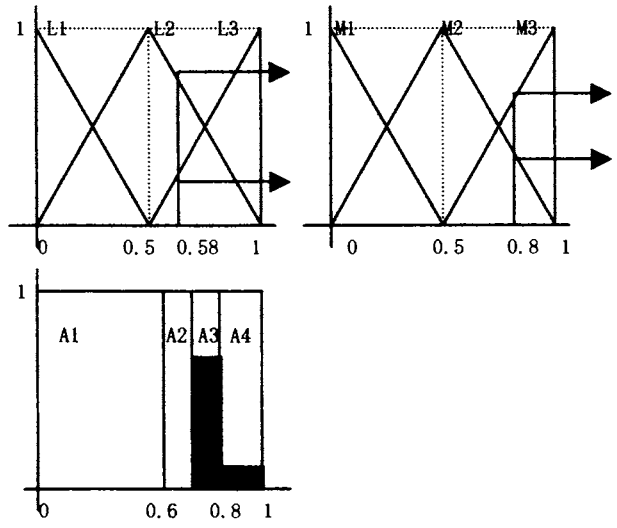
	M1	M2	M3
L1	A1	A2	A2
L2	A2	A3	A3
L3	A2	A4	A4

ファジィ規則

ここで，

x＝0．58，y＝0．90

とおくと



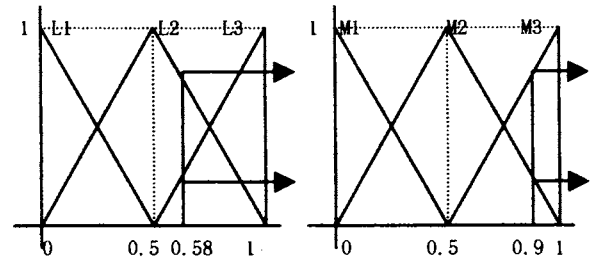
$$z_0 = \frac{0.75\times0.6+0.9\times2\times0.16}{0.6+2\times0.16} = \frac{0.738}{0.92}$$

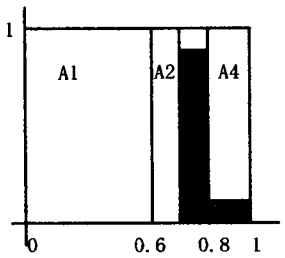
$$\approx 0.8201 \ (A4)$$

また

x＝0．58，y＝0．90

とおくと





$$z_0 = \frac{0.75\times 0.8 + 0.9\times 2\times 0.16}{0.8 + 2\times 0.16}$$

$$= \frac{0.888}{1.12} \approx 0.7928 \quad (A_3)$$

教育評価，医療診断等へファジィ推論を応用する場合には，数値推論関数が滑らかさとともに狭義単調性を持つことが必要である．そこで，我々はファジィ分割空間の概念を用いて，ファジィ推論が単調性をもつための十分条件を提示する。

2. ファジィ数学におけるいくつかの概念

定義１　α－レベル集合

Aを全体集合X上のファジィ集合とするとき，α－レベル集合を次式で定義する：

$$[A]^{\alpha} = \begin{cases} \{x \in X \mid A(x) \geqq \alpha\}, & 0 < \alpha \leqq 1 \\ \overline{\{x \in X \mid A(x) > 0\}}, & \alpha = 0 \end{cases}$$

ここで，$\overline{S}$はSの閉包を表す.

定義２　ファジィ分割空間

I をR上の有界閉区間とし，

$$FP(I) = \{Ai : i \in \Lambda\}$$

をI上の正規ファジィ集合の族とする。もし，FP(I) が等式

$$\Sigma_{i\in\Lambda} Ai(x) = 1, \quad x \in I$$

を満たせば FP(I) をI上のファジィ分割空間という。

定義３　順序つけられたファジィ分割集合

R上の閉区間Iにおける２つの正規凸ファジィ集合A，Bに対し，それぞれのα-レベル集合をそれの閉包を

$$\overline{[A]^{\alpha}} = [a_\alpha, c_\alpha], \quad \overline{[B]^{\alpha}} = [c_\alpha, d_\alpha],$$

とおく。このとき

$$a_\alpha \leqq c_\alpha, \ b_\alpha \leqq d_\alpha, \ \alpha \in [0,1]$$

を満たすならば，AとBには順序があるといい

$$A < B$$

と書く。

3. ファジィ分割空間上のファジィ推論

$FP(F1) = \{L_{11}, L_{12}, \cdots, L_{1m1} \mid L_{11} < L_{12} < \cdots L_{1m1}\}$,

$FP(F2) = \{L_{21}, L_{22}, \cdots, L_{2m2} \mid L_{21} < L_{22} < \cdots L_{2m2}\}$,

・・・

$FP(Fn) = \{L_{n1}, L_{n2}, \cdots, L_{nmn} \mid L_{n1} < L_{n2} < \cdots L_{nmn}\}$,

$FP(E) = \{A_1, A_2, \cdots, Ar \mid A_1 < A_2 < \cdots < Ar\}$

をそれぞれF_1, F_2 ，・・・，Fnおよび Eの順序付けられたファジィ分割集合族とする。そしてファジィ規則は上への写像

$$h : F_1 \times F_2 \times \cdots \times Fn \to E$$

で与えられる。このとき，事実 $(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ に関する結論

$$E = \phi(x_1, x_2, \cdots, x_n)$$

をファジィ分割空間上の数値ファジィ推論といい，この関数を数値推論関数 (numerical reasoning function) という。

定義４　ファジィ規則の単調性

$$L_{1i1}, L_{2i2}, \cdots, L_{nin} \to A_p,$$

$$L_{1j1}, L_{2j2}, \cdots, L_{njn} \to A_q$$

$1 \leqq i_1, j_1 \leqq m_1, 1 \leqq i_2, j_2 \leqq m_2, \cdots, 1 \leqq i_n, j_n \leqq m_n$

において

$$i_1 \leqq j_1, \ i_2 \leqq j_2, \cdots, \ i_n \leqq j_n \qquad (1)$$

ならば，つねに

$$p \leqq q.$$

であるとき，ファジィ規則は単調増加であるという。

また，式（１）において，不等号の少なくとも１つが，$\lneqq$ となっていれば，

$$p < q$$

が成り立つとき，ファジィ規則は狭義単調増加であるという。

3.1 代数積－加算－重心法

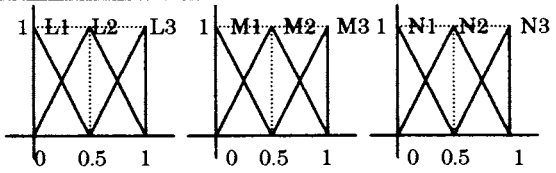
定理１　２つの前件を持つファジィ分割空間上の代数積－加算－重心法において，ファジィ規則が単調増加ならば，数値推論関数 $E = \phi(x_1, x_2)$ は単調増加である。

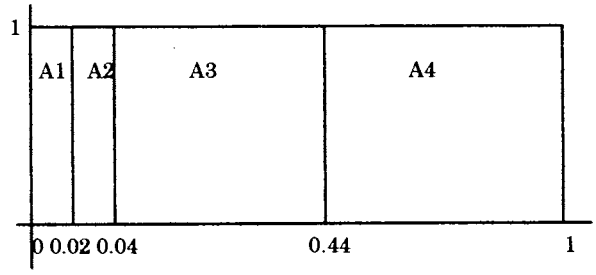
注１　ファジィ規則が狭義単調増加ならば，数

値推論関数は狭義単調増加である。

注２　前件部が３以上の場合，必ずしも単調性を満たさない。

代数積－加算－重心法の非単調性の例

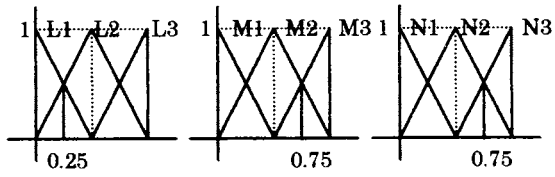


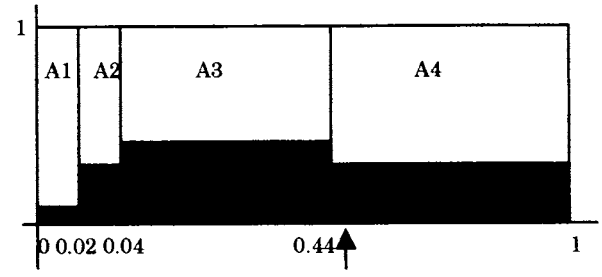


ファジィ規則

1 L1M1N1⇒A1 10 L2M1N1⇒A2 19 L3M1N1⇒A3
2 L1M1N2⇒A1 11 L2M1N2⇒A2 20 L3M1N2⇒A3
3 L1M1N3⇒A1 12 L2M1N3⇒A2 21 L3M1N3⇒A3
4 L1M2N1⇒A1 13 L2M2N1⇒A2 22 L3M2N1⇒A3
5 L1M2N2⇒A1 14 L2M2N2⇒A2 23 L3M2N2⇒A4
6 L1M2N3⇒A2 15 L2M2N3⇒A3 24 L3M2N3⇒A4
7 L1M3N1⇒A1 16 L2M3N1⇒A2 25 L3M3N1⇒A3
8 L1M3N2⇒A3 17 L2M3N2⇒A3 26 L3M3N2⇒A4
9 L1M3N3⇒A3 18 L2M3N3⇒A4 27 L3M3N3⇒A4

ここで，ｘ＝０．２５，ｙ＝０．７５，ｚ＝０．７５とおくと





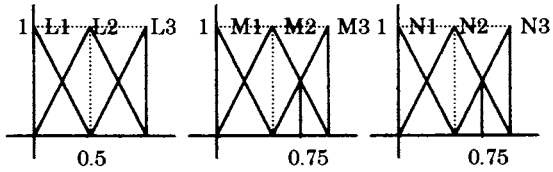
$$z_0 = \frac{0.125\times 0.01 + 0.25\times 0.03 + 7.5\times 0.24 + 7\times 0.72}{0.125 + 0.25 + 7.5 + 7}$$

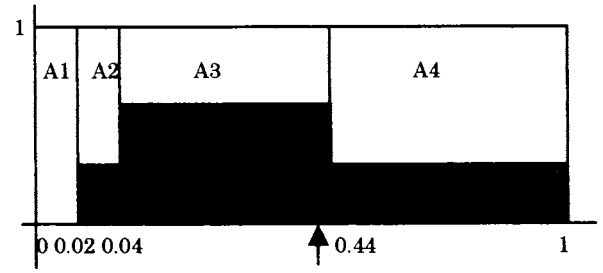
$$= \frac{6.84875}{14.875} \approx 0.460 \quad (A_4)$$

また

ｘ＝0.50，　ｙ＝0.75，　ｚ＝0.75

とおくと





$$z_0 = \frac{0.25\times 0.03 + 10\times 0.24 + 7\times 0.72}{0.25 + 10 + 7}$$

$$= \frac{7.0475}{17.25} \approx 0.408 \quad (A_3)$$

3.2 ファジィシングルトン型推論法

ファジィシングルトン型推論法(fuzzy singleton-type reasoning method)はファジィ規則の後件が

$$FP(E) = \{z_1, z_2, \cdots, z_r \mid z_1 < z_2 < \cdots < z_r\}$$

のように実数値にし，これに重みw_i ($\geqq 0$)を付加したものをいう。このとき，次の定理が成り立つ：

定理２　前件がファジィ分割されたファジィシングルトン型推論法において，重みに対する条件

i)　$w_1 \geqq w_2 \geqq \cdots \geqq w_r$

ii)　$z_i < z_j$ ならば，常に

$$\frac{w_i}{w_j} \leq \frac{z_j}{z_i}$$

を満たし，ファジィ規則が単調増加ならば，数値推論関数　$E = \phi(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ は単調増加である。

注　先の非単調の例は重みに対する条件の ii)は満たしているが，i)を満たしていない。

3.3 簡略化推論法

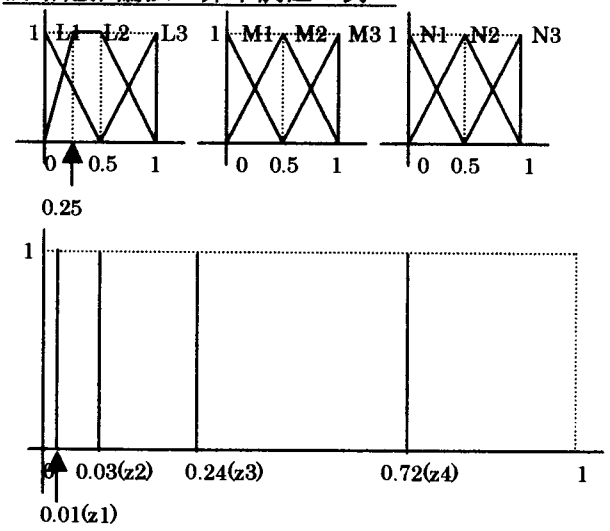
簡略化推論法(simplified fuzzy reasoning)はファジィシングルトン型推論法における重みｗｉが，常に１であるものをいう。したがって，定理２から次の系が成り立つ：

系　前件がファジィ分割された簡略化推論法において，ファジィ規則が単調増加ならば，数値推論関数 $E=\phi(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ は単調増加である。

注１　ファジィ規則が狭義単調増加ならば，数値推論関数は狭義単調増加である。

注２　ファッジィ分割空間の条件をはずすと，簡略化推論法は必ずしも単調性を満たさない。

簡略化推論法の非単調性の例



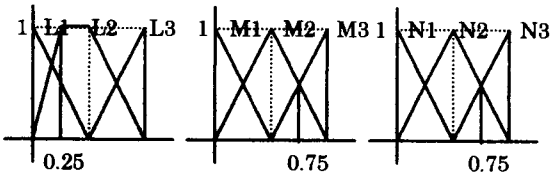
ファジィ規則

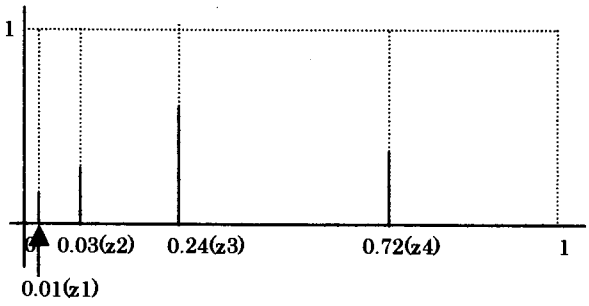
1 L1M1N1⇒z1 10 L2M1N1⇒z2 19 L3M1N1⇒z3
2 L1M1N2⇒z1 11 L2M1N2⇒z2 20 L3M1N2⇒z3
3 L1M1N3⇒z1 12 L2M1N3⇒z2 21 L3M1N3⇒z3
4 L1M2N1⇒z1 13 L2M2N1⇒z2 22 L3M2N1⇒z3
5 L1M2N2⇒z1 14 L2M2N2⇒z2 23 L3M2N2⇒z4
6 L1M2N3⇒z2 15 L2M2N3⇒z3 24 L3M2N3⇒z4
7 L1M3N1⇒z1 16 L2M3N1⇒z2 25 L3M3N1⇒z3
8 L1M3N2⇒z3 17 L2M3N2⇒z3 26 L3M3N2⇒z4
9 L1M3N3⇒z3 18 L2M3N3⇒z4 27 L3M3N3⇒z4

ここで，

ｘ＝０．２５，ｙ＝０．７５，ｚ＝０．７５

とおくと





z 0＝

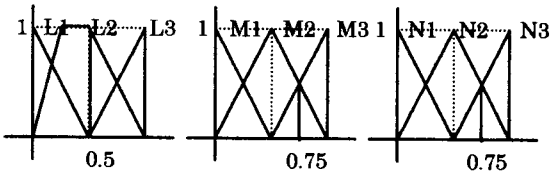
$$\frac{0.125\times z_1+0.375\times z_2+0.625\times z_3+0.375\times z_4}{0.125+0.375+0.625+0.375}$$

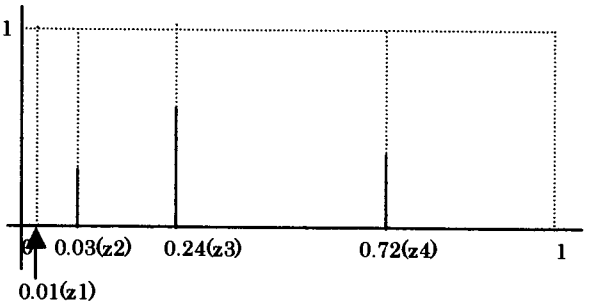
$$=\frac{0.82625}{1.5}\approx 0.5508$$

また

ｘ＝0.50，ｙ＝0.75，ｚ＝0.75

とおくと





$$z_0=\frac{0.25\times z_2+0.5\times z_3+0.25\times z_4}{0.25+0.5+0.25}$$

$$=\frac{0.3075}{1}\approx 0.3075$$

参考文献

水本 雅晴：代数積-加算-重心法=ファジィシングルトン型推論法=簡略化推論法，第１２回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，305-308,1996.

E-mail:inaida@penta.ge.cst.nihon-u.ac.jp

ファジィ量限定詞および真理値限定詞を含む自然言語命題に対するIF~THEN~ルールベースの推論方法

IF~THEN~rule based inference method for natural language propositions involving a fuzzy quantifier and a truth qualifier

岡本　渉

Wataru OKAMOTO

Abstract. In this paper, we propose an IF~THEN~ rule based inference method which is necessary to construct a natural language communication system and an expert system. The method is referred to how to estimate fuzzy quantifier Q1 when input proposition is QA are F is τ and IF~THEN~ rule IF Q'A' is F' is τ' THEN Q"A" is F" is τ" is given and an inference result is Q1A" is F" is τ" (Q, Q', Q', Q1: Quantifiers, A, A', A": Labels of fuzzy sets, F, F', F": Fuzzy predicates, τ, τ', τ":Truth qualifiers). We showed how to infer a result proposition Q1A" is F" is τ" for two types of Qs. These two types include a nonincreasing type (FEW,...) and a nondecreasing type (MOST,....) .

1. はじめに

自然言語による対話システムやエキスパートシステムを構成するには、日常会話で多用されるファジィ量限定詞及びファジィ質限定詞を含む命題で記述されたIF~THEN~ルールベースの推論を扱う必要があるが、これまでに研究された例は存在しない。我々は、既にファジィ量限定詞および真理値限定詞を含む命題の推論による変形について報告した[3-6]。

次に、我々の従来研究と本報との関係につき簡単に述べる。我々の既に提案した方法は、変形の対象として、ファジィ述語およびファジィ主語および真理値限定詞を同時に扱うものである。

以下、Zadehの記法に従い

Q: ファジィ量限定詞
A: ファジィ主語
m: 修飾子
F: ファジィ述語
τ: 真理値限定詞

として、ファジィ量限定詞及びファジィ質限定詞を含む命題を

QA are F is τ

で表現する[1-2]。

例えば、我々の既に提案した推論方法により、以下の変形が可能になる[3-5]。

QA are F is τ ⇔ Q'(mA) are mF is m"τ

本報においては、上記変形を使用してIF~THEN~ルールベースの推論を扱う手法を提案する。

以下、2章において、従来の推論方法について述べ、3章にて、本報にて新たに提唱するIF~THEN~ルールベースの推論方法について述べ、最後に4章にてまとめる。

2.従来の推論方法

ファジィ量限定詞および真理値限定詞を含む命題において、ファジィ述語およびファジィ主語および真理値限定詞への変形を同時に扱う場合を考える。　このとき、以下の変形を扱う。

QA are F is τ ⇔ Q'(mA) are mF is m"τ

ここで、推論による変形を以下の4つのステップに分割する[6]。

ステップ1

QA are F is τ ⇔ Q'(mA) are F is τ

ステップ2

Q'(m'A) are F is τ ⇔ Q"(m'A) are mF is τ

ステップ3

Q"(m'A) are mF is τ ⇔ Q(m'A) are mF is TT

ステップ4

Q(m'A) are mF is TT ⇔ Q'"(m'A) are mF is m"τ

上記ステップにおいて、ステップ1は論文[5]、ステップ2は論文[3-4]で述べた推論方法を用いて実行可能である。ステップ3とステップ4においては、真理値限定および逆限定の手法を用いて容易に実行可能である。

3.IF~THEN~ベースの推論方法

第2章で述べた変型手法を用いて、IF~THEN~ベースでの推論を行う手法を提案する。以下の推論を考える。

QA are F is τ
IF Q'A' are F' is τ' THEN Q"A" are F" is τ"
Q1A" are F" is τ"

まず、問題を間接法にて扱うため、各命題を以下のように変形する。

QA are F is $\tau \Leftrightarrow$ Q2A are F is true

Q'A' are F' is τ' $\Leftrightarrow$ Q3A' are F' is true

Q"A" are F" is τ" $\Leftrightarrow$ Q4A" are F" is true

Q1A" are F" is τ" $\Leftrightarrow$ Q5A" are F" is true

ここで、trueはunitary trueである。上記変型は、真理値限定の手法により容易に実行可能である。このとき、上記推論は以下の同値な推論に置き換わる。

Q 2 A are F is true

IF Q3A' are F' is true THEN Q4A" are F" is true

Q5A" are F" is true

上記推論を間接法にて解けば良い。以下具体的に述べる。

まず、第２章にて述べた推論方法にて、以下の変形を行う。

Q 2 A are F is true $\Leftrightarrow$ Q 2 'A' are F' is true

次に、ファジィ量限定子Q2'のQ3に対するマッチ度を求める。

L(前件部) $=\int$ Q2'/Q3

含意論理としては、ルカシィビッツのものを使用する[7]。このとき、含意部の言語真理値は具体的には以下のように与えられる。

L(含意部) $= 1 \wedge (1-L(\text{前件部}) + L(\text{後件部})$

このとき、推論結果L(後件部)は、含意部の言語真理値をunitary trueとして、α-カット集合と分解原理により、以下のように与えられる。

$$\mu_{L(\text{後件部})}(u) = \bigvee_{0<\alpha\leq 1} \chi_{L(\text{後件部})\alpha}(u)$$

ただし、

$$\chi_{L(\text{後件部})\alpha}(u) = \begin{cases} 1 & (u \in L(\text{後件部})_\alpha \\ 0 & (u \notin L(\text{後件部})_\alpha \end{cases}$$

であり、$L(\text{後件部})_\alpha$ はL(後件部) のαーカット集合で次式によって定められる。

$$L(\text{後件部})_\alpha = \{u \mid [(p_1(\alpha)+r_1(\alpha)-1)\vee 0] \leq u \leq 1\}$$
$$=^{def} (p_1(\alpha)+r_1(\alpha)-1)\vee 0,\ 1]$$

ここで、

$p_1(\alpha)$, $r_1(\alpha)$

はそれぞれL（前件部）、L（含意部）に対するα-カット集合で

$L(\text{後件部})_\alpha$, $L(\text{含意部})_\alpha r_1(\alpha)$

における閉区間の左端を示す。すなわち、

$$L(\text{前件部})_\alpha = \{u \mid \mu_{L(\text{前件部})}(u) \geq \alpha\},\ 0<\alpha\leq 1$$
$$=^{def} [p_1(\alpha),\ p_2(\alpha)]$$

$$L(\text{含意部})_\alpha = \{u \mid \mu_{L(\text{含意部})}(u) \geq \alpha\},\ 0<\alpha\leq 1$$
$$=^{def} [r_1(\alpha),\ 1]$$

この時、もし

$$\mu_{L(\text{含意部})}(u) = u$$

とすれば

$$r_1(\alpha) = \alpha$$

となる。

L（後件部）が求まれば、下式より推論結果が求まる。

Q5A" are F" is L（後件部）$\Leftrightarrow$ Q1A" are F" is τ"

4.結論

以上、ファジィ量限定詞および真理値限定詞を含む自然言語命題のIF~THEN~ルールベースの推論結果を、ファジィ量限定詞として求める方法を示した。今後は評価を行う予定である。

[参考文献]

[1] L. A. Zadeh, "PRUF-A meaning representation language for natural language", Int. j. of Man Machine Studies 10, pp. 395-460 (1978).

[2] L. A. Zadeh, "A Computational Approach to Fuzzy Quantifiers in Natural Languages ", Comp. and Maths with Appls., 9, pp. 149-184 (1983).

[3] 岡本, 田野, 岩谷,井上, “ファジィ限量子を含む自然言語命題の推論法”, 日本ファジィ学会誌, Vol. 7, No. 4, pp. 809-825 (1995).

[4] 岡本, 田野, 井上, 藤岡, “ファジィ量限定子をむ言語命題における真理値限定に基づく制約と推論方法について”, 日本ファジィ学会誌, Vol. 8, No. 3, pp. 519-531 (1996).

[5] 岡本, 田野, 井上, 藤岡, “ファジィ量限定子および真理値限定子を含む言語命題の推論方法について”, 電子情報通信学会論文誌 (A), vol. J80-A, no. 9, pp. 1527-1545, Sept. (1997).

[6] 岡本, 田野, 井上, 藤岡, “ファジィ量限定詞および真理値限定詞を含む自然言語命題に対する４ステップの推論方法”, 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol. 15, No. 2, pp. 230-238 (2003).

[7] 本多, 大里, “ファジィ工学入門”, 海文堂 (1989).

[問合わせ先] 岡本渉 [wokamoto@smart.interq.or.jp]

横浜市保土ヶ谷区上星川 2-32-21

(TEL : 045 - 371 - 6861)

(FAX : 045 - 371 - 6861)

識別器間の非類似度を考慮したファジィアンサンブル識別器の構築

Constructing Fuzzy Ensemble Classifiers by Considering Dissimilarity between Classifiers

中島 智晴　　中井　学　　石渕 久生
Tomoharu Nakashima　　Gaku Nakai　　Hisao Ishibuchi
大阪府立大学大学院 工学研究科
Osaka Prefecture University

Abstarct This paper examines the performance of fuzzy ensemble classifiers. In our fuzzy ensemble classifier, there are multiple fuzzy rule-based classification systems and a single fuzzy rule-based credit assignment system. A credit assignment system is generated from the classification results of individual fuzzy rule-based classification system. Thus the credit assignment system plays a role in mapping input space to fuzzy rule-based classification systems. Then the fuzzy rule-based classification system selected by the credit assignment system maps an input pattern to a class. In the computer simulation, we show the classification performance on four real-world pattern classification problems: Iris, appendicitis, cancer, and wine data sets. From the results of our computer simulations, we illustrate the low similarity between the fuzzy rule-based classification systems in our fuzzy ensemble classifier lead to high classification performance.

1　はじめに

近年，パターン識別の分野において，複数の識別器を統合することにより識別性能の改良を試みる研究が盛んに行われている．一般に，アンサンブル識別器を構築する上で問題になることは，アンサンブル識別器に含まれる識別器間の相関度の高さと性能との関係である．そこで本研究では，明確に識別器間の非類似度を評価して，パターン識別器を構築する手法を提案し，その性能を評価する．

本研究で用いられるアンサンブル識別器を図1に示す．図1のアンサンブル識別器は，複数のファジィ識別器と1つのファジィ信頼度割当システム，そして最終的な識別の決定を行うゲートノードから構成されている．

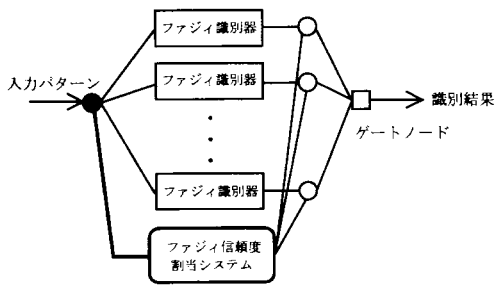


図1　ファジィアンサンブル識別器

2　ファジィ識別器

n次元Cクラスパターン識別問題において，m個の学習用パターン $\mathbf{x}_p = (x_{p1}, x_{p2}, \ldots, x_{pn})$, $p = 1, 2, \ldots, m$ が与えられているとする．また，与えられた学習用パターンのそれぞれの属性は単位区間 $[0, 1]$ に正規化されているものとする．

本研究のファジィ識別器では，次のようなファジィIf-Thenルールが用いられる．

$$\text{Rule } R_j\text{: If } x_1 \text{ is } A_{j1} \text{ and } \ldots \text{and } x_n \text{ is } A_{jn} \text{ then Class } C_j \text{ with } CF_j,\ j=1,2,\ldots,N \quad (1)$$

ここで，R_j は j 番目のファジィIf-Thenルールのラベルであり，$A_{j1}, \ldots, A_{jn}$ は区間 $[0, 1]$ 上の条件部ファジィ集合，C_j は結論部クラス，CF_j はルールの確信度，N はファジィ識別器に含まれるファジィIf-Thenルールの数である．本研究では，条件部ファジィ集合として三角型ファジィ集合と全ての入力に対してメンバシップ値1を返す *don't care* を用いることにする．また，Ishibuchiら[1]により提案されているルール自動生成手続きを用いて，ファジィIf-Thenルールの結論部クラス C_j と確信度 CF_j を決定する．未知パターンの識別もまた，Ishibuchiら[1]の手法により行われる．

3　ファジィアンサンブル識別器

3.1　ファジィ識別器の構築

本研究で用いるファジィアンサンブル識別器は，複数のファジィ識別器と1つのファジィ信頼度割当システム，そしてゲートノードから構成される．本研究では，ブースティング手法[2]を用いて，ファジィ識別器を構

築する．ブースティング手法により，複数の性質の異なるファジィ識別器の構築が可能となる．

3.2 ファジィ信頼度割当システム

ファジィ信頼度割当システムへの入力は，全ての学習用パターンであり，出力は各ファジィ識別器の識別結果に対する信頼度である．

いま，L 個のファジィ識別器が構築されているとする．ファジィ信頼度割当システムでは，以下の形式のファジィ If-Then ルールが用いられる．

$$\text{Rule } R_k\text{: If } x_1 \text{ is } A_{k1} \text{ and } \ldots \text{and } x_n \text{ is } A_{kn}$$
$$\text{then } \mathbf{w}_k = (w_{k1}, \ldots, w_{kL}),\ k=1,2,\ldots,K \qquad (2)$$

ここで，K はファジィ信頼度割当システムにおけるファジィ If-Then ルールの数，$\mathbf{w}_k = (w_{k1}, w_{k2}, \ldots, w_{kL})$ は，k 番目のファジィ If-Then ルールに対する結論部実数値重みベクトルである．また，結論部重みベクトル $\mathbf{w}_k$ の l 番目の要素 w_{kl} は，l 番目のファジィ識別器の識別結果に対する重みである．ファジィ信頼度割当システムのファジィ If-Then ルールの結論部実数 $\mathbf{w}_k$ は，Nakashima ら [3] により提案されているルール自動生成手続きを用いる．未知パターンに対する識別（各ファジィ識別器の識別結果に対する信頼度）も，Nakashima ら [3] の手法により行われる．また，最終的な識別として，ファジィ信頼度割当システムの信頼度が最大であるファジィ識別器の識別結果を用いることにする．

4 数値実験

数値実験では，4つの実世界パターン識別問題（アヤメ，盲腸，ガン，ワインデータ）に対して，ファジィアンサンブル識別器を適用した．ファジィ信頼度割当システムの分割数は5とした．

表1から識別性能は，ファジィアンサンブル識別器を用いることによって改良されることがわかった．また，ファジィ識別器の構築に関して，ブースティング手法を用いない場合，類似度は，アヤメ：79.4%，盲腸：92.8%，ガン：96.1%，ワイン：94.9%であったのに対して，ブースティング手法を適用することにより，表1のように低い類似度を得ることができた．類似度は，各学習用パターンに対するファジィ識別器の全ての組合せの識別結果の一致度合いと定義した．

表2に評価用パターンに対する性能を示す．評価用パターンの性能は，アヤメ，盲腸，ワインデータに対しては，leaving-one-out 手法を，ガンデータに対しては，10-fold cross-validation 手法を用いた．

表1 学習用データに対する識別性能（%）

データ集合	単体の最大	アンサンブル	類似度
アヤメ	93.3%	95.3%	29.3%
盲腸	85.8%	87.7%	34.7%
ガン	72.0%	72.4%	33.9%
ワイン	94.9%	94.9%	46.2%

表2 評価用データに対する識別性能（%）

データ集合	単体の最大	アンサンブル
アヤメ	90.7%	90.7%
盲腸	83.0%	84.0%
ガン	71.5%	71.1%
ワイン	92.7%	92.7%

5 おわりに

本研究では，ブースティング手法を用いたファジィアンサンブル識別器の性能の調査を行った．ファジィアンサンブル識別器では，二つの異なる種類のファジィ識別器が用いられた．一方は，ファジィ識別器であり，ブースティング手法によって生成される．もう一方は，ファジィ信頼度割当システムであり，ファジィ識別器によって提示された識別結果に重みを与える．数値実験の結果から，ファジィ識別器間の低い類似度が性能の改良に大きな役割を果たしていることを示した．また，ブースティング手法により低い類似度を得ることができるということも確認した．

参考文献

[1] H. Ishibuchi, K. Nozaki, and H. Tanaka: Distributed representation of fuzzy rules and its application to pattern classification, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 52, No. 1, pp. 21–32 (1992)

[2] T. Nakashima, G. Nakai, and H. Ishibuchi: A boosting algorithm of fuzzy rule-based systems for pattern classification problems, *Proc. of the 2002 International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, pp. 155–158 (2002)

[3] T. Nakashima and G. Nakai: Ensembling classification system by a fuzzy rule-based system, *Information Fusion in Data Mining*, V. Torra, ed. Springer, pp. 189-208 (2003)

問い合わせ先

〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1
大阪府立大学大学院 工学研究科
中島 智晴
TEL: (072)254-9351 FAX: (072)254-9915
E-mail: nakashi@ie.osakafu-u.ac.jp

GAによる超円錐形メンバーシップ関数を用いたファジィ識別ルールの獲得手法

An Acquisition Method of Fuzzy Classification Rules Using Hyper-Cone Membership Functions by GAs

井上博行† Lina HNG‡ 宮阪憲治† 塚本充†
Hiroyuki INOUE† Lina HNG‡ Kenji MIYASAKA† Mitsuru TSUKAMOTO†
†福井大学教育地域科学部 ‡福井大学大学院教育学研究科
†Faculty of Education and Regional Studies, ‡Graduate School of Education,
Fukui University Fukui University

Abstract: In this paper, we propose automatic generation methods of fuzzy classification rules with the Genetic Algorithms (GAs) to obtain compact fuzzy systems. In this time, we propose an approach of hyper-cone membership function to construct rules for the antecedent part. Also, using the rule addition method in GA process, compact fuzzy classification systems are obtained. This method was applied to Wine data sets and Wisconsin Prognostic Breast Cancer (WPBC) data sets.

1 はじめに

ファジィシステムは，制御やモデリング，パターン識別問題など様々な分野で用いられている．そもそもファジィシステムにはチューニング問題が存在し，その自動化を目指した研究が多数されてきた．しかし最近では，ファジィルールが言語的表現され，人間の知識を表すツールとして使えることから，知識獲得的側面から研究が行われるようになった [1]-[4]．そのような立場から，多数のデータからパターン識別おこなうファジィ識別ルールを獲得する研究も多くされている [5]-[8]．

本研究では，遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) を用いて，属性数が多いデータからファジィ識別システムを自動生成し，有益なファジィルールを得ることを目的とする．これらを実現するには，複雑なファジィシステムを獲得するのではなく，コンパクトで精度の高いファジィシステムを得る必要がある．そこで，本稿では超円錐形メンバーシップ関数 [9] を用いたファジィ識別ルールを導入し，そのファジィシステムを GA により自動生成する手法を提案する．また，必要最小限のルール数構成するファジィシステムを生成し，その後，1つずつルールを増やしていくルール増加法を GA の演算に組み込む．この提案法を，ワインデータと乳癌データの識別問題 [10] に応用し，その有効性を確かめる．

2 超円錐形メンバーシップ関数を用いたファジィパターン識別システム

文献 [9] では，ファジィ制御ルールに対し超円錐形メンバーシップを用いている．本研究では，超円錐形メンバーシップ関数をファジィ識別ルールに用いる．すなわち，前件部のファジィ集合 A_i を超円錐形メンバーシップ関数で表す．また，それぞれのルールの入力数を減らすため "don't care" の概念を導入する．

2.1 超円錐形メンバーシップ関数によるファジィ識別ルール

本手法では，ファジィルール R^i を以下のように表す．

$$R^i : \text{if } \boldsymbol{x}_i \text{ is } A_i \text{ then class is } C_i,\ i = 1, 2, \cdots, n \quad (1)$$

ここで，i はルール番号，n はルール数，$\boldsymbol{x}_i$ は R^i の入力ベクトル，A_i は前件部のファジィ部分集合，C_i は出力クラスである．本システムでは，ファジィシステムへの入力（属性）数を L とし，入力ベクトル $\boldsymbol{x}$ を式 (2) で定義する．

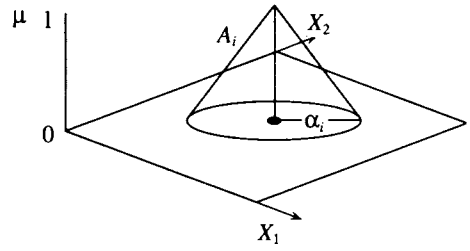


図 1 入力の円錐形メンバーシップ関数 ($l^i = 2$)

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_L \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \quad (2)$$

しかし，各ルールにおいて不必要な入力が存在する可能性もある．そこで．各ファジィルールには必要な属性だけを使うこととし，使わない入力は "don't care" として扱う．したがって，各ルールの入力ベクトル $\boldsymbol{x}_i$ は，式 (3) で表す．

$$\boldsymbol{x}_i = \begin{bmatrix} x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{il^i} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \quad (3)$$

ここで，l^i はルール R^i の入力数である．

ルール R^i の前件部の A_i は，直接入力空間上の領域を指しいる．ここで，ファジィ集合 A_i は以下に示す超円錐形メンバーシップ関数で表す．したがって，ファジィシステムでは n 個のファジィルールがあるので，入力空間に n の超円錐形メンバーシップ関数が配置される．l^i 個の入力によって生じる l^i 次元の入力空間上の超円錐形メンバーシップ関数 μ_{A_i} は，(4)，(5) 式で定義される．

$$\mu_{A_i} : A_i \to [0, 1] \quad (4)$$

$$\mu_{A_i}(\boldsymbol{x}_i) = \left(1 - \frac{\|\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{a}_i\|}{\alpha_i}\right) \vee 0 \quad (5)$$

ここで，$\boldsymbol{a}_i$ と α_i はファジィ集合 A_i の中心座標ベクトルと半径である．$\boldsymbol{a}_i$ は，(6) 式で定義される．

$$\boldsymbol{a}_i = \begin{bmatrix} a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{il^i} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \quad (6)$$

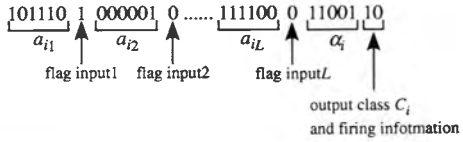


図 2　R^i のコーディング

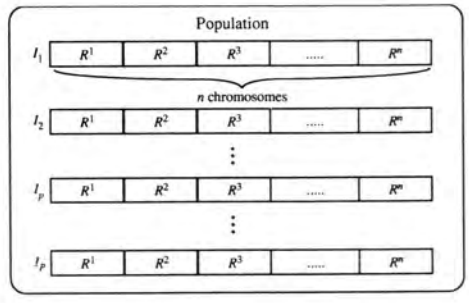


図 3　集団の構成

このメンバーシップ関数 μ_{A_i} は，半径が α_i である超球形ファジィ集合 A_i の中心 $\boldsymbol{a}_i \in \boldsymbol{R}^{l^i}$ がグレード 1.0 となり，その中心からの距離に比例してグレードが下がる．したがって，α_i が大きくなるとそのルール R^i が覆う範囲は広くなるので大域的ルールとみなせ，α_i が小さければそのルール R^i が覆う範囲は狭くなり，局所的ルールとみなすことができる．例として，$l^i = 2$ の場合の円錐形メンバーシップ関数を図 1 に示す．

2.2　推論方法

入力ベクトル $\boldsymbol{x}$ が与えられたとき，ファジィルール R^i のメンバーシップ値 μ_{A_i} は式 (5) で求められる．したがって，メンバーシップ値がそのまま適合度になるので，適合度 ω_i は，

$$\omega_i = \mu_{A_i},\ i = 1, 2, \cdots, n \tag{7}$$

となる．推論結果となる出力クラス C_{out} は，全ルールの適合度の中で最大値 ω_{out} をもつルールのクラスとする（式 (8) 参照）．

$$\omega_{out} = \bigvee_{i=1}^{n} \omega_i \tag{8}$$

3　GA によるファジィ識別システムの自動生成

超円錐形メンバーシップ関数を用いたファジィ識別ルールを GA により自動生成する手法を述べる．ここでは，高次元問題でもコンパクトなファジィシステムを獲得するため，ルール増加法を導入する．

3.1　GA を用いたファジィルール自動生成手法

3.1.1 遺伝子のコーディング

本手法における遺伝情報は，ファジィルール R^i を構成する次の 5 つの要素とする．

- ファジィ集合 A_i の中心座標ベクトル $\boldsymbol{a}_i$
- 各入力の Flag（“don't care”の情報）
- ファジィ集合 A_i の半径 α_i
- ファジィルール R^i の出力クラス C_i
- ルール R^i の発火の許否

ここで「各入力の Flag」は，各入力をそのルールで使うか使わないかの情報である．もしルール R^i の入力 j の情報が「使わない」であれば，ルール R^i のメンバーシップ値を求めるとき入力 x_j は使わない．すなわち，その入力は “don't care” とみなされる．また，「ルール R^i の発火の許否」は，ルール発火の許否を決定する情報である．すなわち，ルール R^i のこの遺伝子が「発火を許さない」という状態であれば，ルール R^i はファジィ推論に使われない．これらの遺伝情報は，図 2 のような染色体としてコーディングする．

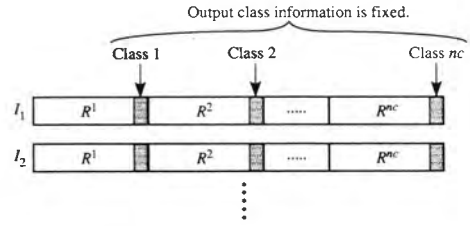


図 4　First Stage での集団の構成

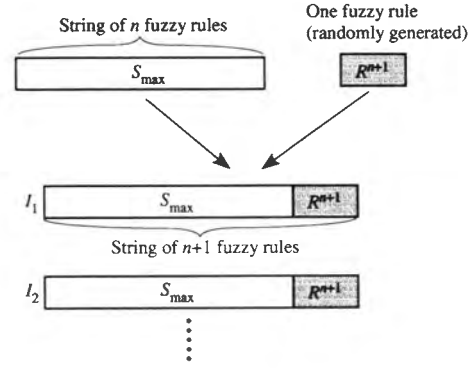


図 5　Second Stage での集団の構成

1 つのファジィシステムは，n 個のファジィルールで構成されるので，個体 I_p $(p = 1, 2, \cdots, P)$ は，n 個の染色体がつながった形で表される（図 3 参照）．P は集団のサイズである．

3.1.2 適応度関数

適応度関数は，正答数が多く，ルール数とルールを構成する入力が少ない個体が高くなるように設計する．したがって，適応度 fit_p は式 (9) で定義する．

$$fit_p = w_1 co_p - w_2 rn_p - w_3 in_p \tag{9}$$

ここで，co_p は正答パターン数，rn_p はルール数，in_p は各ルールで使われる入力の数の合計である．また，w_1, w_2, w_3 は重みである．

3.1.3 遺伝操作

本手法の遺伝操作の流れは，以下のとおりである．

Step 1: 初期集団をランダムに作成する．3.2 で述べる手法では，遺伝子の一部はある決められた値にするものと，遺伝演算の間，固定するものがある．

Step 2: 集団内のそれぞれの個体の適応度を求める．

Step 3: 以下のような遺伝操作を行い，次世代の集団を作成する．

Selection: 適応度比例戦略を用いて交配を行う個体（2 個体）を選択する．

Crossover: 選ばれた個体間で交叉を行う．ここでは一点交叉を行う．

Mutation: 各遺伝子において一定の確率で突然変異を行う．

Reproduction: できた 2 個体を新しい集団に加える．

Step 4: 集団数が P になるまで，Step 3 を繰り返す．

Step 5: G_{end} 世代に達したら終了する．そうでなければ，Step 2 に戻る．

3.2　ルール増加法

ここでは，ルール増加法を用いた手法を提案する．この手法は，前節で述べた手法にベースにしているが，最初に最少のルール数で GA の演算を始め，1 つずつルールを加えなが

表 1 パラメータの設定（ワインデータ）

	Proposed Method	Original Method
Generation parameter	G_{1st} 5000 G_{2nd} 1000 T_{2nd} 5	G_{end} 10000
Population size P	30	30
Initial rule number	3	30
Weight w_1	1.23×10^{-2}	1.38×10^{-2}
Weight w_2	0.0	4.17×10^{-2}
Weight w_3	2.85×10^{-3}	3.21×10^{-3}

表 2 パラメータの設定（WPBC データ）

	Proposed Method	Original Method
Generation parameter	G_{1st} 3000 G_{2nd} 1000 T_{2nd} 2	G_{end} 5000
Population size P	30	30
Initial rule number	2	30
Weight w_1	1.11×10^{-2}	1.20×10^{-2}
Weight w_2	0.0	3.88×10^{-2}
Weight w_3	1.09×10^{-3}	1.17×10^{-3}

ら遺伝演算が進められる．本手法は 2 つのステージにより構成される．

3.2.1 First Stage

First Stage では，最小限のファジィルールを GA により作成する．すなわち，ファジィルールの数をクラスの数とし，それぞれのクラスにおいて主要なルールを GA により獲得する．

クラスの数を nc とすると，First Stage のルール数 n は nc となる．このとき，ファジィルール R^i は i 番目の出力クラスを持つルールとする．したがって，GA により出力クラスを決める必要はなく，前件部の超円錐形メンバーシップ関数の位置と半径のみを決めればよい．First Stage における遺伝子のコーディングを図 4 に示す．図 4 において，各ルールのクラス情報はどの個体も同じとし，ランダムではなく直接その情報を与えるものとする．また，遺伝演算中はその遺伝子は固定とし，突然変異の対象から外す．G_{1st} 世代に達すれば，最大適応度を持つ個体を最高個体 S_{max} として保持され，Second Stage に進む．

3.2.2 Second Stage

Second Stage では，最高個体 S_{max} で構成されるファジィルールにひとつだけファジィルールを加え，GA 演算を実行する．すなわち，ランダムに 1 つのファジィルールの遺伝子を作成し，S_{max} と組み合わせることにより，個体を構成する．図 5 に Second Stage の集団の個体の構成を示す．ここでは，各個体を構成する染色体は，最初の n 個分のルールとして S_{max} の遺伝子と，ランダムに作成した $n+1$ 番目のルールの遺伝子からなる．このような個体を P 個作成し，3.1 で述べた遺伝演算を実行する．First Stage では，クラスを表す遺伝子については突然変異を加えなかったが，Second Stage では全ての遺伝子について遺伝演算の対象とする．

G_{2nd} 世代後，もっとも高い適応度を示した個体を Second Stage における最高個体 S^{2nd}_{max} とし，保持する．S_{max} と S^{2nd}_{max} とを比較して，S^{2nd}_{max} の方が良いパフォーマンスを示したら，S^{2nd}_{max} を新たな S_{max} とする．

以上の操作を T_{2nd} 回繰り返し，最終的に得られた S_{max} を獲得されたファジィシステムとする．

3.2.3 ルール増加法の流れ

First Stage と Second Stage とを含めた流れを以下に示す．

[First Stage]

Step 1: 図 4 のような初期集団を生成する．

Step 2: 遺伝演算を実行する．

Step 3: G_{1st} 世代後，最大適応度を持つ個体を S_{max} とし，保持する．

[Second Stage]

Step 4: S_{max} を用いて図 5 ような初期集団を生成する．

Step 5: 遺伝演算を実行する．

Step 6: G_{2nd} 世代後，G_{2nd} 世代の間で最大適応度を持つ個体を S^{2nd}_{max} とし，保持する．

Step 7: もし S^{2nd}_{max} が S_{max} よりも良いパフォーマンスを示せば，S^{2nd}_{max} を新たな S_{max} とする．

Step 8: もし T_{2nd} 回繰り返したなら Step 9 へ，そうでないなら Step 4 に戻る．

Step 9: S_{max} を獲得されたファジィシステムとする．

4 パターン識別問題への応用

3.2 で述べた提案手法を，ワインデータと乳癌の予測 (WPBC: Wisconsin Prognostic Breast Cancer) データに応用する [10]．比較のため，ルール増加法を用いない手法 (Original Method) についても行った．すなわち，3.1 で述べた手法だけを使った手法である．

4.1 ワインデータへの応用

ワインデータは，13 属性（入力）3 クラス問題であり，178 個のデータからなる．それぞれのクラスデータのうち 50%を学習用データとし，残りをテスト用データとした．ここでは，学習用データは 90 個，テスト用データは 88 個である．両方の手法のパラメータは，表 1 のように設定した．また．突然変異率は 1.0%とした．それぞれの手法とも 10 回実行し，評価をおこなった．

表 3 にワインデータのシミュレーション結果を示す．提案法の平均ルール数は 3.7 であり，各入力で使われる入力の数は 2.6 であった．入力の Flag を使うことにより，残りの約 10.4 の入力が “don't care” となった．これらの値は，Original Method と同じような値を示している．したがって，提案法も Original Method と同様に，少ない入力であるルールで構成されるコンパクトなファジィシステムが得られている．また，提案法の正答率の平均は学習用データで 98.60%であり，テスト用データの最高値でも 97.70%に達している．これらより，Original Method より良い結果を示している．

ワインの場合，3 つのクラスから構成されるので，ルール数の最小値は 3 である．Second Stage は，システムのパフォーマンスを改善するために重要であるが，多くのケースで First Stage でベストなパフォーマンスを示すファジィシステムが現れている．

4.2 乳癌 (WPBC) データへの応用

WPBC データは，33 属性（入力）2 クラス問題であり，198 個のデータからなる．しかし，4 つのミスデータが混ざっているので，これらを除いたデータのうち 50%を学習用データとし，残りをテスト用データとした（それぞれ 97 データ）．両方の手法のパラメータは，表 2 のように設定した．また．突然

表 3　ワインデータのシミュレーション結果

		Proposed Method	Original Method
Training data (90)	Average	88.7(98.60%)	84.8(94.22%)
	Maximum	90(100.00%)	86(95.56%)
Test data (88)	Average	81.8(92.95%)	78.3(89.00%)
	Maximum	86(97.70%)	84(95.45%)
The average number of rules		3.7	3.5
The average number of inputs of each rule		2.6	3.3

表 4　WPBC データのシミュレーション結果

		Proposed Method	Original Method
Training data (97)	Average	74.0(76.29%)	73.5(75.77%)
	Maximum	75(77.32%)	74(76.29%)
Test data (97)	Average	73.9(76.19%)	71.0(73.20%)
	Maximum	74(76.29%)	73(75.26%)
The average number of rules		2.0	3.7
The average number of inputs of each rule		7.48	12.20

変異率は 1.0%とした．それぞれの手法とも 10 回実行し，評価をおこなった．

表 4 に WPBC データの結果を示す．提案法の平均ルール数は，2.0 である．これは，First Stage でのルール数が 2 であり，ほとんどの場合，First Stage でベストな結果を得るファジィシステムが得られたと考えられる．また，各入力で使われる入力の数の平均は，7.48 であった．以上より，WPBC データの場合，Original Method よりコンパクトなファジィシステムが得られている．学習用データの正答率平均は 76.29%であり，テストデータの平均でも 76.19%である．したがって，Original Method より若干であるが精度が上がっている．

しかし，残りの約 24%が誤認識となった．しかもほとんどの場合が First Stage で得られたものが，ベストなファジィシステムとして選ばれている．これは，ある程度の精度を持つ最小限のコンパクトなファジィシステムは，First Stage の GA で得ることができるが，Second Stage ではパフォーマンスを改善するに至るファジィルールを加えることができなかったと考えられる．Second Stage では，加えるルールの遺伝子をランダムに作成し初期集団を構成していたが，効果的なルールを追加方法を検討する必要がある．

5　おわりに

本稿では，超円錐形メンバーシップ関数を用いたファジィ識別ルールを GA により自動生成する手法を提案した．また，ルール増加法を組み合わせることにより，コンパクトなシステムを得ることができた．今後の課題として，精度が上がるようなルール増加法の適用を検討する必要がある．また，得られたルールの妥当性についても検討する必要がある．

参考文献

[1] S. Horikawa, T. Furuhashi and Y. Uchikawa, "On Fuzzy Modeling Using Fuzzy Neural Networks with the Back-Propagation Algorithm," *IEEE Trans. Neural Networks*, vol.3, no.5, pp.801–806, 1992.

[2] 亀井：「ファジィクラスタリングの制御への応用」，日本ファジィ学会誌，vol.8, no.3, pp448–455, 1996.

[3] 鬼沢，安斎：「対話による人間が納得できるファジィルールの獲得」，第 16 回ファジィ システム シンポジウム講演論文集，pp.451–454, 2000.

[4] 井上，畑瀬，亀井：「統合によるルール削除手法を用いたファジィクラシファイアシステムによるファジィルール自動生成」，第 16 回ファジィ システム シンポジウム講演論文集，pp.459–462, 2000.

[5] H. Ishibuchi, K. Nozaki, N. Yamamoto and H. Tanaka, "Construction of Fuzzy Classification Systems with Rectangular Fuzzy Rules Using Genetic Algorithms," *Fuzzy Sets and Syst.*, vol.65, no.2/3, pp.237–253, 1994.

[6] T.Murata, H.Ishibuchi, and M.Gen, "Adjusting Fuzzy Partitions by Genetic Algorithms and Histograms for Ppattern Classification problems," In *Proc. 1998 IEEE Int. Conf. on Evolutionary Computation*, pp.9–14, 1998.

[7] T.Nakashima, H.Ishibuchi, and T.Murata, "Evolutionary algorithms for constructing linguistic rule-based systems for high-dimensional pattern classification problems," In *Proc. 1998 IEEE Int. Conf. on Evolutionary Computation*, pp.752–757, 1998.

[8] 馬野，福中，鳩野，田村：「忘却の概念を用いたファジィ・ニューラルネットワークによるファジィルールの抽出」，計測自動制御学会論文集，vol.32, no.3, pp.409–416, 1996.

[9] 井上，亀井，井上：「遺伝的アルゴリズムと超円錐形メンバーシップ関数によるファジィルール自動生成手法の提案」，日本ファジィ学会誌，vol.8, no.6, pp.1104–1115, 1996.

[10] [UCI Repository of Machine Learning Databases Network Document], Available: ftp://ftp.ics.uci.edu/pub/machine-learning-databases/.

問い合わせ先

〒 910-8507 福井市文京 3-9-1
福井大学教育地域科学部
井上博行
TEL: 0776-27-8714 FAX: 0776-27-8911
Email: inoue@edu00.f-edu.fukui-u.ac.jp

遺伝的アルゴリズムを用いたファジィ決定木生成手法の改良

Improvement of Generation Method of Fuzzy Decision Tree by Genetic Algorithm

馬野 元秀　喜多 主季　堀 和憲
Motohide Umano　Kazuki Kita　Kazunori Hori
瀬田 和久　宇野 裕之　岡田 真
Kazuhisa Seta　Yushi Uno　Makoto Okada
大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
Department of Mathematics and Information Sciences
College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

Abstract In the previous paper, a fitness value was defined only on the correction rate in a generation of fuzzy decision tree by genetic algorithm. In this paper, the size of a fuzzy decision tree and the degree of duplication of attributes in all paths from the root node to leaf nodes are also considered with the correction rate as a fitness value. And a simulation for the method is performed and results are described.

1. はじめに

従来, ファジィ決定木の生成にはファジィID3やこれらを拡張した方法が用いられてきた [1]. しかし, これらの方法では決定木をルート節点から順に生成するので解候補をかなり絞ってしまう. そこで, 遺伝的アルゴリズムを用いることによりファジィID3より広い解候補を調べて, ファジィ決定木を生成する方法を以前に提案した [2].

しかし, 前に提案した方法では, 適応度の評価方法として正解率しか考慮していなかったので木が大きくなった. 今回はその改良として, 木の大きさとルート節点から葉節点へのパスにおける属性の重複の度合も評価に取り入れた.

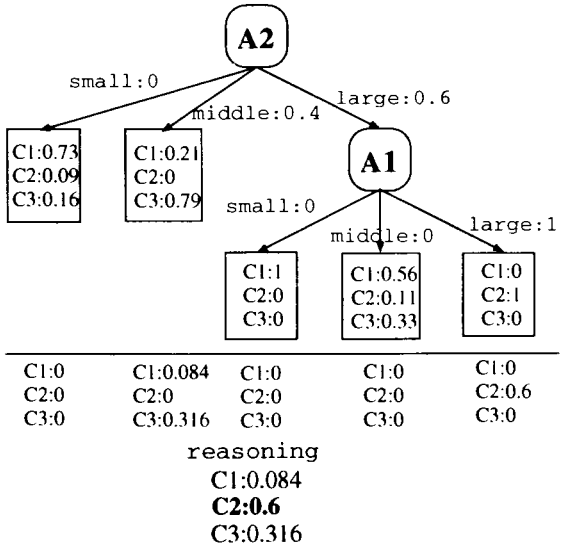


図 1: ファジィ決定木の例

2. ファジィ決定木の生成

2.1 ファジィ決定木とは

ファジィ決定木では, 図1のようにテスト節点から出ている枝にファジィ集合がついており, 葉節点には複数のクラスと確信度が割り当てられている. そして, 推論はルート節点から葉節点へたどっていき, テスト節点ではその属性の値が各枝のファジィ集合を満たす度合と葉節点のクラスの確信度を考慮し, 結果のクラスの確信度を求める.

図1のファジィ決定木を用いた推論は次のようになる. データは (A1の値, A2の値, A3の値, A4の値, クラス) として, 推論したいデータを d=(4.5, 7.2, 1.9, 2.5, ?) とする. まず, ファジィ決定木のルート節点がA2なのでデータの属性A2の値7.2の各枝のファジィ集合に対する一致度を計算する. 今は small:0, middle:0.4, large:0.6 とする. 枝 small をたどると葉節点になり, 一致度 0 と各クラスの確信度との積を求める. 枝 middle をたどった場合も葉節点になり, 一致度 0.4 と各クラスの確信度との積を求める. 枝 large をたどるとテスト節点と

なり, 属性がA1なので d のA1の値は4.5であり, ファジィ集合に対する一致度がsmall:0, middle:0, large:1となるとする. small, middle, largeで, これらの一致度とA2のlargeの一致度0.6と各クラスの確信度との積を求める. 結果として各葉節点の推論の値は図1のようになり、各クラスごとに和をとってC1:0.084, C2:0.6, C3:0.316が得られ, この値が一番大きいC2を推論結果とする. d のクラスがC2ならば正解となり, それ以外ならば不正解となる.

2.2 生成のアルゴリズム

本手法では, まず遺伝的アルゴリズムで決定木の構造を決め, これに学習用のデータを与えてクラスと確信度を決めることにより, ファジィ決定木を生成する. したがって, 各属性のファジィ集合と学習用のデータが与えられている. したがって, ファジィ決定木生成のアルゴリズムは図2のようになる. 以下, 初期個体の生成, 交叉, 突然変異, クラスの確信度の決定, 評価の説明を行なう.

(1) 初期個体の生成

ルート節点から順にランダムに属性を選んで行く. ただし, ルート節点からクラス節点までの一つのパスの中に同じ属性が現れないようにするという条件をつけた. 例えば, A1, A2, A3, A4を属性とすると, 図3のような初期個体が得られる.

(2) 交叉

親となる二つの個体から一つずつランダムに部分木を選び, これらを入れ換える. 例えば, 図1の個体を親parent1とparent2とし, 斜線の入った部分木が選ばれて交叉すると, 図4のようにchild1とchild2が生成される.

(3) 突然変異

葉節点以外のすべての節点で突然変異率に従い

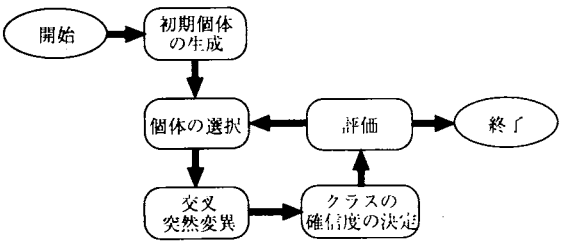


図 2: 生成のアルゴリズム

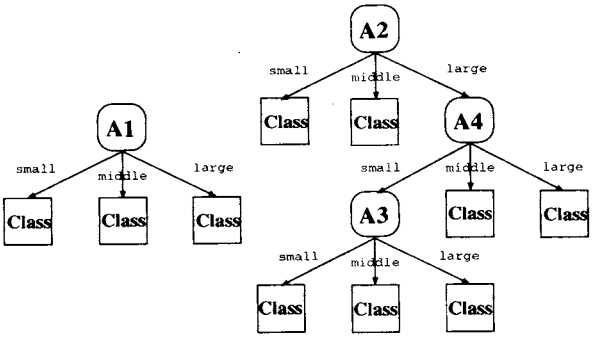


図 3: 初期個体の例

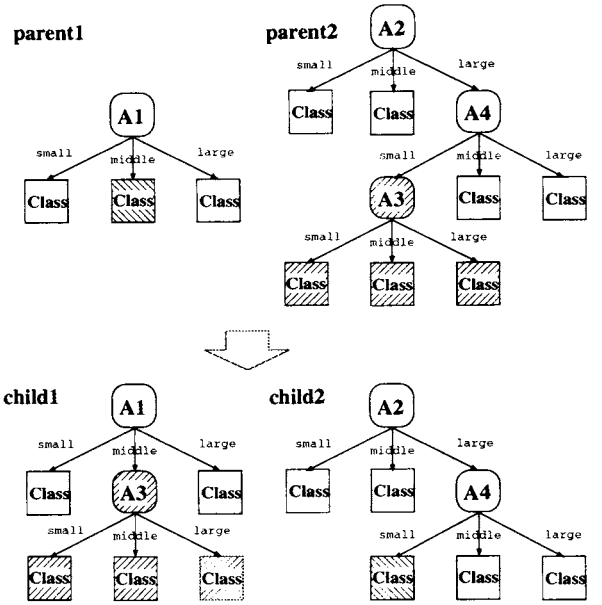


図 4: 交叉の例

突然変異させる. 突然変異はランダムに元とは異なる属性に変化させる. 図5では, 属性A4が属性A1に変化している.

(4) クラスの確信度の決定

今, 図5の突然変異後の決定木を用いて、クラスの確信度をN個のデータを見て決めよう. 一つ目のデータを d_1=(5.6, 4.5, 0.9, 1.5, C1) とする. まず, ファジィ決定木のルート節点の属性がA2なのでデータの属性A2の値4.5の各枝のファジィ集合に対する一致度を計算する. いまはsmall:0, middle:0.2, large:0.8となるとする. 次に枝smallをたどると葉節点になり d_1 のクラスはC1であるが, 一致度が0なので確信度はC1:$0 \times 0 = 0$, C2:$0 \times 0 = 0$, C3:$0 \times 0 = 0$になる. 枝middleもたどると葉節点になりクラスはC1で一致度は0.2だから、確信度

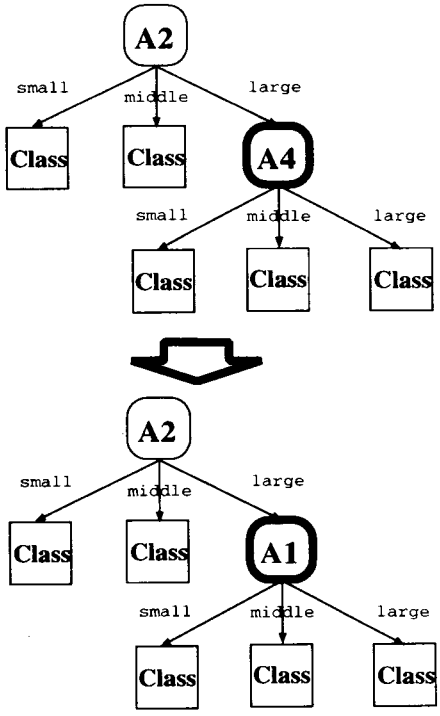


図 5: 突然変異の例

はC1:0.2×1 = 0.2, C2:0.2×0 = 0, C3:0.2×0 = 0となる. 枝largeをたどるとテスト節点で, 属性がA1なのでd_1のA1の値5.6の, ファジィ集合に対する一致度を計算する. これは, small:0, middle:0.1, large:0.9となるとする. これらの一致度とA2の枝largeの一致度0.8との積をC1の確信度とする. d_1を処理した結果は図6のようになる. 同様に, N個のデータに対して, それぞれの葉節点で正解クラスにその葉節点までの枝のファジィ集合の一致度の積を加えて行く. そして, 最後に各葉節点ごとに正規化すると, 図1の決定木が得られる. ただし, データが来なかった葉節点では, すべてのクラスの確信度を0とする.

(5) ファジィ決定木の評価方法

ファジィ決定木の評価として, 従来は正解率のみを考慮していた. 今回は, 正解率の他に, 木の大きさとルート節点から葉節点までの各パスで, 属性が重複している度合を考慮して次の式を用いる.

$$\text{評価値} = \alpha \times \text{正解率} + \beta \times \text{重複度} + \gamma \times (1 - \text{木の大きさの度合})$$

ただし,

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (\alpha, \beta, \gamma \text{は重み})$$

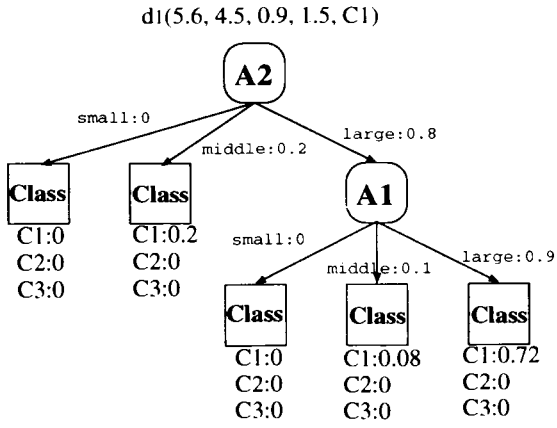


図 6: d_1 を処理

- 正解率：評価用のデータを使い推論し, 正解率を求める.

- 重複度：交叉や突然変異によりファジィ決定木を作成すると, ルート節点から葉節点までのパス上に同じ属性が出てきてしまう. ファジィ決定木の場合にはまったく意味がないという訳ではないが (例えば, largeが二つでてきたときは, very largeと解釈することも可能である), クラスを分類するという意味では冗長な場合が多いので, このような木は評価を低くする.

  ルート節点から葉節点までの各パスで各属性が重複した回数の和を求め (例えば, 属性A1が4個, 属性A3が2個あれば, 重複回数を3+1回で4回とする), すべてのパスで和をとったものをmとすると, 重複度はb^mで定義される. $0 < b < 1$とすることにより, 重複の数が多い程, 重複度が小さくなる.

- 木の大きさの度合：決定木のすべてのテスト節点の数をnとすると, 木の大きさの度合はm/n^*と定義される. n^*はルート節点から葉節点までのパスで重複なく全属性を使用している決定木の節点数をもとにして決めた定数である.

評価値に木の大きさと重複度を用いることにより, 節点数が多いときや重複が多いときは, 適応度が下がるので, 枝刈りを行わなくても淘汰され, 枝刈りと同じ効果が得られると期待できる.

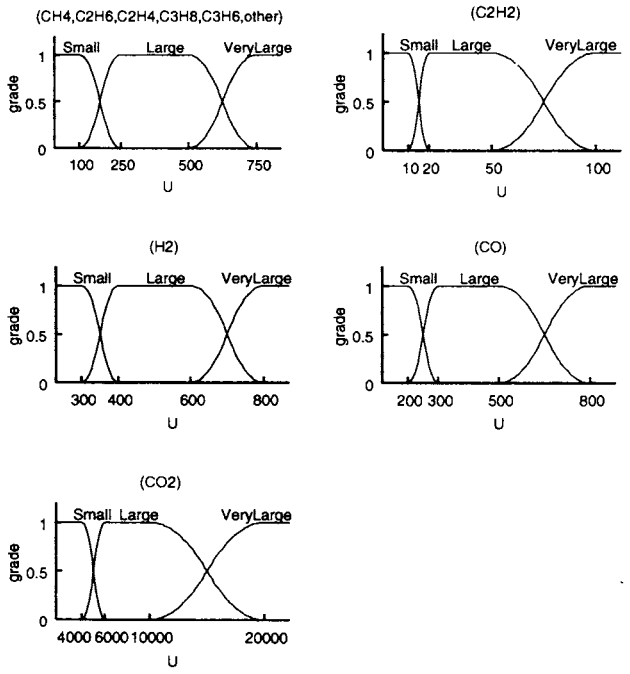


図 7: ファジィ集合

3. 数値実験

以上の方法について, 数値実験を行った. データは属性数 10, クラス数 4, データ数 220 の油中ガス分析のものを使用した [3].

学習用データと評価用データは 1:1 で分割し, 2 foldcrossvalidation 法を用いた. また, ファジィ集合は図 7 を使用した.

個体数 21(うち, 1 はエリート保存用), 交叉率 0.4, 突然変異率 0.05, 世代数 100 で評価の重み α, β, γ を表 1 のように設定したときの最高適応度になった決定木をエリート保存し, 適応度, 正解率, 重複度, 大きさを求める. これを 100 回試行したときの平均値と最高値と最低値は表 1 のようになる.

正解率のみで評価する従来の方法 GA4 に比べて今回提案した GA1 は正解率は少し小さいが木の大きさ, 重複の度合の面で圧倒的に優れた決定木が求められている. 重複度を考えず, 正解率と木の大きさで評価する GA2 は従来の方法よりは木の大きさが小さいが重複している可能性が高いので節点数は GA1 より少し大きくなっている. 重複度と正解率だけを見る GA3 は, 重複度を小さくすると木が小さくなるので平均の節点数は, 小さくなっている.

表 1: 数値実験の結果

評価方法		GA 1	GA 2	GA 3	GA 4
α(正解率)		0.8	0.8	0.8	1
β (重複度)		0.1	0	0.2	0
γ(大きさ)		0.1	0.2	0	0
適応度	平均	0.7957	0.8055	0.7969	0.7834
	最高	0.8426	0.8525	0.8327	0.8410
	最低	0.7571	0.7611	0.7527	0.7273
正解率	平均	0.7541	0.7760	0.7480	0.7834
	最高	0.8545	0.8273	0.8000	0.8410
	最低	0.7000	0.7136	0.6909	0.7273
重複度	平均	0.64	22.8	0.12	110.4
	最高	22	173	3	2844
	最低	0	0	0	0
テスト節点数	平均	33.79	55.81	34.63	88.39
	最高	115	148	88	445
	最低	7	10	7	16

4. おわりに

本論文では, 遺伝的アルゴリズムを用いたファジィ決定木生成手法において, 評価方法に正解率に加えて木の大きさと重複度を入れることで良い決定木が得られるようになった. しかし, パラメータ α, β, γ の変化による結果を十分に検討していないので, 検討を行ない, さらに手法の改良を加えていきたい.

参考文献

[1] 堀 和憲, 馬野 元秀, 瀬田 和久, 宇野 裕之, 岡田 真 : ファジィ決定木生成法 ファジィC4.5 とその改良 (その 3), 第 18 回ファジィ システム シンポジウム, pp.237–240 (2002)

[2] 馬野 元秀, 吉村 正義, 鳩野 逸生, 田村 坦之 : 遺伝的アルゴリズムによるファジィ決定木の生成, 第 12 回ファジィ システム シンポジウム, pp.823–826 (1996)

[3] 河内 二三男, 松浦 敏之 : 油中ガス分析診断エキスパートシステムの開発と実用における評価, 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-90-40 (1992)

[問い合わせ先]
〒599–8531 堺市学園町 1 – 1
大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
馬野 元秀
TEL: 072–254–9675
FAX: 072–254–9930
Internet: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

確率モデルに基づいたルール生成機構を導入したXCS

XCS with Probabilistic Model Based Rule Generation Mechanism

半田 久志
Hisashi Handa
岡山大学工学部
Okayama University

Abstract : XCS proposed by Wilson have attracted much attentions due to its capability. In this paper, we incorporate a new rule generation mechanism into Wilson's XCS. The rule mechanism adopts probabilistic models to capture which loci are relevant. Simulation results on 20-multiplexer problems confirm us the effectiveness of the proposed method.

1 はじめに

XCS は Wilson によって提案された分類子システムであり、その探索性能から注目を浴びているアルゴリズムである。この XCS では行動集合に対して遺伝的アルゴリズムを用いていることによりルール探索を行っている。しかしながら、GA によるルール探索はかならずしも効果的であるとは言いがたい。そこで、本稿では、過去の観測事例を見積誤差で重み付けして構成したデータ集合から確率モデルを生成し、その確率モデルからルール前件部を生成する機構を導入した新たな XCS を提案する。提案手法と従来型の XCS について 20-マルチプレクサ問題に適用しその有用性を示す。次節では、Wilson によって提案された XCS について、Holland の分類子システムからの拡張された点を中心に紹介する。そして、3 節では提案手法を導入し、4 節にて 20-マルチプレクサ問題への適用結果を述べる。

2 XCS

XCS は Wilson によって提案された分類子システムであり、Holland の分類子システムに対してさまざまな拡張がなされているアルゴリズムである. 従来型分類子システム (Holland の分類子システム) に対する XCS の主な変更点として以下のものが挙げられる：一点目は適応度に関する変更である. 従来型分類子システムではルールの強度（価値、報酬見積）を行動選択に用い、さらに、この強度を GA 演算時の適応度としていた. このため、従来型分類子システムでは過度に汎化されたルールが獲得される問題があった。例えば、ある局面において、次数が低くかつ報酬へと導くようなルールが見出されるたとする。このとき、このルールはすでに報酬を得ているため十分な強度を有していることになり、そして、一般的なルールであるので、他の局面においても発火することが多くなる。このルールが発火したすべての局面において有効であれば良いが、一般的なルールであればあるほど、常に有効であることは稀となる。このようなルールは十分に正確なルール表現となっていなくても、ある程度、報酬が得られるので、従来型分類子システムでは GA 演算で淘汰されずに生き残ってしまう。一方、XCS では、ルールの報酬見積を行動選択に用い、報酬見積の精度 (accuracy) に基づいた適応度を用いて GA 演算を行う。すなわち、XCS は GA 演算によって正確なルール表現を探索し、従来型分類子システムにあるような過汎化を防ぐことができる。ここで XCS における分類子の適応度計算方法について述べる：分類子 j の適応度 F_j は関連付けられた 3 つのパラメータ、報酬見積 p_j、見積誤差 ε_j、報酬見積の精度 κ_j を計算してから精度 κ_j に基づいて計算される。まず報酬見積 p_j はルール発火時に Q 学習と同様の方法で更新される。

$$p_j \leftarrow p_j + \beta(P - p_j)$$

ここで、β は学習率、P はパターン分類やマルチプレクサ問題のようなシングルステップ問題の場合、報酬となる[1]。見積誤差 ε_j は次式で更新される。

$$\varepsilon_j \leftarrow \varepsilon_j + \beta(|P - p_j| - \varepsilon_j)$$

報酬見積の精度 κ_j は次式で計算される。

$$\kappa_j = \begin{cases} \exp[(\ln \alpha)(\varepsilon_j - \varepsilon_0)/\varepsilon_0] & \text{if } \varepsilon_j > \varepsilon_0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

ここで、α は予め決められた定数であり $(0 < \alpha < 1)$、ε_0 は閾値を表す。閾値 ε_0 より悪い誤差のとき精度が指数関数的に減少する。行動集合 $[A]$ に含まれる分類子が有する精度の和でわった相対精度 κ'_j を用いて適応度を規定する。

$$F_j \leftarrow F_j + \beta(\kappa'_j - F_j)$$

上にあげた 4 つの式から判るように、XCS の GA 探索の基となる適応度は、強度ではなく、いかに報酬見積が

[1] 報酬が各ステップで得られないマルチステップな環境、いわゆる強化学習問題では、Q 学習と同様に次時刻の最大報酬見積と得られた報酬の和が P となる。

報酬に近いかによって決められている。これは分類子の前件部が適切な部分空間を表現していないとき、すなわち、前件部が表現している部分空間に属する事例集合の報酬にばらつきがあるときには、そのような分類子は低い適応度を有することとなる。

二点目の主な変更点はGAの適用方法である。従来型の分類子システムでは、分類子集団全体に対して、交叉や突然変異といったGA演算を適用することにより新たな分類子集団を形成していた。これは、GA探索という観点からすると、一番、自然な適用方法であると考えられるが、全く異なった局面でしか発火しない分類子群に対して交叉を行うことが考えられ、効率的な探索がなされているとはいい難い。そこで、XCSでは、niche GAと呼ばれる機構を導入している：XCSでは分類子集団$[P]$にある観測事例が与えられると、その観測事例と整合する分類子の集合（マッチ集合$[M]$）を形成する。さらに、マッチ集合$[M]$に属する分類子を後件部の種類に応じて分類し、行動集合$[A]$を形成する。XCSにおけるGA演算はこの行動集合$[A]$に対して施される。

このほかにも、XCSは正確で、できる限り一般的なルールセットの獲得を試みるために、包摂削除やマクロ分類子といった、たくさんの工夫がなされているがここでは紹介しない.

3 提案手法

3.1 概要

本研究ではXCSに確率モデルに基づいたルール生成機構を導入することにより、XCSの性能改善を試みる。提案手法では、XCSが行う環境とのインタラクション–観測された事例とそのときのXCSの出力–を記録する。予め決められた個数だけ事例がデータセットに貯まると、データセットから確率モデルを生成する。本研究では、確率モデルとしてベイジアンネットワークを用いた。一旦、確率モデルが生成されると、XCSのGA演算適用時に、ある確率で、この確率モデルを用いてルールを生成する遺伝演算を用いて、あらたなルール生成を行う。また、確率モデルが構成されるたびにデータセットをクリアし再びデータ格納を始める。そして、データが予め決められた個数だけ貯まる度に確率モデルの更新を行う。これまでの交叉や突然変異といった遺伝演算とは異なり、提案手法では、過去の事例に即したルールを適切に生成することが期待される。以下の小節では、データ格納方法、モデル生成方法、ルール生成方法について述べる。

3.2 データ格納方法

提案手法では、前述のように、データセットに観測された事例とそのときのXCSの出力を格納する。このときにすべてのデータを等しく格納するのではなく、報酬と、XCSが出力を出した分類子の報酬見積との差分をとり、この差分が正のとき、事例をデータセットに格納する。さらに、差分の大きさに応じて同じデータを複数回、データセットに格納するようにした。すなわち、

$$(P - p_j) * C_{Multi}/P_{Range}$$

を計算し、正の場合、整数部分に対応する個数をデータセットに格納した。ここで、C_{Multi},P_{Range}は予め決められた定数である。このことにより、現在の見積より良い事例・出力の組み合わせに内在するパターンを積極的に捕らえようとするバイアスをかけている。

3.3 モデル生成方法

まず、前節で格納したデータセットのうち観測事例に対して、LarrañagaらのEBNA_{BIC} (Estimation of Bayesian Networks Algorithms)と同様の方法で確率モデルを生成する。すなわち、データセットに含まれる観測事例集合Dに対する、ネットワーク構造Sのベイズ情報量基準$BIC(S,D)$をスコアとし、アークの追加による局所探索により適切なネットワーク構造S^*を決定する。そして、もとまったネットワーク構造S^*と観測事例集合Dを用いて条件付確率モデルを導出する。

ネットワークの構造Sと観測事例集合Dが与えられたときのベイズ情報量基準は次式で表される:

$$BIC(S,D) = \sum_{i=i}^{n}\sum_{j=1}^{q_i}\sum_{k=1}^{r_i} N_{ijk}\log\frac{N_{ijk}}{N_{ij}} - \frac{1}{2}\log N\sum_{i=1}^{n} q_i(r_i-1).$$

ここで，ネットワーク構造Sは有向非循環グラフを表し，nは変数の個数，r_iは変数X_iがとりうる値の個数，q_iはSにおける親変数がとりうる値の組合せ総数，N_{ij}は変数X_iの親変数がとりうる値の組合せの中でj番目の値をとったデータの個数，N_{ijk}は変数X_iの親変数がとりうる値の組合せの中でj番目の値をとったときに変数X_iがk番目の値をとったデータの個数を表す[7].

考えうるネットワーク構造の組み合わせ総数は変数の個数nに対して指数オーダーであるので，以下の手順でネットワーク構造を決定する：

1. $S \leftarrow \emptyset$

2. Sにアークを1本追加したS'で$BIC(S'D)$を計算

3. 2. で計算した $BIC(S'D)$ で一番良かった S' が $BIC(S.D)$ より良ければ $S \leftarrow S'$ とし 2. に戻る。悪ければ探索終了。

上で求めた S について観測事例集合の情報を基にして条件付確率を計算する。さらに、本研究では S に含まれる末端ノード、すなわち、アークがどのノードにも出ていないノードに対して、後件部にアークをはり、それらについても条件付確率を設定する。ただし、この時、複数のノードが末端ノードとなっていても、複数のノードの値を同時に考慮することはせずに、各々のノードに対する後件部のノードについて条件付確率を定義するものとする。

3.4 ルール生成方法

前小節で作られた確率モデルと、GA 演算を適用したときの観測事例と分類子を用いて新たな個体を生成する。このルール生成機構は確率 P_{op} でもともとの XCS における交叉・突然変異演算の代わりに適用する。このルール生成機構では、もととなる分類子のそれぞれの遺伝子座と後件部が確率モデル上でアークが存在している場合、すなわち前小節の S で遺伝子座が末端ノードに相当している場合、前小節で定義された条件付確率の値を参照して確率的にドントケアシンボルに置き換える。つぎに、分類子 j のスコア $s(j)$ を以下のように計算する。

$$s(j) = \sum_{k \in r(j)} s_{sub}(k)$$

ここで $r(j)$ は分類子 j でドントケアシンボルではない遺伝子座の集合で、$s_{sub}(k)$ は遺伝子座 k に関する部分スコアで次のように計算する。

$$s_{sub}(k) = \begin{cases} \log(1/dom(k)) & \text{if } r(k) \not\subseteq pa(k) \\ & \text{or } P(x_k|x_{pa(k)}) = 0 \\ \log(P(x_k|x_{pa(k)})) & \text{otherwise} \end{cases}$$

ここで、$dom(k)$ は遺伝子座 k における対立遺伝子数、$pa(k)$ は確率モデルの構造 S において遺伝子座 k の親ノードの集合、x_k は遺伝子座 k における対立遺伝子の値、$x_{pa(k)} = x_j | j \in pa(k)$ とする。このスコアを最大化するように、親ノードの値をルールに付け加えたり、ルールから削除することによりルールを改変する。

4 計算機シミュレーション

本稿では、20-マルチプレクサ問題に、もともとの XCS と提案手法を適用した。20-マルチプレクサ問題とは 20 ビットの観測文字列と 1 ビットの出力からなる問題であり、観測文字列はさらに指定部の 4 ビットとデータ部の 16 ビットからなる。指定部 4 ビットを 10 進数に変換した数を $x(0 \leq x < 16)$ とすると、分類子システムはデータ部の x 番目のビットと同じ情報を出力すれば報酬が得られる。

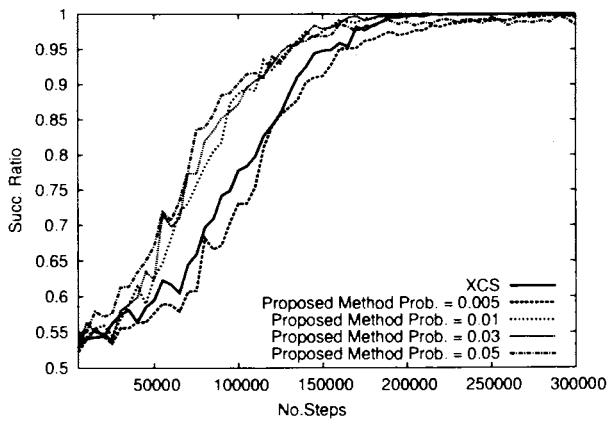


図 1: 20-マルチプレクサ問題への適用:(適用確率 P_{op} の変化)

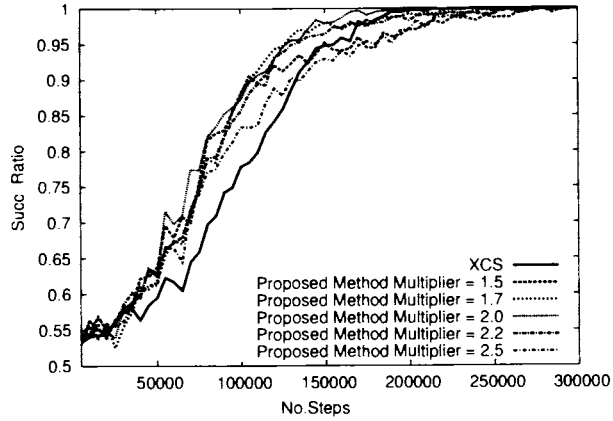


図 2: 20-マルチプレクサ問題への適用:(データ格納時の定数 C_{Multi} の変化)

XCS は ver1.1 を用いた。提案手法はこのソースコード上に必要なモジュールを追加する形で実装した。提案手法と XCS のパラメータはソースコードに記載されているものをそのまま用いた。提案手法のパラメータとして、データセットの大きさは 30000 とした。図 1 に C_{Multi} を 0.003 としたときに P_{op} を 0.005 から 0.05 まで変化させたときの計算結果を示し、また、図 2 に P_{op} を 0.003 としたときに、C_{Multi} を 1.5 から 2.5 まで変化させたときの計算結果を示す。これらのグラフでは、20 試行の平均を取ったものをプロットしており、横軸がステップ数で縦軸が 50 ステップあたりの成功ステップ割合を表している。また、グラフ中の実線はもともとの XCS を示している。これらのグラフより、いくつかのパラメータ設定において、提案手法は XCS よりも速く収束していることがわかる。

5 むすび

本稿では、過去の観測事例を見積誤差で重み付けして構成したデータ集合から確率モデルを生成し、その確率モデルからルール前件部を生成する機構を導入した新たなXCSを提案した。4節では、提案手法と従来型のXCSについて20-マルチプレクサ問題に適用し、その有用性を示した。今後の課題として、他の分類問題だけでなくロボットの行動計画問題のようなマルチステップ問題に適用し、提案手法の有用性を検証するとともに、分類子システムという文脈において確率モデルのさらなる効果的な使用法について考察したい。

参考文献

[1] D.E.Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, Addson-Wesley, (1989).

[2] J. H. Holland: Adaptation in Natural and Artificial Systems, The MIT Press (1992)

[3] S. W. Wilson: Classifier Fitness based on Accuracy, Journal of Evolutionary Computation, MIT Press, Vol. 3, No. 2 pp.149–175 (1995)

[4] S. W. Wilson: Generalization in the XCS Classifier System, Proceeding of The Third Annual Conference on Genetic Programming Confernce, pp.665–674 (1998)

[5] M. V. Butz: An Implementation of the XCS Classifier System in C, IlliGAL Report No. 99021 (1999)

[6] XCS classifier system implementation in C, version 1.1, http://www-illigal.ge.uiuc.edu/sourcecd.html

[7] P. Larrañaga and J. A. Lozano Editors: Estimation of Distribution Algorithms, Kluwer Academic Publishers (2002)

連絡先：

〒700-8530
岡山市津島中 3-1-1
岡山大学 工学部 情報工学科
半田 久志
電話：086-251-8250
FAX: 086-251-8250
E-mail：handa@sdc.it.okayama-u.ac.jp

遺伝的アルゴリズムを用いたマルチエージェントシステムの構築

移動目標物捕獲問題への応用

A study of constructing multi argent system using genetic algorithm
Applying for a problem of capturing moving objects

岸田 一也† 米澤 祐也† 宮島 廣美‡
KISHIDA Kazuya YONEZAWA Yuya MIYAJIMA Hiromi
†鹿児島高専 ‡鹿児島大学工学部
Kagoshima National College of Technology. Faculty of Engineering, Kagoshima Univ.

Abstract: We described a construction of multi agents systems using genetic algorithm in this paper. The multi agents system is applied for a problem of capturing moving objects. In order to capture many moving objects, agents need some cooperations each other. Then we have used a strategy of determining a behavior of each agent using weights that each agent has in its neighborhood for moving objects and other agents. We proposed two type of agents that take a different information quantity. Then we made a multi agent system using these agents. Further, we determined a suitable value of parameter α that shows the cooperation between agents.

1 はじめに

外部環境や経験の中からどのようにして知見を見出すかは，今日大変重要な問題として多くのソフトコンピューティングの分野で盛んに研究がなされてきている．複数のエージェントの協調行動を自立的に学習する問題もその中の一つである．このような複数のエージェントの協調行動により問題解決を行なうシステムとしてマルチエージェントシステム [1] がある．マルチエージェントシステムはさまざまな問題に応用されているが，その中の1つに移動目標物捕獲問題 [2, 3] がある．移動目標物捕獲問題は，移動する（逃避する）物体をエージェントが協調して捕獲するといった，非常に単純な問題であるが，協調行動の学習法を研究するには，興味深いと考えられる．

本研究では，移動目標物捕獲問題においてのマルチエージェントシステムを構築するために，遺伝的アルゴリズム（GA）を用いた協調行動の自立学習手法を考察する．その中で，能力（視界の範囲）の異なるのエージェント群 [4] によるシステムの構築を行い，それぞれのシステムにおける捕獲数の検討を行なう．また，協調行動の指標を示すパラメータ α を GA に組み込むことにより，適当なパラメータの設定を行なう．

2 移動目標物捕獲問題

移動目標物の捕獲問題とは，図1に示すようなN×Nの離散的環境となる2次元トーラス（上下左右がつながった面）内を逃げ回る移動目標物を複数のエージェント間で協調しながら移動物を追い込み捕獲する問題である．各移動物は，近傍2の範囲を認識することができ，エージェントに捕獲されないように環境内を逃げ回る．このため，複数のエージェント間で協調して，移動目標物を追い込み，捕獲することが必要になる．エージェントが移動したセルに移動目標物があれば，エージェントがその移動目標物を捕獲したとみなす．各エージェントはそれぞれを中心とした距離 REGION 以下の領域を近傍と呼ぶ．近傍内の距離は図2のように示される．近傍の領域内であれば，エージェント同士は通信を行なうことができ，さらにお互いの持っている情報を自由に参照できると仮定する．

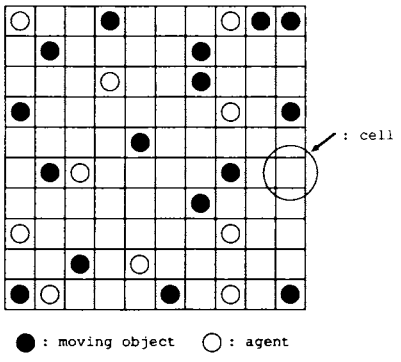


図1 N×Nの離散的環境

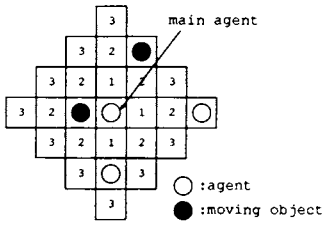


図2 エージェントの近傍と近傍の距離3

3 遺伝的アルゴリズムの移動物目標捕獲問題への応用

3.1 移動物目標物の行動決定

移動目標物は近傍2の状況を認識し，エージェントの位置情報だけを用いて行動を決め，エージェントから逃げるように移動する．中心となる移動目標物を原点として，X方向は右を正とし，Y方向は上を正とする（図3参照）．移動目標物の行動決定を式(1),(2)に示すように定式化する．中心エージェントから見た各エージェントの座標を x_i, y_i とする．

$$D_x = \sum_{i \in REGION} \frac{x_i}{|x_i|} \quad (1)$$

$$D_y = \sum_{i \in REGION} \frac{y_i}{|y_i|} \quad (2)$$

(i) $|D_x| > |D_y|$ の場合　$D_x > 0$ のとき左へ移動.

(ii) $|D_x| > |D_y|$ の場合　$D_x < 0$ のとき右へ移動.

(iii) $|D_x| < |D_y|$ の場合　$D_y > 0$ のとき下へ移動.

(iv) $|D_x| < |D_y|$ の場合　$D_y < 0$ のとき上へ移動.

(v) $|D_x| = |D_y| = 0$ の場合　方向と向きをランダムに決める.

(vi) $|D_x| = |D_y|$ の場合　方向をランダムに決定し D_x, D_y の値により向きを決定し移動する.

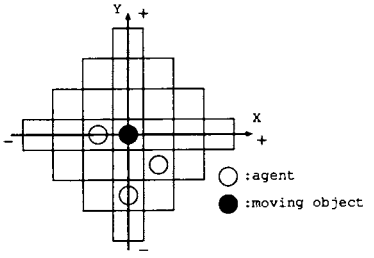


図3 移動物目標物の行動決定

3.2 エージェントの行動決定

3.1節で示したように，移動目標物はエージェントに捕獲されないように移動するので，複数のエージェント間で協調しながら目標目標物を追い込まなければ捕獲することは困難である．よって，エージェント同士が協調して捕獲する行動が必要となる．そこで，本稿では重みを用いて近傍の移動目標物の状況，他のエージェントの状況を判断し，行動を決定する手法[3]を考察する．

各エージェントは，その近傍内に他のエージェントおよび移動目標物にたいして重みを持っている．図4に重みの分布の例を示す．

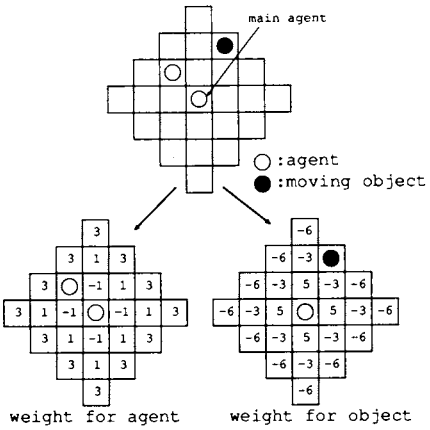


図4 エージェントの近傍内の重みの分布

ここで，中心となるエージェントの行動は，他のエージェント，移動目標物を考慮して，式(3)，(4)に示すように定式化する．

$$D_x = \alpha \cdot \sum_{i \in REGION} w_t(d^j) * e_x^j + (1-\alpha) \cdot \sum_{i \in REGION} w_a(d^i) * e_x^i \quad (3)$$

$$D_y = \alpha \cdot \sum_{i \in REGION} w_t(d^j) * e_y^j + (1-\alpha) \cdot \sum_{i \in REGION} w_a(d^i) * e_y^i \quad (4)$$

中心となるエージェントの近傍内の他のエージェント i および移動目標物 j へ向かう単位ベクトルを (e_x^i, e_y^y), (e_x^i, e_y^j) とし，i および j までの距離をそれぞれ d^i, d^j とする．さらに，移動物とエージェントに対して距離 d の関数として重みの組合せ $\{w_t(d), w_a(d) | d = 1, ..., n\}$ を導入する．パラメータ α はエージェントと移動目標物のどちらにどのくらいの比重を置くかを決定する値で[0,1]の値をとる．環境内の各エージェントがそれぞれ独自の重みを用いて，移動目標物を捕獲するために行動を行なう．

このとき，D_x を左右方向，D_y を上下方向に対応させ，次のように動く方向を決定する．

1) if $|D_x| > |D_y|$, $D_x > 0$ then 右方向へ移動
2) if $|D_x| > |D_y|$, $D_x < 0$ then 左方向へ移動
3) if $|D_x| < |D_y|$, $D_y < 0$ then 上方向へ移動
4) if $|D_x| < |D_y|$, $D_y > 0$ then 下方向へ移動

3.3 エージェントの種類

本稿では，エージェントとして，エージェントRANGE 4とエージェントRANGE (3 + 1) の2種類のエージェントを考える．エージェントRANGE4は，近傍4を持つエージェントで近傍内の他のエージェントと移動目標物が認識できるエージェントをいう．また，エージェントRANGE(3+1)は，同じ近傍を持っているが近傍3のみ他のエージェントと移動目標物の認識ができ，第4近傍については，物体の存在のみ認識できるエージェントとする．したがって，エージェントRANGE4の方が，エージェントRANGE(3+1)より入力情報が多いこととなる．

図5にエージェントの近傍の概念を示す．

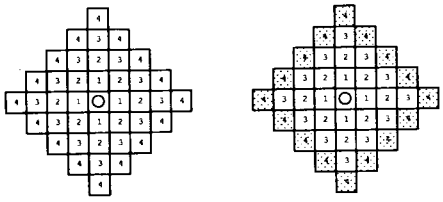


図5 エージェントの種類

3.4 染色体へのコーディング

エージェントは近傍内のエージェントと移動目標物に対して重みをもっている．本稿では，エージェントのもつ各重みの遺伝子のビット数を8とし，重みのとる範囲を $(-8 \leq w_a, w_t \leq 8)$ とする．近傍3を持つエージェントの重みの遺伝子列へのコーディングの例を図6(a)示す．図6(b)は，パラメータ α を遺伝子のなかに組み込んだ例である．

wa(1)	wt(1)	wa(2)	wt(2)	wa(3)	wt(3)
00101101	11100110	01010000	10111110	01111000	10010110

(a) chromosome

wa(1)	wt(1)	wa(2)	wt(2)	wa(3)	wt(3)	alpha
00101101	11100110	01010000	10111110	01111000	10010110	10010110

(b) chromosome with parameter alpha

図6 染色体へのコーディング

3.5 学習アルゴリズム

環境内において，より多くの移動目標物を捕獲するためのシステムを構築するために，各エージェントの持つ染色体 (重み) を次の手順にしたがって学習する．

[Step1]：初期設定
エージェントの数，移動目標物の数を決定する．各エージェントの近傍の大きさおよび使用するエージェントの種類を決める．突然変異確率を決定する．

[Step2]：移動目標物の移動
全ての移動目標物が移動を行う．

[Step3]：捕獲作業と選択
エージェントが移動し捕獲作業を行なう．エージェントが捕獲を行なった場合は，適応値として報酬を受けとる．また，捕獲を行なったエージェントの近傍にいるエージェントもその距離に応じて報酬を受けとる．

同時に，近傍内にいるエージェントから適応値が高い交叉の相手を探す．このとき，交叉相手は中心となるエージェントの適応値としきい値よりも高い適応値を持つエージェントが選ばれる．

[Step4]
Step2，Step3を500回数繰り返す．

[Step5]：交叉，突然変異
交叉相手を持つすべてのエージェントが交叉を行なう．また，突然変異確率に従い，突然変異が行なわれる．

[Step6]：終了条件
Step2〜Step5の1回の過程を1世代とし，500世代行なう．

4 数値実験

遺伝的アルゴリズムを用いて，移動物捕獲問題を行なった結果を報告する．実験では，30 × 30の離散トーラス環境を用いた．エージェントの数は10，移動目標物の数は20とする．エージェントの各パラメータは8ビットで構成され，各重みの範囲は $-8 \leq w_a, w_t \leq 8$ とする．突然変異確率は1%とする．

4.1 2種類のエージェントを用いたシステムの構築

本実験では，視覚情報量に違いのある2種類のエージェントを用いてマルチエージェントシステムの構築を行なった．実験に用いたエージェントの1つは，近傍4の状態を判別し，近傍内のエージェント，移動目標物の位置を認識できる．これをRANGE4とする．もう1つは近傍3の状態を判別し，距離4の領域はその存在のみ把握できる．これを，エージェントRANGE(3+1)

とする．パラメータ α は 0.8 とし， 500 世代繰り返し実験を行なった．実験結果は 50 回の平均をとった．実験結果を図 7 に示す．図 7 より，世代を経るごとに

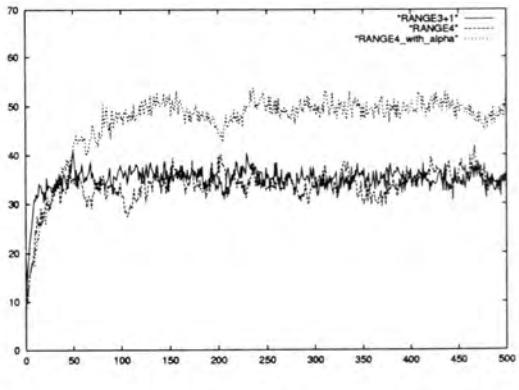


図 7: RANGE4 と RANGE(3+1) の捕獲数，パラメータ決定を行なった RANGE4 の捕獲数

RANGE4 と RANGE (3+1) の捕獲数にさほど差がないことが分かる．捕獲数の平均は，RANGE4=33.56, RANGE(3+1)=34.9 とわずかながら RANGE(3+1) のほうが多かった．これより，距離 4 の領域を全て認識できなくても，距離 3 の領域の正確な認識と距離 4 の領域のぼやけた認識だけでも同様の捕獲数が可能ということがいえる．このことから，より簡素なエージェントを用いて，同等のシステムを構築することが可能といえる．

4.2 パラメータ α の決定

この実験では，エージェントが持つ染色体の中にパラメータ α に対しての遺伝子も組み込み，捕獲作業を 500 世代繰り返した．パラメータ α の範囲は $0 \leq \alpha \leq 1$ である．実験では，RANGE 4 のエージェントを使用した．図 8 より，α の値が約 0.75 に収束することが確認できる．また，図 7 から，RANGE4 のエージェントと α の遺伝子をもつ RANGE4 のエージェントの捕獲数を比べると，後者の方が多いことが分かる．パラメータの値はエージェントの持つ近傍の範囲により $0.6 < \alpha < 0.8$ の間で変動が見られた．

5 まとめ

本研究では，遺伝的アルゴリズムを用いて移動目標物を捕獲するマルチエージェントシステムの構築を行なった．エージェントの行動は，近傍に存在する他のエージェントと移動目標物に対する重みの計算により決定される手法を用いた．エージェントには，RANGE4

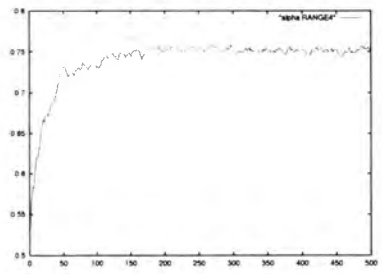


図 8 RANGE3 の世代ごとの α 変化

と RANGE(3+1) の 2 種のものを用い，視覚情報量の異なったエージェントによるシステム構築を行なった．実験結果から視覚情報量の異なりによる捕獲数の違いはそれほどなく，より簡素なエージェントにより同等のシステムを構築できた．

また，協調行動の指標を示す α を染色体の中に組み込み，より適当な α により，エージェントの行動を決定するシステムの構築を行なった．実験結果から，エージェント RANGE4 による捕獲作業では α が約 0．75 に収束した．この結果から，適当なパラメータの決定によりこのエージェントシステムが協調行動を行ない，捕獲数を向上させていることが確認できた．

今後の課題としては，視覚の情報量を段階的に変化させるエージェントを用いて同様なシステム構築すること．また，問題毎に適合するパラメータ α の決定などが挙げられる．

参考文献

[1] 北村 泰彦," マルチエージェントシステム", 日本ファジィ学会誌, 第 9 巻, 第 11 号, pp.302-311(1997).

[2] 宮島, 外山, 駒走," 移動目標物問題におけるいくつかの協調行動学習法", 電気学会誌 C, 第 123 巻, 第 3 号, pp.421-429,(2003).

[3] 堀内, 谷," 移動目標物捕獲問題における移動ロボット群の協調行動の学習法", 計測自動制御学会論文集, 第 30 巻, 第 11 号, pp.1395-1401(1994).

[4] 山村, 馬野, 瀬田, 岡田," 段階的な視界を持つマルチエージェントにおける強化学習について", 第 18 回ファジィシステムシンポジウム, pp.73-76(2002).

問い合わせ先：
〒 8995193 姶良郡隼人町真孝 1460-1
鹿児島高専 電子制御工学科
岸田 一也
TEL 0995-42-9084
FAX 0995-42-9084
E-mail kishida@kagoshima-ct.ac.jp

決定論的遺伝的アルゴリズムにおける多様化および集中化に関する検討

Diversification and Intensification of Deterministic Genetic Algorithms

永岡 右明 安田 恵一郎
Takaaki Nagaoka and Keiichiro Yasuda
東京都立大学
Tokyo Metropolitan University

Abstract: From a viewpoint of the number of search points, meta-heuristics can be divided into two different categories ; a single-point search method such as Tabu search and a multi-point search method such as Genetic Algorithms. Using the interaction between search points, the effective search of multi-point search is realized by generating an appropriate neighborhood that cannot be produced by single-point search. In this study, the analysis and some simulations are carried out in order to construct a new multi-point search method based on the above viewpoint. The search ability of the proposed multi-point search method is confirmed on some simulations using a knapsack problem that is a typical combinatorial optimization problem.

1 はじめに

スケジューリング問題に代表されるような組合せ最適化問題において，その問題の規模が大きくなると厳密な最適解を求めることはきわめて困難であることが，NP 困難性に代表されるように数学の複雑性の理論により示されている。しかし，このような問題に対しては，厳密な最適性の保証がなくとも，現実的な時間内に十分精度の高い解が求まれば満足のいく場合が多く，近似解法や発見的手法はこのような目的で用いられている。このような背景から生まれたメタヒューリスティクスは最適化手法における新しいパラダイムである。

メタヒューリスティクスと呼ばれる最適化手法の多くは，物理現象や生物の進化の過程，あるいは生物の集団・社会行動などにヒントを得て提案されている。

さらに，メタヒューリスティクスのアルゴリズムの基本的枠組みは，

(1) 過去の探索の履歴を利用して新たな解を生成する
(2) 生成した解を評価し，その情報を解の探索にフィードバックする

という操作の反復により構成されている。

メタヒューリスティクスの性能向上には上述のアルゴリズムの基本的枠組みにおいて，集中化（局所的探索）と多様化（大域的探索）をいかにバランスよく実現するかが重要である。

また，メタヒューリスティクスの多くは，「良い解どうしは似通った構造をもっている」という概念に基づいて設計されている。この概念は，POP（Proximate Optimality Principle）と呼ばれている。集中化（局所的探索）の考え方は，この POP の概念に基づいている。

メタヒューリスティクスは大きく分けて多点探索型のものと単点探索型のものとがあり，多点探索の代表的なものに遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm:GA) や PSO(Partical Swarm Optimization) などがある。また，単点探索の手法にはタブサーチ (Tabu Search:TS)，シミュレーティッドアニーリング (Simulated Annealing:SA) などが挙げられる。多点探索型のメタヒューリスティクスは単点による探索を並列的に行っているわけではなく，解空間に存在する複数の探索点が相互に影響しあい，単点では成し得ない多様な近傍を生成することにより，効果的な探索を実現している。これに対し，Tabu Search に代表されるような単点の探索手法の有効性が数値実験的に示されてきているように，単点による探索でありながら非常に強力な探索能力を持った手法も存在している。

本研究では，GA に代表されるような多点探索型のメタヒューリスティクスの相互作用が探索にもたらす効果についてシミュレーションを行い，相互作用の探索にもたらす効果に関する検討を行った。その結果と以上の観点に基づき，筆者が提案している決定論的遺伝的アルゴリズムに，より効果的な探索性能を実現する上で求められる，有用な相互作用に関する検討を行った。そしてその相互作用によりもたらされる探索性能を比較することにより，多点探索型のメタヒューリスティクスにおける有用な相互作用に関する検討を行った。

2 多点探索型メタヒューリスティクスの特徴

メタヒューリスティクスを分類する上で，最適化手法としてのアルゴリズムの本質的振る舞いの相違に重点をおけば，以下の 5 つの項目

(1) 解表現：どのような情報をどのような自由度を以て表現するか
(2) 近傍の定義：どのような機構に基づいて近傍を生成するか
(3) 解の評価方法：生成した解の良さをどのように評価するか
(4) 移動戦略：近傍内の解をどのような手順で調べ，どの解へ移動するか
(5) 終了基準：どのような基準に基づき探索を終了するか

が，妥当な分類の指針の一つとなり得る。

この5つの中で特にアルゴリズムの振る舞いを決定づける重要な項目として「近傍の定義」と「移動戦略」をあげることができる。この2つを基準にすると，各種のメタヒューリスティクスの本質的相違を明らかにすることができる。この「近傍の定義」，「移動戦略」という観点より，代表的なメタヒューリスティクスである遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithms:GA），タブサーチ（Tabu Search:TS），シミュレーティッドアニーリング（Simulated Annealing:SA），PSO(Partical Swarm Optimization) を分類したのが表1である。

Table. 1 メタヒューリスティクスの分類

最適化手法	近傍の定義	移動戦略
GA	探索点と探索点集合の近傍	確率的
TS	探索点と Tabu-List による近傍	確定的
SA	探索点の近傍	確率的
PSO	探索点と Pbest,Gbest による近傍	確率的

この「近傍の定義」「移動戦略」の観点から分類することによって，それぞれのメタヒューリスティクスの最適化手法としての本質的な相違が明らかになる。

2.1 GA のオペレータの最適化における意義

本研究において代表的な多点探索型のメタヒューリスティクスとして検討を行っている GA のメタヒューリスティクスの一手法としての特徴は以下のようなものが考えられる。

(1) 解表現における制約と互換性

解表現において全ての個体が同様の遺伝子構造をもつという制約がある。解表現の自由度は低下するが，解の部分列における互換性が生まれるため，集団の相互作用により生成される有用な近傍の生成を可能としている。

(2) 集団の相互作用による有用な近傍生成

メタヒューリスティクスの多くは，探索点から独立に生成し得る近傍（突然変異に相当）のみを探索の対象としているが，先に述べた解の互換性を利用し，有用な解の部分列を相互に活用する「交叉」が可能である。

(3) 集団の多様化維持のための解の評価

GA においては集団の多様性が失われることが多く，これが探索性能の低下につながっている。これを防ぐために多様性を定量的に評価，目的関数値に多様性評価を織り込んだ解の評価が通常行われる。

この特徴として挙げた (1),(2) から来る遺伝的アルゴリズムにおける交叉は，良い解の部分解同士を組み合わせることによりさらに良い解を生成することを目指している。つまり，この操作は「良い解同士は似通った構造をもっている」という POP の概念に基づいたオペレータであると言える。この交叉という操作は解空間に存在している探索点同士が影響し合い，新たな近傍を生成している。

この多点間の相互作用が多点探索型のメタヒューリスティクスの本質的な特徴であると位置付け，代表的な多点探索型のメタヒューリスティクスである遺伝的アルゴリズム (GA) の相互作用の有効性に関するシミュレーションを行い，検証を行った。

2.2 相互作用の有効性に関する検討

GA に代表される多点探索型のメタヒューリスティクスにおける相互作用の有効性を検証するシミュレーションを行った。50bit のナップサック問題に対して，GA における多点間の相互作用に相当する交叉の操作をなくしたものと，相互作用である交叉の操作があるものとを同条件で適用し，1000 回の反復を行い同じ計算量で求めることができた評価値の平均値によって比較を行った。

Table. 2 GA における相互作用の検討

相互作用あり		
計算回数	イテレーション	平均評価値
100200	333	472.072

相互作用なし		
計算回数	イテレーション	平均評価値
100200	333	383.639

この結果より，GA において多点間の相互作用が探索における非常に重要な役割を果たしていることが確認できる。このことからも多点間の相互作用が多点探索型メタヒューリスティクスの本質であるといえる。

3 決定論的 GA : DGA

以上の検討より，多点探索の効果的な探索が多点間の相互作用により実現されていることが分かった。本研究において提案する決定論的遺伝的アルゴリズム（Deterministic Genetic Algorithm:DGA）は，GA の確率的なオペレータを排除し，決定論的なオペレータに置き換えたものである。これにより，GA のオペレータの利点である多点間の相互作用である交叉を利用し，決定論的なオペレータによりもたらされる高い集中化の能力の実現をもつアルゴリズムの構築を目指した。

多点により決定論的な探索を行う場合，基本的に常に改善方向に解を生成するため，交叉の影響により良い個体の持つ部分情報を全ての個体が共有し，全く同じ構造をもつ個体が生成され，集団を支配してしまう初期収束が発生する。このため通常の GA と比較して初期収束が起こりやすくなる。この初期収束の問題を回避するために，Tabu Search（TS）の確定的な近傍操作と Tabu-List の概念を導入した。これにより強力な集中化の能力を持たせることができる。

さらに，GA における多様化の能力を強化する目的で用いられるシェアリングを取り入れることにより，確定的な近傍操作を取り入れたことによって低下する決定論的 GA の多様化の能力を補うことができる。

3.1 Tabu List の概念

TS とはメタヒューリスティック手法の中でも高速かつ高い探索能力を持つといわれているアルゴリズムである。Tabu List と呼ばれる集合 T を用意し，これに含まれる解への移動を禁止する。これにより，探索がいくつかの解を経由して元に戻ること（サイクリング）を回避している。

つまり，この提案手法は，別の見方をすれば単点探索型でありながら非常に強力な探索能力を持つ TS の多点化を行い，問題構造に即した形で適当な多点間の相互作用を持たせることにより，単点では成し得ないような近傍の生成を実現を目指したアルゴリズムであると位置付けることもできる。

この概念を決定論的 GA における初期収束の発生などを回避するために進化履歴として取り入れた。本研究における提案手法である GA の確率的オペレータを排除した決定論的 GA のアルゴリズムを以下に示す。

3.2 決定論的 GA のアルゴリズム

step 1：**（初期集団）** 初期解集団 x を生成する。それぞれの個体の進化履歴を初期化する。

step 2：**（突然変異）** それぞれの探索点において，突然変異（1bit 反転）によって求められる近傍をすべて求める。

step 3：**（交叉）** 交叉（1 点交叉）によって求められる近傍をすべて求める。

step 4：**（選択）step 2**，**step 3** で求めたそれぞれの個体の近傍の候補中から，進化履歴の中に含まれておらず，また同一世代内に同じ個体が存在しないような，最も評価値の高い個体をそれぞれ選択し，進化履歴を更新する。

step 5： **step 2** から **step 4** までの繰り返しを 1 世代として繰り返す。n 世代繰り返したらそれぞれの個体で最も評価値の高かった個体を解として表示し，終了する。

3.3 進化履歴

上記の決定論的 GA のアルゴリズムにおける **step 4** では TS における Tabu-List に相当するものを更新している。選択した近傍が突然変異によって求められる近傍である場合，反転させた bit の位置情報をリストに加える。交叉によって求められる近傍の場合，交叉を行ったこと自体を記録し，他の履歴情報は初期化する。履歴に交叉を行ったという情報が存在している場合は交叉の発生そのものを禁止する。

DGA においては個体数が増えた場合，交叉によって求められる近傍をすべて探索するため組合わせ的に近傍が増加し，その計算回数が大幅に増加する。

このように交叉の発生回数をある程度押さえることによって，交叉により生成される膨大な近傍をある程度制限して計算回数を低減している。

3.4 個体の重複防止

確定的な近傍操作を導入することにより，高い集中化の能力を持たせることができることはすでに述べた。しかしそれは GA が持つ確率的な操作によってもたらされる多様化の能力が失われることにもつながっている。そこで，多様化の能力を補うために同一世代内の個体が重複することを防止する機能を導入する。これはそれぞれの個体が新しく生成される際に，すでに生成された同世代内の個体が同じ解を持たないようにする機能である。同一世代内に同じ解を持つ個体が存在しなくなるため，交叉による探索効率を向上させる効果が期待できる。

4 決定論的遺伝的アルゴリズムにおける相互作用

本研究で提案する決定論的遺伝的アルゴリズムも GA における相互作用の検証と同様に相互作用のあるものとないものとを比較することで，相互作用の有効性の検証を行った。この検証を行うことで決定論の枠組みの中で，多点探索型のメタヒューリスティクスにおいても多点間の相互作用が探索において有効に働いていることが検証できる。

また，この決定論的遺伝的アルゴリズムにおいて相互作用を無くした場合，その探索における振る舞いはタブサーチを並列的に実行していることとほぼ同様の振る舞いとなる。

4.1 シミュレーション結果

Table. 3 DGA における相互作用の検討

相互作用あり		
計算回数	イテレーション	平均評価値
100503.083	57.032	474.63

相互作用なし		
計算回数	イテレーション	平均評価値
100041.709	187	461.899

この結果より分かるように，決定論の枠組みの中でも，多点探索に適切な相互作用を持たせることにより，効果的な探索の実現ができうることが分かる。

この結果を踏まえ，決定論の枠組みの中で多点探索型の手法により効果的な探索を実現する上で，どのような相互作用を加えることが望ましいのかの検証を行う。

4.2 gbest・pbest の概念の導入

さらに有効な相互作用の実現のため，一例として非常に高い探索性能を持つことが数値実験的にも証明されている PSO(Partical Swarm Optimization) の近傍操作にヒントを得，集団における最良解 (gbest) および各個体の持つ最良解 (pbest) の情報を集団として共有する。

PSO は鳥の群れが餌を探す行動研究によって導かれた「情報を群れ全体で共有している」という仮定に基づいて提案されたメタヒューリスティクスであり，各探索点がこれまでの探索で発見した最良の場所 (pbest) とその関数値を記憶している。それと同時に今までに探索した中での最良の場所 (gbest) およびその関数値という情報を共有しており，各探索点はこれらの情報を用いて解を更新している。この探索によって得た集団における最良解の情報を共有し，近傍の生成に利用するという概念を提案手法にも利用する。

さらに，多くの一般的な組み合わせ最適化問題においては，POP の概念が成立していることが知られている。この POP が成立する問題，つまり「良い解同士は似通った構造を持っている」という概念が成立する問題に対し，GA における解表現の制約，解表現において全ての個体が同様の遺伝子構造をもつという制約を利用すれば，pbest および gbest の部分解を組み合わせることにより，さらに良い解を生成しうることが期待できる。

具体的な方法としては常に最良解を保持しつづけるような探索点を一つ設け，その探索点情報と各探索点のイテレーション毎の情報とを組み合わせることにより，更なる解の改善の可能性を探索する。これにより集団における最良解の改善が行われた場合にはその情報を集団にフィードバックし，その情報を集団で共有した。

5 数値実験による検証

改良を施したアルゴリズムと改良前のアルゴリズムの探索性能を，数値実験により検証した。

5.1 シミュレーション内容

提案手法と各改良を施したものをそれぞれ 50bit および 100bit,200bit のナップサック問題に適用して探索性能の検証を行った。それぞれの問題において，目的関数を評価した回数を計算回数とし，それぞれの手法が同じ計算回数で得ることができた評価値によって比較を行った。ここでの計算回数とは，目的関数を評価した回数のことである。

それぞれの問題における結果は表 4 の通りになる。

5.2 シミュレーション結果

このシミュレーション結果から，問題が大規模化するに従って従来の手法と比較して，より高い探索性能が実現できている事が分かる。このことから，探索点がそれぞれの探索によって得た情報をお互いに共有するような形での相互作用を与えることにより，より効果的な探索を実現できるということができる。

6 おわりに

本研究をまとめると，以下のようなことが言える。

(1) 多点探索型のメタヒューリスティクスにおける効果的な探索が，多点間の相互作用によってもたらされていることを指摘し，その多点間の相互作用に関する重要性・有効性に関する検証を行った。

(2) 決定論的 GA を提案し，また PSO にヒントを得る形で新しい相互作用に関しての提案を行い，その探索性能をナップサック問題に適用することでその有効性の検証を行った。

今後の課題としては，多点探索型のメタヒューリスティクスの探索性能の向上を図る上で，より効果的な相互作用の実現を目指した改良を行うことが挙げられる。さらに，より複雑で大規模な組み合わせ最適化問題に対して手法を適用し，そのアルゴリズムの振る舞いや，探索性能に関する検証を行うことなどが挙げられる。

Table. 4 探索性能の検証

50bit 問題		
手法	平均評価値	誤差
従来手法	474.74	1.301455 %
改良型	475.081	1.230561 %

100bit 問題		
手法	平均評価値	誤差
従来手法	926.258	1.98328 %
改良型	933.407	1.226772 %

200bit 問題		
手法	平均評価値	誤差
従来手法	1699.608	3.704929 %
改良型	1709.061	3.169348 %

参考文献

[1] 安田：進化論的計算手法とメタヒューリスティクス，電気学会論文誌 C 電子情報システム部門誌 Vol.122-C,NO.3 pp.320-323 , 2002

[2] 伊庭：遺伝的アルゴリズムの基礎—GA の謎を解く—，オーム社 (1994)

[3] 柳浦, 茨木：組合せ最適化—メタ戦略を中心として—，朝倉書店 (2001)

[4] 室田：離散構造とアルゴリズムIV，近代科学社 (1995)

[5] James Kennedy and Russell C. Eberhart : "Swarm Interlligence", Morgan Kaufmann Publishers (2001)

[6] K. Yasuda :"Evolutionary Computation and Metaheuristics", T.IEE Japan, Vol.122-C, No.3, pp.320-323 (2002)

連絡先:

〒 192-0397
東京都八王子市南大沢 1-1
東京都立大学大学院　工学研究科　電気工学専攻
永岡　右明
電話:　0426-77-1111
E-Mail:　legacy@ecomp.metro-u.ac.jp

分散型遺伝的アルゴリズムにおける サブ集団の個体数と構造について

About a sub group's number of individuals and structure in a Distributed Genetic Algorithm

市川　耕司 Kouji Ichikawa
江本　全志 Masashi Emoto
山内　ゆかり Yukari Yamauchi
向殿　政男 Masao Mukaidono

明治大学
Meiji University

Abstract

In Distributed Genetic Algorithm (DGA), the whole group of a gene is divided into subgroups and processed in parallel. This research aims at improving the performance and accuracy of DGA. The optimum numbers of subgroups, individuals and the structural characters are discussed.

２００３年６月３０日

1 はじめに

生物の進化を模倣し、遺伝的操作により解を探索するアルゴリズムを、遺伝的アルゴリズム（Genestic Algorithm：以下ＧＡ）という。GA は適合度に基づき、選択・交叉・突然変異といった遺伝的操作を繰り返し、最適解を求める。また、GA における遺伝子の集団のことを「母集団」という。さらに、遺伝子の集団を分割し、複数並列に動作させるものを分散遺伝的アルゴリズム(Distributed GA：以下 DGA)という。本研究では DGA の性能・精度を上げることを目標にしている。ここでは、DGA の解探索能力の性質について述べる。

2 DGA について

DGA とは、SGA(SimpleGA：通常の GA を指す)の母集団を複数のサブ集団に分割し、それぞれが独立に遺伝的探索をしつつ、ある一定の周期でサブ集団間で移住（個体の交換・コピー）を行うものである。

有名な DGA モデルとして、cellular モデルと Island モデル（図 2-1）があるが、本研究が取り上げるのは後者の方で、SGA より良い成果を残せるとされている[1]。また Island モデルには次に示す２つの移住法がある。

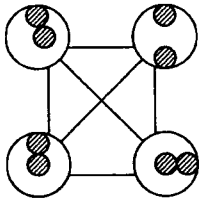


図 2-1　Island モデル概念図

2.1 移入法

移入法とは、あるサブ集団から別のサブ集団へと個体をコピーする方法である。

移入法のメリットとして、自由な構造を組めるという点がある。デメリットとして、それなりに良好な個体が集団全体に蔓延し、局所解に陥ってしまう可能性があるという点がある。

2.2 移出法

移出法とは、あるサブ集団から別のサブ集団へと個体を移動する方法である。

移出法のメリットは、同じ個体がＧＡ全体で蔓延しない点であり、局所解に陥りにくくなる。デメリットは、移住してくる個体数と移住する個体数を合わせなければならないので、移住の際にＧＡ全体で数が合うように構造を決めなければならない。

移出法の研究成果として、リング状のものが有効な構造として提案されている。

3 対象関数について

GA の対象は組み合わせ最適化問題であるが、その際、変数間の依存関係によって問題の難易度が変わる。そこで検証では依存関係の強弱を観点に、以下に示す４種類の一般的なベンチマーク問題を使用した。依存関係の強い問題は基本的に最適解を見つけるのに困難である。表 3-1 に関数の比較を示した。

●Rastrigin 関数（F1 とする）

$$F(x)=10n+\sum_{i=1}^{n}(x_i^2-10\cos(2\pi x_i)):n=10$$

●Schwefel 関数（F２とする）

$$F(x)=\sum_{i=1}^{n}(-x_i\sin(\sqrt{x_i})):n=10$$

●Griewank 関数（F３とする）

$$F(x)=1+\sum_{i=1}^{n}\frac{x_i^2}{4000}-\prod_{i=1}^{n}(\cos(\frac{x_i}{\sqrt{i}}))$$

●Ridge 関数（F4 とする）

$$F(x)=\sum_{i=1}^{n}(\sum_{j=1}^{i}x_i)^2$$

$F1:-5.12\le x_i\le 5.12$

$F2,F3,F4:-512\le x_i\le 512$

表 3-1　対象関数比較

関数名	依存関係	最適解
F1	なし	求めやすい
F2	弱い	やや求めにくい
F3	中程度	やや求めにくい
F4	強い	求めにくい

4 サブ集団サイズの検証

4.1 目的

DGA の最適な分割数を調べるために検証を行った。また最適な分割数は、対象関数・１遺伝子の長さに影響を受けるのではないかと思い、4.2 に示すパターンを用意した。

4.2 検証のパラメータ

１遺伝子の長さは、（１変数の bit 長）×（変数の個数）で表される。ここでは１遺伝子の長さを調整するために、変数の個数を調整した。

表 4-1　検証の静的パラメータ

世代数	５００
突然変異率	１／L（L は１遺伝子の BIT 長）
移住する世代	５世代ごと
試行数	２２回　※
構造	完全グラフ
選択	エリート保存方式
交叉	１点交叉　※
突然変異	１箇所の BIT を反転させる
移住	移入法

※　結果は２２試行のうち、中間２０試行の平均を取る。

※　交叉は１点交叉が最もよいとされている[2]。また交叉率は 1.0 にした[3]。

※　構造は完全グラフ（後述）

表 4-2　検証時の動的パラメータ

パラメータ	値	パターン数
対象関数	F1、F2、F3、F4	4
母集団サイズ	60,100,200,400 800,1200,2000	7
分割数	1(SGA),3,4,5,6,8,10,12,15,20	１０
設計変数の個数	6 個(60bit)、8 個(80bit) 10 個(100bit)	3

4.3 検証結果

以下に検証結果を示す。

結果は、それぞれ代表的なものをグラフにした。

F1～F3 については似たような結果であったので、省略したものがある。また全て最適解が見つかっているので、最適解発見数は載せていない。

F4 については、各 bit 数とも同じような結果を示したので、100bit のみ表示した。

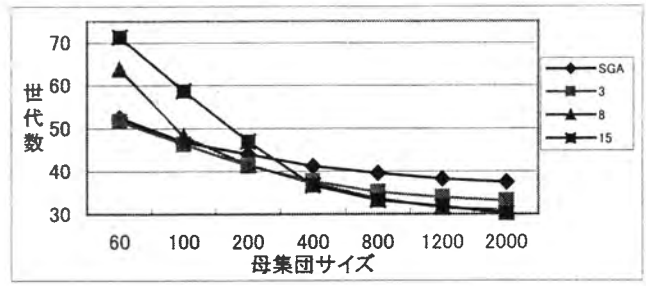


図 4-1 最適解発見時の平均世代数(100bit F1)

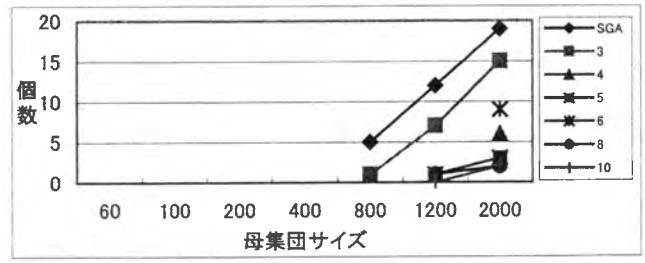


図 4-2　最適解発見数(100bit F4 20 試行中)

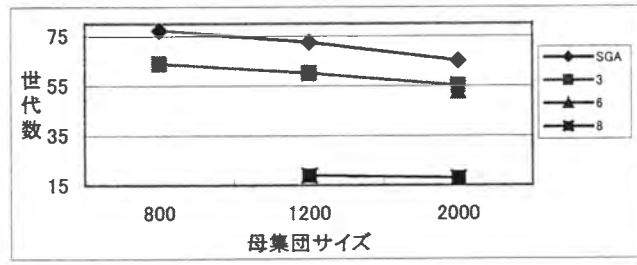


図 4-3 最適解発見時の平均世代数(100bit F4)

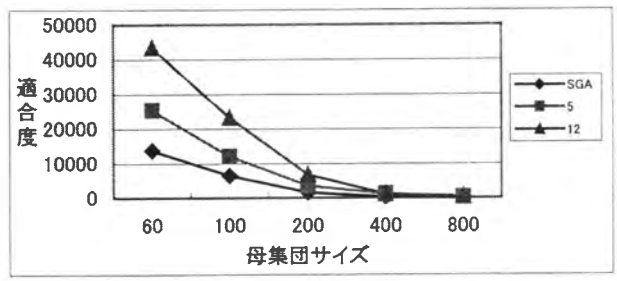


図 4-4 最適解未発見時の平均適合度(100bit F4)

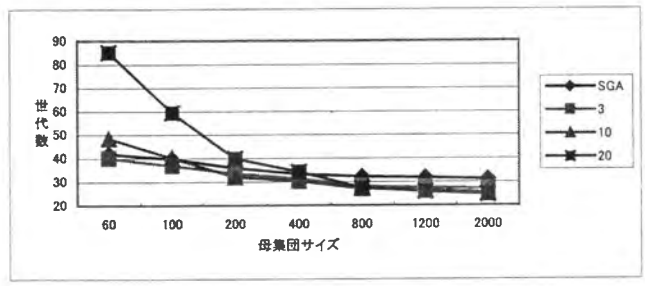


図 4-5 最適解発見時の平均世代数(80bit F2)

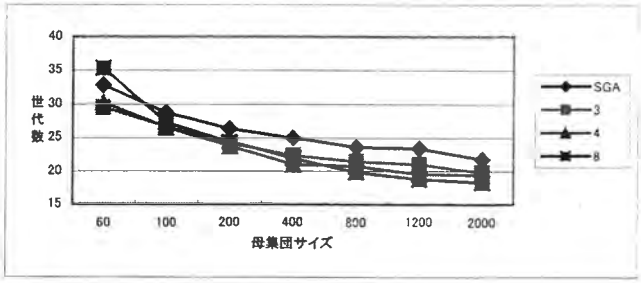


図 4-6 最適解発見時の平均世代数(60bit F3)

4.4 考察

1．F1～F3

ほぼ SGA よりも DGA の方が良い結果を示した。また母集団サイズが大きい時には、分割数を増やした方が良いことが分かる。

2．F4 について

DGA よりも SGA の方がよい結果を示した。しかし、最適解発見時の世代数は DGA の方がよい結果であった。F4 が最適解を発見できた時とできない時で性能が SGA と逆転することは次のような理由がある。

今回のシステムでは、遺伝的操作として、「移入法」・「移住個体の選び方を最良選択」・「構造を完全グラフ」とした。これにより良好な個体が GA 全体に広まりやすい状態になり、最適解でない優れた個体が DGA 全体に広まり、局所解に陥ったと考えられる。以上より最適解未発見時には SGA よりも性能が落ちる。

最適解を発見した場合は、最適解に向かって優良な局所解が次々に求まり、その個体が蔓延することにより SGA よりも早く最適解が見つかったと考えられる。

3．遺伝子長

100BIT・80BIT・60BIT のいずれにおいてもあまり差はないことから、最適な分割数・サブ集団サイズは遺伝子の長さによらないということが分かる。ただし、遺伝子の長さが問題の難易度に関係しているため、遺伝子が短いほど早く最適解が求まるようになった。

4．母集団サイズと分割数

全ての母集団サイズに最適で共通な分割数はなかったが、母集団サイズが小さいときは分割数を増加させるべきではない。また DGA の性能の良し悪しは分割数ではなく、サブ集団サイズによることが分かり、サブ集団サイズは平均すると約２０個体が最も良い結果になりうる。
結論として同じ母集団サイズであれば、サブ集団サイズを２０以上に保てる限りは、分割数を増加させた方がよいことが分かった。

5 構造に関する検証

5.1 目的

ＤＧＡにおけるサブ集団の構造はどのようなものが適切なのかを検証した。ＤＧＡにおける構造とは、各サブ集団間での移住があるかないかである。ここでは、考えられる構造の内、下に示すように代表的な構造を対象とした。

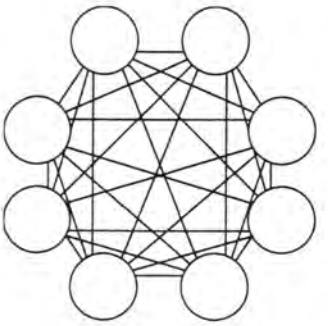


図 5-1 CompleteGraph 型

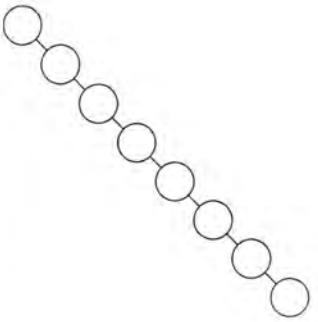


図 5-2 Line 型

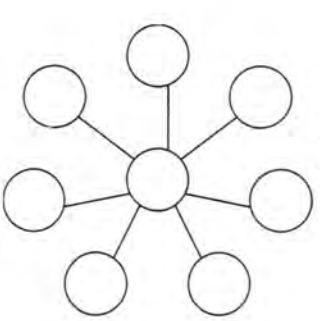


図 5-3 star 型

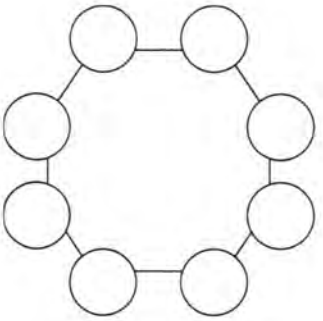


図 5-4 ring 型

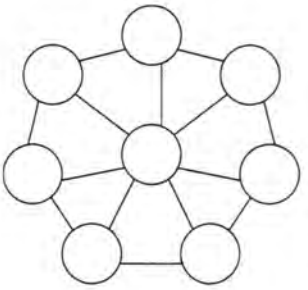


図 5-5 star 型＋ring 型

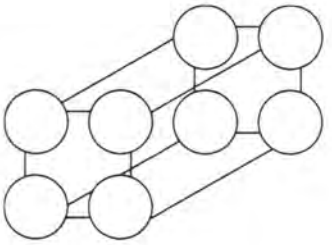


図 5-6Cube 型

5.2 検証のパラメータ

基本的には先の検証と同じパラメータである。以下に異なるものを示す。

表 5-1　検証時のパラメータ

試行数	１００回
遺伝子長	１００bit に固定
母集団サイズ	100,160,200,300,320,400,500,600 640,700,800,900,1000,1280
分割数	サブ集団サイズを２０に固定

5.3 検証結果

以下に検証結果を示す。

ここではＦ１・Ｆ２・Ｆ３についてはほぼ同様の結果であったのでＦ１の結果のみを表示し、どの母集団サイズでも最適解が求まったので、その結果については省略する。

また SGA との比較は移住方法の取り方によって比較差が変わるので割愛する。

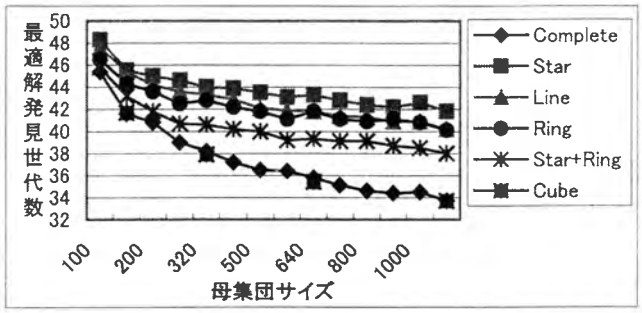


図 5-7　Ｆ１最適解発見時の世代数の比較

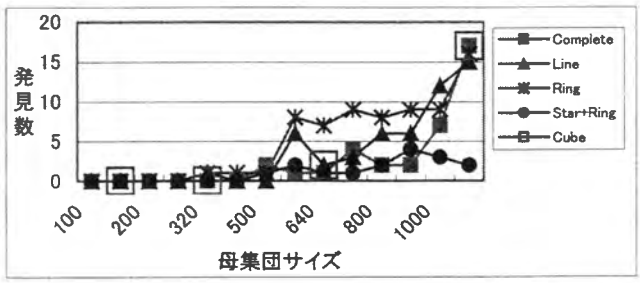


図 5-8　Ｆ４最適解発見数（１００試行中）

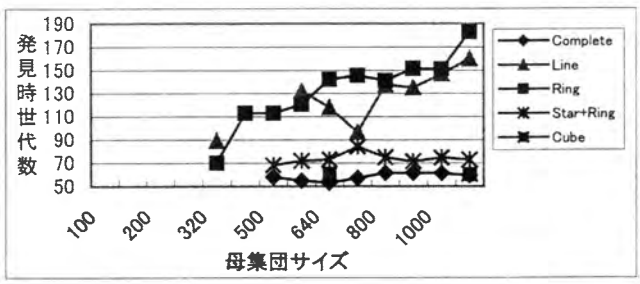


図 5-9　Ｆ４最適解発見時の世代数

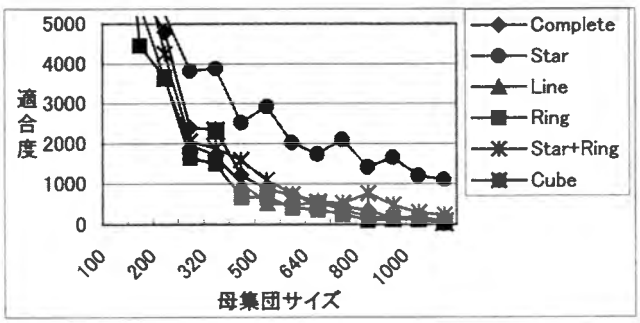


図 5-10　Ｆ４最適解未発見時の適合度

5.4 考察

1．F1～F3

Complete グラフや Cube などの各サブ集団間で移住が頻繁に行われるような構造では結果が良かった。これは大域的最適解を探索することが簡単な場合に、全てのサブ集団に良好な個体を蔓延させることで適切な探索をしたからである。

2．F4

Line や Ring のように個体が全てのサブ集団に行き渡るまで時間がかかるものの方がよい結果を示した。これは Ring 構造の場合、他の構造と異なり一番遠いサブ集団へ良好な個体を伝えるためには何世代もの時間を必要とする。そのため、各サブ集団が独自に進化を進め、多様性を保持できたと考えられる。

3．まとめ

難易度が高い問題の場合には、情報の交換が少ない構造を選んだほうがよく、難易度が低い問題の場合には、情報の交換が多い構造を選んだほうがよいことが分かる。

6 終わりに

今回の検証では移入法しか用いておらず、偏った結果になっている可能性があるので、他の移住方法でも検証する必要がある。

他にもＤＧＡにとって調べなければならないパラメータが数多く存在するので、検証を続け改良をしていきたい。

参考文献

[1] 三木光範，廣安知之，畠中一幸，吉田純一：並列分散遺伝的アルゴリズムの有効性、日本計算工業会論文集 2000 年号 (2000)

[2] 分散遺伝的アルゴリズムの性能に及ぼす交叉法とコーディング法の影響：吉田純一、http://mikilab.doshisha.ac.jp/dia/monthly/monthly99/

[3] 大向一輝：分散遺伝的アルゴリズムにおける最適な交叉率および突然変異率、http://mikilab.doshisha.ac.jp/dia/monthly/monthly99/

連絡先

〒214-8571
神奈川県川崎市多摩区東三田 1－1－1　6404 室
明治大学理工学部情報科学科
市川　耕司
電話（FAX）：044－934－7442
Email：kojikoji@cs.meiji.ac.jp

並列遺伝的アルゴリズムのファジィ適応型探索手法
Fuzzy Adaptive Search Method for Parallel Genetic Algorithm

○前田 陽一郎 Yoichiro MAEDA
坪内 透 Toru Tsubouchi
福井大学 Fukui University

Abstract — Generally, it is not necessarily optimal search performance in genetic algorithms because of fixed genetic parameters (crossover rate, mutation rate and so on). Therefore, we proposed Fuzzy Adaptive Search method for Parallel Genetic Algorithm (FASPGA) combined Fuzzy Adaptive Search method for Genetic Algorithm (FASGA) which is able to tune the genetic parameters according to the search stage by fuzzy rule and Parallel Genetic Algorithm (PGA) which obtain high-quality in the evolution. In this paper, we reported simulation results of learning Rastrigin function as comparing GA, PGA and FASPGA.

1 緒言

一般的にGAは通常一定の遺伝的パラメータ（突然変異率、交叉率など）で探索を行うため、特に探索初期、収束期において探索性能が必ずしも最適であるとは言えない。このため、探索性能を向上させるために遺伝的パラメータをチューニングすることが有効であることが知られており、種々の方法が提案されている。本研究室ではすでにこの問題の改善手法としてファジィ適応型探索遺伝的アルゴリズム (FASGA:Fuzzy Adaptive Search method for Genetic Algorithm) を提案している [1]。この手法では、遺伝的パラメータを最大適応度および平均適応度を基に探索ステージに伴いチューニングするファジィルールを記述し、それにより探索ステージに適した効率的な探索を実現できる。

一方、進化における解の高質化を実現する手法として、GAの並列化手法が提案されている [2]。並列遺伝的アルゴリズム（PGA:Parallel Genetic Algorithm）はいくつか提案されているが、主にCoarse-grained GA(Island GA)[3],[4] と、Fine-grained GA(Cellular GA)[5] の二つのモデルに大別される。本研究ではこのうちIslandモデルを用いているが、PGAではGAに比べて設定すべきパラメータ数が多いことや集団間の移住の際に、移住操作の必要性に関係なく個体の移住を行うため、並列処理による効果が得られるとは限らないという問題がある。

そこで、本研究ではFASGAとPGAを組み合わせることにより、進化の高速化と解の高質化に基づく効率的な探索を行うファジィ適応型探索並列遺伝的アルゴリズム (FASPGA:Fuzzy Adaptive Search method for Parallel Genetic Algorithm) を提案する。FASPGAは各集団における交叉率、突然変異率といった遺伝的パラメータに加え、移住率も探索ステージに応じてファジィルールによりチューニングし、かつ移住の決定を非同期的に行うアルゴリズムである。このため、各島の交叉率、突然変異率などの遺伝的パラメータや移住操作のとき用いる移住率を動的に変化させ、必要なときのみ移住を行わせることでより効率的な探索が可能となる。また、このアルゴリズムを用いたRastrigin関数の最適化シミュレーションを行い、従来のGAやPGAと比較したのでその結果についても報告する。

2 FASPGA

2.1 FASPGAの提案

処理の手順としてまずはじめに、集団全体を n 個のサブ集団に分割し、各サブ集団ごとに初期化により個体をランダムに発生させ、それぞれの個体の適応度 f を計算する。そこで、それぞれの集団 $(i = 1, 2, \ldots, n)$ における最大適応度 f_{m_i} と平均適応度 f_{a_i} が求められるのでファジィ推論に必要な各集団における最大適応度 f_{m_i} および最大適応度と平均適応度の差 $(f_{m_i} - f_{a_i})$ を計算し、これにより進化の度合い（探索ステージ）を推定し、そのときの状態に応じた交叉率 r_{c_i} と突然変異率 r_{m_i} をファジィルールにより推論する。

また、各集団の個体は選択を実行した後、ファジィ推論によりその集団が移住すべき度合い（ここでは集団移住度 E_i と呼ぶ）を求めて移住を実行するかどうかを決める。この推論には交叉率、突然変異率の決定と同じく、f_{m_i} および $(f_{m_i} - f_{a_i})$ を用いて進化の度合いを推定し、探索ステージに応じた集団移住度 E_i を決定する。この値があるしきい値を越えた場合、進化が進んでいないと判断され、より優れた集団の個体とシャッフルする目的で移住が実行される。ここで言う移住とは、進化の進んでいる集団から、進化の進んでいない集団へと移住することである。そのため、移住が決定した集団は進化の進んでいる集団から個体の移住をしてもらう集団（移住先集団）を決めることになる

もし移住の実行が決定されないときは、そのまま交叉や突然変異の実行を行うが、もし移住の実行が決定したときは多様性を高めるため、最も特性の異なる集団（進化の進んでいる集団）である移住相手（移住元集団）の選択をする。その後、再び集団移住度 E_i を用いて移住率 r_{e_i} を計算し、この値によって集団内の移住する個体の個数を決め、適応度が高い個体を選択する確率が高くなるルーレット選択で移住する個体を決定する。このように移住をするかどうかについてはまず、進化が比較的進んでいない集団を前述のファジィ推論により決定し、この集団に対し最も特性の異なる進化が進んだ集団を移住元とし、移住元に当たる移住が決定した進化の進んでいない集団に適応度の高い個体が移住してくることになる。この操作は初期収束などの原因で進化が進まずに停滞してしまった集団に新たな優秀個体を注入することによって進化を促進させることを狙ったものである。

個体が移住した後、移住する先の集団では、はじめに決め

られた個体数に合わせるため、適応度が低い個体を選択する確率が高くなるルーレット選択を行う。その後ファジィルールによる交叉率 r_{c_i} や突然変異率 r_{m_i} を用いて交叉や突然変異を実行する。そして、もし終了条件を満たすならそこで探索を終了し、満たさないなら再び適応度の計算をし、同じ処理を繰り返す。本研究で提案した FASPGA の処理フローを図 1 に示す。点線の範囲内ではファジィルールによる集団移住度や、交叉率、突然変異率のチューニングを行うための処理が実行される。

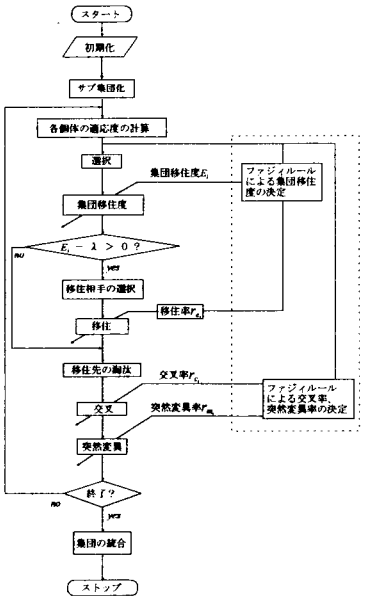


図 1. FASPGA の処理フロー

2.2 遺伝的パラメータの決定

FASPGA のファジィ推論の前件部は FASGA と同じく最大適応度 f_{m_i} および最大適応度と平均適応度との差 $(f_{m_i} - f_{a_i})$ を用いて表すが、後件部には交叉率 r_{c_i} と突然変異率 r_{m_i} 以外に新たに集団移住度 E_i と呼ばれるパラメータを加える。図 2 に FASPGA のファジィルールおよびメンバーシップ関数と後件部シングルトンを示す。

2.3 移住条件

従来の PGA では移住の必要性を検知せず、移住間隔といわれる一定世代ごとの周期によって移住が行われる。そのため従来の PGA では移住が必要かどうかを観測することなしに個体の交換が行われるため、GA の並列処理による効果が必ずしも生かされているとは限らないと考えられる。そこで本研究で提案する手法では、移住操作は一定の移住間隔の替わりに移住条件を設定することで非同期に移住を行うことにする。この移住条件はファジィ推論によって得られる集団移住度 $E_i(i$ は島の番号を表す。$i = 1, 2, \ldots, n)$ と呼ばれるパラメータによって決定され、集団移住度がある一定値 λ を越えたときのみ移住を行うものとする。ここでは移住元は進化の進んでいる集団で、移住先は進化の進んでいない集団とし、移住方向は進化の進んでいる集団から進化の進んでいない集団へと移住することになる。但し、移住を決定するため

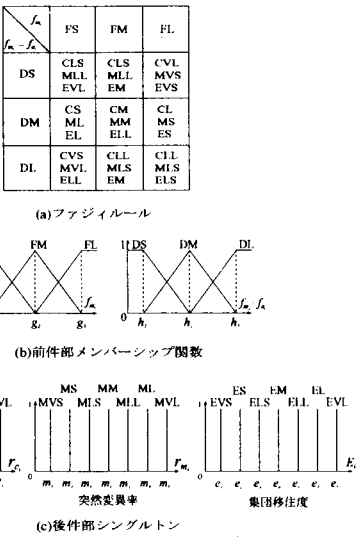


図 2. FASPGA のファジィルール

の条件は以下のようにファジィ推論により得られた集団移住度 (進化の進んでいない度合い) がある値 (λ) 以上になったときに移住が決まるものとする。

$$IF\ (E_i - \lambda) > 0\ THEN\ Migration. \qquad (1)$$

図 3 に FASPGA における移住の概念図を示す。図 3 において $(E_i - \lambda) > 0$ を満たした集団だけが移住を実行する。移住が行われなかった集団ではそのまま交叉や突然変異などの遺伝的操作が行われる。

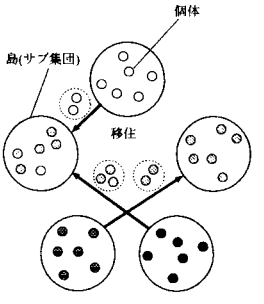


図 3. FASPGA の移住の概念図

2.4 移住相手の選択

移住相手の選択に関しては、集団の多様性を回復するという目的から、できる限り特性の異なった分布を持つ集団を選択することが望ましいと考えられる。そこで各集団がどのくらい異なる適応度分布かを示すものとして式 (2) を用いる。移住条件を満たした集団 i は、他のすべての集団 j に対し、この式で最大適応度と (最大適応度—平均適応度) の 2 乗誤差を計算し、それによって求められた d の値が最も大きい集団を移住相手として選択する。先にも述べたように、ここでいう移住相手とは、個体の移住をしてもらう集団 (移住元集団) を指すので注意されたい。

また、選択方法は統計学的に言うと、平均と偏差値が最も離れた集団を選択していることと等価であり、性質の異なる集団同士の移住により、さらに多様性を高める効果を期待するものである。

$$d = (f_{m_i} - f_{m_j})^2 + \{(f_{m_i} - f_{a_i}) - (f_{m_j} - f_{a_j})\}^2 \quad (2)$$

2.5 移住率の設定

PGA では移住率によって移住する個体の数が決定する。一般の PGA では移住率は交叉率や突然変異率の遺伝的パラメータと同様、終了世代まで一定である。これでは進化の度合い (探索ステージ) に応じて適切な移住が行われているとは決して言えない。そこで本手法では移住率 r_{e_i} は集団移住度 E_i の値に比例するように設定する (式 (3) 参照)。このようにすることで移住が決定するごとにそのときの進化の度合いに応じて移住率が変化する。また、この式における比例定数 k は一定値である。

$$r_{e_i} = k \cdot E_i \quad (3)$$

2.6 移住個体の選択

移住個体の選択方法としては PGA で一般的なルーレット選択を用いる。以下に示すように、移住元の集団における移住個体のルーレット選択は適応度が高い個体が選ばれる確率が高くなるように設定する。なお、移住する先の集団内では個体数を合わせるために、移住個体の選択とは逆に適応度の悪いほうから淘汰する確率が高くなるようなルーレット選択を行う。尚、式において p はサブ集団の個体数を示す。

$$\text{移住元集団の個体選択確率} : \frac{f_i}{\sum_{i=0}^{p} f_i} \quad (4)$$

$$\text{移住先集団の個体選択確率} : \frac{f_{m_j} - f_j}{\sum_{j=1}^{p} (f_{m_j} - f_j)} \quad (5)$$

3 シミュレーション

3.1 シミュレーション条件

今回、提案した FASPGA の有効性を関数の最適化シミュレーションで検証した。評価対象となる問題として、Rastrigin 関数を採用した。Rastrigin 関数とは式 (6) で定義される n 次元の多峰性関数である。また、図 4 に 2 次元の場合の Rastrigin 関数の形状を示す。

$$\begin{aligned} F_{Rastrigin}(x) &= 10n + \textstyle\sum_{i=1}^{n} \{x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i)\} \quad (6) \\ & (-5.12 \leq x_i < 5.12) \\ & min(F_{Rastrigin}(x)) = F(0, 0, \ldots, 0) = 0 \end{aligned}$$

Rastrigin 関数は最適解の周辺に格子状に準最適解を持つ関数であり、設計変数間に依存関係がない関数である。設計変数とは上の式で表されている x_i に代入される変数で、染色体をデコードしたときに変換される変数のことである。一個体の中には n 個の設計変数の情報が含まれている。図 4 において設計変数は 2 個であり、縦軸と横軸が各設計変数を表し、高さが適応度を表している。最適解は適応度の値が 0 になったときであり、図 4 においては原点の谷底が最適解を示している。本実験において設計変数は１０個とし、コード化はグレイコードを用いる。

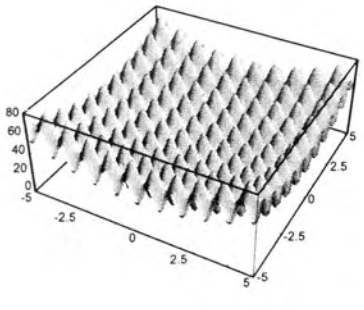


図 4. Rastrigin 関数 (2 次元の場合)

3.2 シミュレーション結果および考察

今回のシミュレーションでは、Rastrigin 関数と呼ばれる多峰性の関数でシミュレーションを行い、最大適応度をもとに GA,PGA,FASPGA の性能比較を行ったので、その結果を以下に示す。ここでは個体数を 20,30,50,100 と設定し、他のパラメータは一定値とした。

探索ステージによる進化に関しては 20 個体の場合、探索初期では PGA と GA が FASPGA に比べて比較的立ち上がりは良かったが、後期では FASPGA と PGA がほぼ同様な進化をしており、FASPGA,PGA ともに最終的には GA よりもかなり良い結果を示した。30 個体では探索初期に FASPGA が最も良好な学習を行っており、後期では FASPGA と PGA ともに性能の差はあまり見られなかったが、最終的には FASPGA が最適解に到達した。50 個体の場合は FASPGA と GA ともに同様な立ち上がりを示しており、PGA はそれほど良好とは言えないが、後期で順調に進化して最終的には GA よりも良好な結果を得ている。FASPGA は 500 世代ぐらいですでに最適解に到達している。100 個体の場合、初期探索で FASPGA が良好な進化をしているが、3 手法とも最終的に最適解に到達しているが、FASPGA が最も早く 200 世代あたりで最適解を得ている。

本研究では、提案した手法であるファジィ適応型探索並列 GA(FASPGA) の有効性を検証するシミュレーション行なった。シミュレーションにおいて、全体の個体数が 20,30 のとき、FASPGA の結果が最も良くなっているのはファジィ推論によるチューニングの効果が出ているものと考えられる。また、個体数が 50,100 のときの FASPGA を PGA と比較すると 50 個体のときに対して 100 個体のときはあまり性能の差が見られない。これは 100 個体のときは個体数が増えたため PGA の探索性能が良くなり、今回のシミュレーションではこれ以上の個体数では、FASPGA の性能が PGA と比較することができないと考えられる。このことから、比較的少ない個体において FASPGA では探索初期に順調な進化が行われるのはファジィ推論による遺伝的パラメータのチューニングの効果により、進化の高速化が行われているためと考えられる。

また、最終的に PGA と比べて FASPGA の方が良い結果が得られたのは、PGA では移住率や移住間隔といったパラメータを変化させることで進化の進み方も変わるが、その移住操作を決める値を FASPGA では探索ステージごとに動的に変化させているため、高い多様性が維持され、その結果、より高質な解に到達するものと考えられる。以上より、移住操作においてファジィ推論で移住条件をチューニングした場合、移住間隔をあらかじめ設定する移住方法よりも効果が得

られることがわかった。

しかしながら、個体数を増やすことによって徐々にPGAとの性能の変化があまりみられなくなったのは、対象問題がそれほど複雑ではなく、最適解に到達しやすかった原因も考えられる。少ない個体で良好な解が得たい場合にはファジィ推論によるチューニングによりPGAよりさらに高速に良好な解を得ることが可能であることが確認された。

4 結言

GAにおいて探索初期、収束期における探索性能の向上が必ずしも最適であるとは言えない問題において、ファジィルールによる遺伝的パラメータ(交叉率、突然変異率など)の探索ステージに応じた適切なチューニングを施すことによる探索の効率化を行うファジィ適応型探索GA(FASGA)と、進化における解の高質化を実現するための並列GA(PGA)を組み合わせたファジィ適応型探索並列GA(FASPGA)を提案した。

本研究ではGA,PGAおよびFASPGAの個体数を変化させたシミュレーションを行い、提案した手法の有効性を検証した。FASPGAとPGAにおける個体数を変化させ比較すると、少ない個体数ではFASPGAのほうがGAやPGAよりもかなりの性能の向上が見られ、多い個体数でも若干の向上が見られた。

今後、本研究の課題として、島数の変化によるFASPGAとPGAの比較検証、より性能の向上を図るための最適なパラメータの検討などが考えられる。また、GAでは一般に個体数が多くなれば最適解を得やすいため、本研究で用いた個体数よりもより多くの個体数で提案手法の検証を行う必要もあると考えられる。

参考文献

[1] 前田陽一郎: "ファジィルールによるGAの探索能力改善手法," ファジィシステムシンポジウム講演論文集, Vol.6, pp.27-30 (1996)

[2] J. Nang and K. Matsuo: "A Survey on the Parallel Genetic Algorithms," 計測と制御, Vol.33, No.6, pp.500-509 (1994)

[3] C. Pettey, M. Leuze and J. Grefenstette: "A parallel genetic algorithm," *Proc. of 2nd ICGA'87*, pp.155-161 (1987)

[4] 三木光範, 廣安和之, 中村康範: "遺伝的アルゴリズムの分散並列化に関する研究(ランダム移住型モデルによる分散並列的アルゴリズムの検討)," 日本機会学会論文集(*A*編), Vol.66, No.645, pp.972-977 (2000)

[5] B. Manderick and P. Spiessens: "Fine-grained parallel genetic algorithms," *Proc. of 3rd ICGA'89*, pp.428-433 (1989)

<連絡先>

〒910-8507 福井市文京3-9-1
福井大学 工学部 知能システム工学科 前田 陽一郎
Tel & Fax : 0776-27-8050(直通)
E-mail : maeda@ir.his.fukui-u.ac.jp

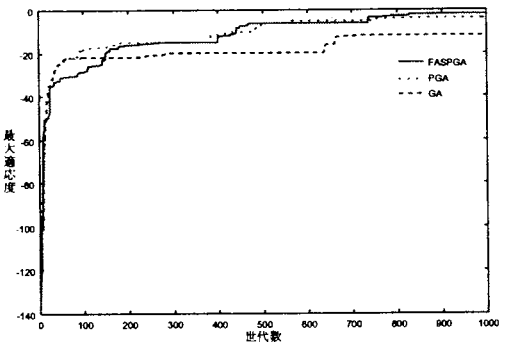


図5. シミュレーション結果(20個体の場合)

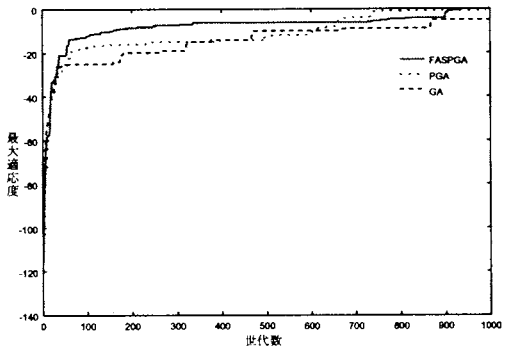


図6. シミュレーション結果(30個体の場合)

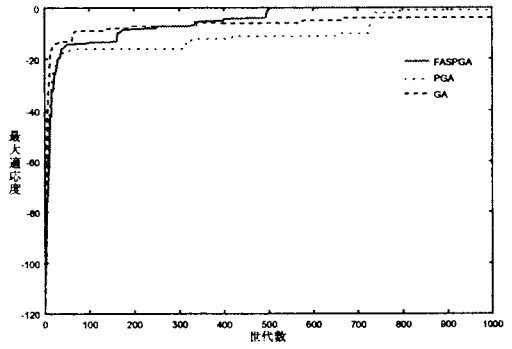


図7. シミュレーション結果(50個体の場合)

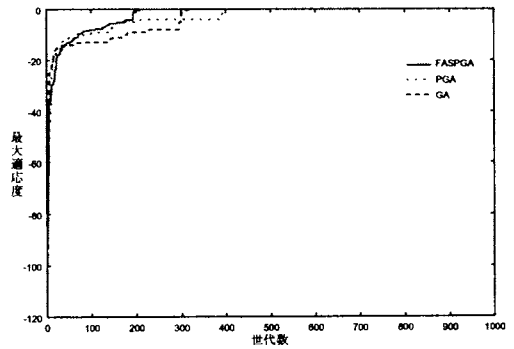


図8. シミュレーション結果(100個体の場合)

進化型多目的最適化のための類似性に基づいた親個体選択手法

Similarity-Based Selection of Parents for Evolutionary Multiobjective Optimization

柴田 洋平　　石渕 久生
Youhei Shibata　　**Hisao Ishibuchi**

大阪府立大学 大学院工学研究科
Dept. of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract: This paper examines parent selection in evolutionary multiobjective optimization (EMO) algorithms. First we propose a simple but flexible mating restriction scheme, which simultaneously improves the convergence speed to the Pareto-front and the diversity of solutions. Through computational experiments on multiobjective knapsack problems, it is shown that the performance of recently proposed well-known EMO algorithms (SPEA and NSGA-II) can be improved by our mating restriction scheme.

1．はじめに

進化型多目的最適化アルゴリズムはパレート最適解を効率よく見つけることができることがわかっており，そのためさまざまな問題に適用されている．最近の進化型多目的最適化アルゴリズムでは，エリート保存操作，ランキング操作，多様性保持操作のような考え方を用いて解の多様性とパレート最適解への収束速度の両方を改善しようとしている．これに対して，Mating Restrictionは多くの研究で言及されているが，その有効性は明らかではない．それゆえ，多くの進化型多目的最適化アルゴリズムでは，Mating Restrictionは用いられていない．そこで，本研究では，Mating Restrictionを用いて親個体を適切に選択することによって，進化型多目的最適化アルゴリズムの探索能力が向上することを明らかにする．

我々の以前の研究[1]では，多目的ナップサック問題と多目的フローショップ・スケジューリング問題を通して，進化型多目的最適化アルゴリズムにMating Restrictionを適用した場合の正の効果と負の効果を示した．個体間の距離を遠く選択することによる正の効果と負の効果は，それぞれ，解の多様性の増加とパレート最適解への収束速度の低下である．また，近い個体を選択することによる正の効果と負の効果は，それぞれ，パレート最適解への収束速度の改善と解の多様性の減少である．本研究では，解の多様性とパレート最適解への収束速度の両方を改善する新しいMating Restrictionを提案する．提案したMating Restrictionを用いることで最近開発された一般的な進化型多目的最適化アルゴリズムであるSPEA [2]と NSGA-II [3]の探索能力が向上することを示す．

2．親個体の選択手法

n目的最適化問題の目的関数は，以下のように定義される．

$$\text{Optimize} \quad \mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), ..., f_n(\mathbf{x})) \tag{1}$$

$$\text{Subject to} \quad \mathbf{x} \in \mathbf{X} \tag{2}$$

ここで，$\mathbf{f}(\mathbf{x})$は目的ベクトル，$\mathbf{x}$は決定変数ベクトル，$\mathbf{X}$は決定変数空間内での実行可能領域である．

目的空間における2つの解$\mathbf{x}$と$\mathbf{y}$の間の距離を，$|\mathbf{f}(\mathbf{x})-\mathbf{f}(\mathbf{y})|$と表わすことにする．本研究では，$|\mathbf{f}(\mathbf{x})-\mathbf{f}(\mathbf{y})|$を次式のようにユークリッド距離で計算する．

$$|\mathbf{f}(\mathbf{x})-\mathbf{f}(\mathbf{y})| = \sqrt{|f_1(\mathbf{x})-f_1(\mathbf{y})|^2 + \cdots + |f_n(\mathbf{x})-f_n(\mathbf{y})|^2} \tag{3}$$

提案手法の概略図を図1に示す．提案手法は，2段階の選択操作と考えることができる．最初の段階では，通常の進化型多目的最適化アルゴリズムと同様に，適応度の値に基づいて選択する．最初の親（図1のParent A）を選ぶために，サイズ2の通常のトーナメント操作をα回繰り返すことで，α個の候補個体（$\mathbf{x}_1$，$\mathbf{x}_2$，...，$\mathbf{x}_\alpha$）を選択する．次に，2番目の段階の選択操作を行うために，目的空間におけるα個の候補個体の中心ベクトル$\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{x})$を次式のように計算する．

$$\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) = (\bar{f}_1(\mathbf{x}), \bar{f}_2(\mathbf{x}), ..., \bar{f}_n(\mathbf{x})) \tag{4}$$

$$\bar{f}_i(\mathbf{x}) = \frac{1}{\alpha}\sum_{j=1}^{\alpha} f_i(\mathbf{x}_j), \qquad i = 1,2,...,n \tag{5}$$

α個の候補個体の間で，中心ベクトル$\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{x})$と最も異なる個体が選ばれる．つまり，目的空間において中

心ベクトル$\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{x})$と最も大きい距離を持つ極端な個体が，最初の親（図1のParent A）として選ばれる．複数の個体が同じ最も大きい距離を持つ場合では，それらの個体の中でランダムに選ばれる．最初の親の選択を図2 (a)で説明する．図2 (a)では，3つの個体$\mathbf{x}_1$，$\mathbf{x}_2$，$\mathbf{x}_3$が最初の親の候補として選ばれている．中心ベクトル$\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{x})$から最も大きい距離を持つ$\mathbf{x}_3$が図2 (a)で最初の親として選ばれる．$\alpha=1$の場合では，最初の親の選択は，サイズ2の通常のトーナメント操作と等しくなる．$\alpha=2$の場合でも，中心ベクトル$\bar{\mathbf{f}}(\mathbf{x})$から候補個体までの距離がいつも等しくなるので，実質的に，最初の親の選択は，サイズ2の通常のトーナメント操作と等しくなる．従って，選択確率が極端な個体の方へ偏らされるのは$\alpha\geq 3$の場合である．

次に2番目の親を決定する．最初の段階では，サイズ2の通常のトーナメント操作をβ回繰り返すことで，2番目の親（図1のParent B）のβ個の候補個体を選択する．2番目の段階では，β個の候補個体の中で最初の親（図1のParent A）と最も似た個体が，Parent Bとして選ばれる．$\beta=5$の場合での2番目の親の選択例を，図2 (b)で説明する．図2 (b)では，5個の候補個体（$\mathbf{x}_4$, ..., $\mathbf{x}_8$）の中で最初の親（すなわち$\mathbf{x}_3$）と最も似た個体$\mathbf{x}_7$が，2番目の親として選択される．新しい個体を生成するために，交叉操作が$\mathbf{x}_3$と$\mathbf{x}_7$に適用される．

我々の以前の研究[1]でのMating Restrictionは，提案手法の$\alpha=1$の場合に対応する．つまり，最初の親はサイズ2の通常のトーナメント操作によって選ばれる．本研究において，新しいMating Restrictionを提案する主要な動機付けは，組み換えを行う親を適切に選ぶことによって，パレート最適解への収束速度と解の多様性を同時に改善することである．

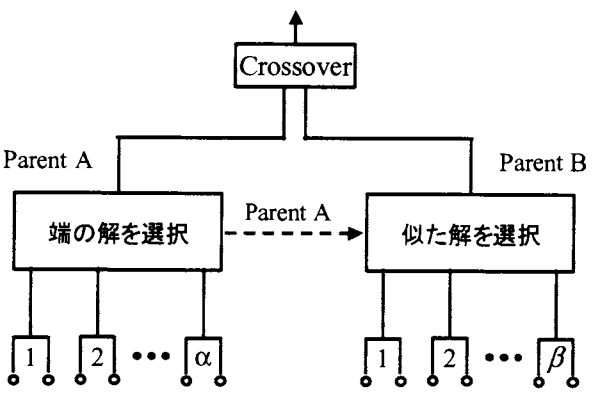
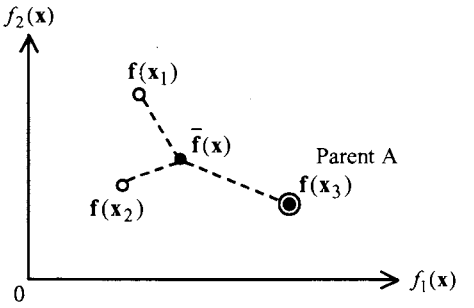
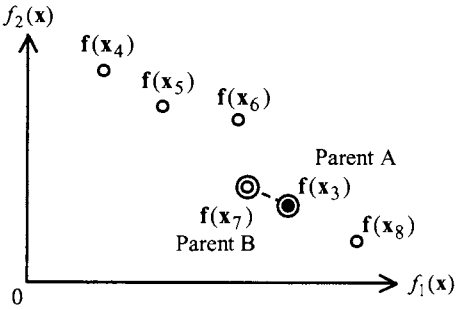


図1　提案手法の概略図



(a) 最初の親の選択（$\alpha=3$）



(b) 2番目の親の選択（$\beta=5$）

図2　提案手法の説明

提案手法は，以下のような自由度を持つ柔軟性の高いMating Restrictionと考えることができる．提案手法の利点を以下に示す．

1) 提案手法は，適応度の定義を修正することなく直接使うことができるので，すべての進化型多目的最適化アルゴリズムに適用することができる．
2) 従来のMating Restrictionで用いられていた交配半径σ_{mating}の設定を必要としない．
3) 極端な個体の方への淘汰圧をパラメータαの設定によって調節することができる．
4) 似た個体の方への淘汰圧をパラメータβの設定によって調節することができる．
5) バイナリトーナメント選択だけでなく他の選択操作（例えばルーレット選択）も最初の段階で用いることができる．

一方，提案手法の問題点を以下に示す．

i) 2つのパラメータαとβの適切な設定は，取り扱う問題に依存する．
ii) Mating Restrictionを行うために追加の計算時間を必要とする．

しかし，ii)に関しては，各個体を評価する時間に比べて，Mating Restrictionを行うことによる追加の計算時間はかなり短いので，無視することができる．

3．数値実験

本研究では，進化型多目的最適化アルゴリズムにおける Mating Restriction の効果を調査するために最近開発された一般的な進化型多目的最適化アルゴリズムである SPEA [2]と NSGA-II [3]に我々の Mating Restriction を組み込む．なお，$\alpha=1$，$\beta=1$ のとき，提案手法は，Mating Restriction を用いない通常のトーナメント操作と等しくなる．したがって，$\alpha=1$，$\beta=1$ のとき，Mating Restriction を適用した SPEA と NSGA-II は，通常の SPEA と NSGA-II と等しくなる．本研究では，α と β の 100 通りの組合せ（すなわち $\alpha=1,2,...,10$ と $\beta=1,2,...,10$）を用いて，進化型多目的最適化アルゴリズムにおける Mating Restriction の効果を調査した．

3.1 テスト問題とパラメータ設定

多目的最適化問題として，Zitzler & Thiele [2]の多目的ナップサック問題（2 目的 250 アイテム問題および 3 目的 500 アイテム問題）を用いた．m アイテムナップサック問題における探索空間のサイズは 2^m である．我々の Mating Restriction を適用した SPEA と NSGA-II は，以下のパラメータのもとでナップサック問題に適用される．

交叉確率：0.8
突然変異確率：$1/m$
NSGA-II の個体群のサイズ：200
SPEA の個体群のサイズ：100
SPEA の外部個体群のサイズ：100
終了条件：2000 世代

このパラメータ設定において，個体群のサイズは，SPEA より NSGA-II にやや有利に設定されている．しかしながら，本実験の目的は，お互いの手法を比較することではなく，Mating Restriction の効果を調査することであるので，個体群のサイズの設定は重大な問題ではない．

3.2 性能評価測度

性能評価測度として，個々のパレート最適解と獲得された最も近い解との平均距離を用いた．この測度は $D1_R$ と呼ばれている．$D1_R$ 測度は次式のように表わすことができる．

$$D1_R(S)=\frac{1}{|S^*|}\sum_{\mathbf{y}\in S^*}\min\{d_{\mathbf{xy}}\mid \mathbf{x}\in S\} \qquad (6)$$

ここで S^* はパレート最適解集合，S は獲得された解集合，$d_{\mathbf{xy}}$ は次式のようにパレート最適解 $\mathbf{y}$ と獲得された解 $\mathbf{x}$ との距離である．

$$d_{\mathbf{xy}}=\sqrt{(f_1(\mathbf{y})-f_1(\mathbf{x}))^2+\cdots+(f_n(\mathbf{y})-f_n(\mathbf{x}))^2} \qquad (7)$$

3.3 実験結果

α と β の 100 通りの組合せ（すなわち $\alpha=1,2,...,10$ と $\beta=1,2,...,10$）を用いて，進化型多目的最適化アルゴリズムにおける Mating Restriction の効果を調査した．なお，各々の組合せに対して，各アルゴリズムを 10 回テスト問題に適用した．

2 目的 250 アイテム問題において，通常の NSGA-II と我々の Mating Restriction を適用した NSGA-II の 50% Attainment Surface を図 3 で示す．Attainment Surface とは，複数回の実行で得られた解集合を視覚的に表わすために使われる手法である．修正された NSGA-II では，$D1_R$ 測度が最も良い性能を示した α と β の値を用いた．図 3 から，より良い結果が修正された NSGA-II で得られたことがわかる．また，似たような結果が SPEA についても得られた．

2 目的 250 アイテム問題と 3 目的 500 アイテム問題において，10 回実行における $D1_R$ 測度の平均値を図 4 と図 5 にそれぞれ示す．$D1_R$ 測度は，値が小さければ小さいほど，性能が良いことを示している．また，$\alpha=1$，$\beta=1$ のときは，通常の進化型多目的最適化アルゴリズムと等しくなり，各図では右上の角の棒線に対応している．図 4 と図 5 から，α と β の多くの組合せに対して，SPEA と NSGA-II の性能が向上したことがわかる．特に，図 5 では α と β の全ての組合せに対して，我々の Mating Restriction を組み込むことによって，性能が向上した．図 4 では，α の値がとても大きい場合に，SPEA と NSGA-II の性能が悪くなった．

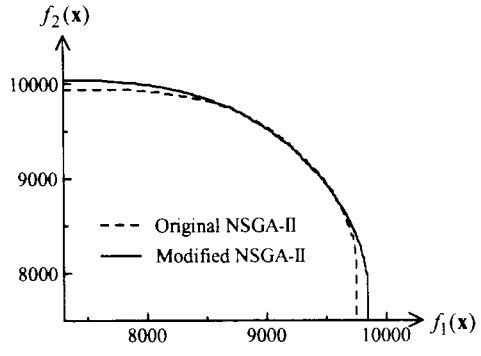
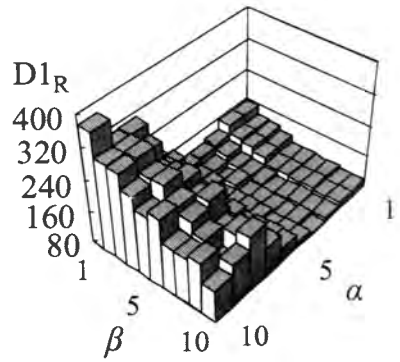
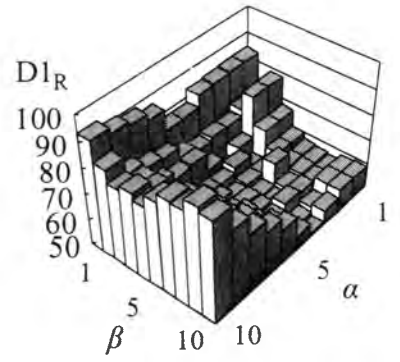


図 3　50% Attainment Surface

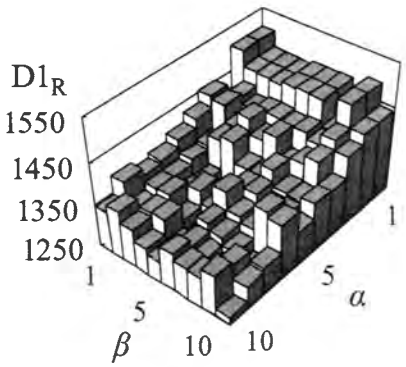


(a) 修正された SPEA による結果

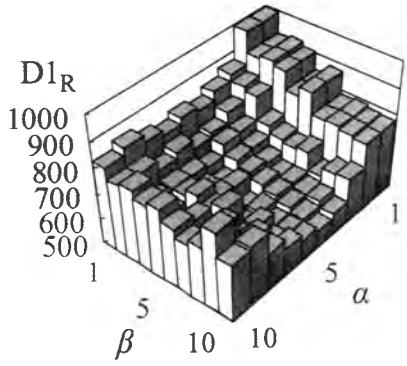


(b) 修正された NSGA-II による結果

図 4　2 目的 250 アイテム問題の結果



(a) 修正された SPEA による結果



(b) 修正された NSGA-II による結果

図 5　3 目的 500 アイテム問題の結果

4．おわりに

本研究では，解の多様性とパレート最適解への収束速度を同時に改善する 2 段階の Mating Restriction を提案した．基本的な考え方は，解の多様性を維持するために極端な個体を交叉における親の一つとして選択し，もう一つの親はパレート最適解への収束速度を改善するために最初に選択した親に似た個体へ選択確率を偏らせて選択を行うことである．我々の Mating Restriction の効果を調査するために，Mating Restriction を組み込んだ SPEA [2]と NSGA-II [3]を多目的ナップサック問題に適用した．一般に，解の多様性とパレート最適解への収束速度を同時に改善することは難しい．これは，我々の Mating Restriction の場合でも当てはまる．我々の Mating Restriction では，解の多様性とパレート最適解への収束速度の間のバランスを取るために，2 つのパラメータ（α と β）を注意深く調節する必要がある．今後の研究として，2 つのパラメータ（α と β）を注意深く調節するため，動的に調節する手法の開発が考えられる．

参考文献

[1] H. Ishibuchi and Y. Shibata, “An Empirical Study on the Effect of Mating Restriction on the Search Ability of EMO Algorithms,” *Proc. of Second International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, pp. 433-447, April 8-11, 2003.

[2] E. Zitzler and L. Thiele, “Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach,” *IEEE Trans. on Evolutionary Computation* 3 (1999) 257-271.

[3] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, “A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II,” *IEEE Trans. on Evolutionary Computation* 6 (2002) 182–197.

問い合わせ先

〒599-8531　堺市学園町 1 － 1
大阪府立大学 大学院工学研究科
石渕 久生
TEL: 072-254-9350
FAX: 072-254-9915
E-mail: hisaoi@ie.osakafu-u.ac.jp

遺伝的アルゴリズムとファジィ評価を用いた複数配送車考慮下での物資配送計画
Transportation Scheduling under consideration for multi-transport vehicles Using Genetic Algorithms and Fuzzy Evaluation

河野　亮太　　前田　幹夫
Ryota KOHNO　　Mikio MAEDA
九州工業大学　工学部
Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract: The first, the scheduling of this research introduced a genetic algorithm and a fuzzy theory to this scheduling, and describe how to display the best route obtained from that. Second, when multi-transport vehicles are taken into consideration, from the mesh map, the area maps which integrated some mesh data with a certain fixed size are created, and transportation scheduling assigns the area maps to multi-transport vehicles. From results of the fuzzy scheduling and the simulations, we discuss the usefulness of this method.

1．　はじめに

本研究[1]では，企業活動において複数の得意先に物資を配送してまわる際に，効率的な配送経路を特定し，各得意先への予想到着時刻を提示できる物資配送計画について述べる．実際には、得意先間の移動時間は移動する時間帯によって変化する．また，配送経路を決定する際，総巡回時間の最小化だけでなく，得意先への到着時刻指定や配送順序の制約条件も考慮し，それをファジィ評価することによって配送経路の決定を行う．

本研究のスケジューリングは，まず，遺伝的アルゴリズム[2 - 4]とファジィ理論[5,6]を導入した実用的な物資配送計画法から求めた最適な配送経路を提示する．

次に，メッシュ地図より，ある一定の大きさのエリアデータ（本研究では縦5×横5のメッシュを1エリアデータ）で統合したエリア地図を作成し，そのエリア地図をもとに複数の配送車両を割り当てる．ある配送地域の中にある配送点を，1台の配送車が担当する配送点とし，各配送地域内での配送スケジューリングを行う方法を提案する．

最後に，スケジューリングと運用シミュレーションの結果から，本方法の有効性について検討する．

2．　物資配送計画

2．1　配送計画

物資配送計画において順序を決定する際には，それぞれの順序に対しての評価基準が必要となる．そこで，各順序を評価するための関数を目的関数として設定し，目的関数から得られた値を最大化または最小化するような配送順序を求める．

2．2　配送順序の評価

主な目的関数として，総配送時間 f_{end}，総約束到着時間遅れ T_{x_i}，優先順位を設定し，配送順序の評価を行う．それぞれの目的関数については，文献[1]を参照．

3　物資配送計画へのファジィ理論の導入[1]

3．1　物資配送計画のファジィモデル化

物資配送計画を行う際，まず対象をモデル化しなければならない．ファジィ物資配送計画では，配送ポイント間の時間をファジィ数で表し，ポイントごとの約束訪問時刻，優先順位をファジィ制約条件として与え，ファジィ物資配送計画モデルとする．

移動時間が“だいたい r である”と分かっているとき，各移動時間ごとのメンバーシップ関数は r を基準として，図1のような三角型ファジィ数で設定する．移動時間が厳密に分かっている場合にはクリスプ数でもよい．

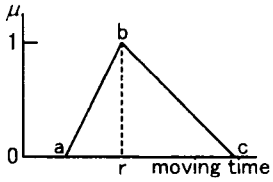


図1　移動時間のメンバーシップ関数

3．2　目的関数の設定

本論文では目的関数として，総配送時間と到着時刻条件，優先順位を考える．しかし，総配送時間，到着時刻条件がファジィとなり，それらを単純に比較評価することは難しい．そこで，いくつかの目的関数を組み合わせて，それを評価値とする．

a.　総配送時間

配送順序を評価する1つの方法として，総配送時間を考える．総配送時間は，2.2項で述べたように f_{end} として表すことができ，この三角型メンバーシップ関数である f_{end} の重心を取り，それを総配送時間の評価 f_T とし，f_T を最小化するような順序を求める．

b.　ファジィ目標と到着時間の一致度（ファジィ目標満足度）

ある配送点到着時間について希望ないし制約がある場合，それをファジィメンバーシップ関数で表す．これをファジィ目標とし，例として，図2の形状をとる．図も他3種類あるが省略する．（文献[1]を参照）

ファジィ目標のメンバーシップ関数を μ_G とし，図2の場

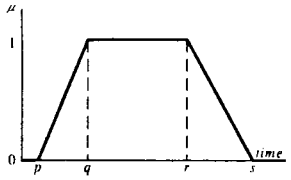


図2　ファジィ目標のメンバーシップ関数の概形

合は 4 つのパラメータ p,q,r,s によって表す．図 **2** ファジィ目標メンバーシップ関数 μ_{G_i} を数式で表すと，**(1)**式のようになる．ここで x は，0 または $x>0$ で任意の値(time)である．

$$\mu_G = \begin{cases} 0 & (x \le p) \\ \dfrac{1}{q-p}x - \dfrac{q}{q-p} & (p < x < q) \\ 1 & (q \le x \le r) \\ \dfrac{1}{r-s}x + \dfrac{s}{r-s} & (r < x < s) \\ 0 & (s \le x) \end{cases} \quad (1)$$

ここで配送点 i の到着時刻メンバーシップ関数を μ_{A_i} とし，$\tilde{N}(a,b,c)$ とする．このときのファジィ目標と到着時刻の一致度を f_{G_i} とし，これを求める方法を以下に示す．

配送点の到着時刻メンバーシップ関数 μ_{A_i} とファジィ目標メンバーシップ関数 μ_{G_i} の重なった部分の面積の合計を A とする(図 **3**)．これを配送点 i の到着時刻メンバーシップ関数 μ_{A_i} の面積 A'で割った値を，配送点 i 到着制限時刻との一致度 f_{G_i} とする．これを，全ての配送点 $(i:1\sim n)$ について計算し，その最小値を順序の一致度 f_G とする((**2**)式)．

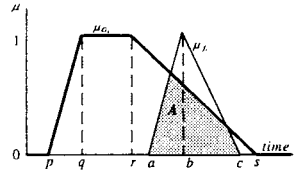


図 3　ファジィ目標と到着時間の一致度

$$f_G = \min_{1\le i\le n}\left(f_{G_i}\right) = \min\left(f_{G_1} \wedge \ldots \wedge f_{G_n}\right) \quad (2)$$

c. 優先順位

ポイントを巡回するときに，仕事の都合上などから，あるポイントよりも優先して行かなければならないポイントがある．そのような条件を満たさない場合には，各優先順位の重要度に応じて優先順位の一致度 f_P を変化させる．

ポイント i をポイント j より優先するとき，その重要度を p_{ij} とする．ある配送順序について，優先条件 $(i \to j)$ に反する順序の組 (i,j) の集合を R とすると，一致度 f_P は次式で表される．

$$f_P = \prod_{(i,j)\in R}(1-p_{ij}) \quad (0 \le p_{ij} \le 1) \quad (3)$$

一つでも優先条件を侵していない場合は $f_P = 1.0$ である．

d. 総合評価

以上述べた 3 つの目的関数 (f_T, f_G, f_P) のうち，2 つの f_G, f_P に重み (w) をつけ，総合したものを総合一致度 f_R とする．

$$f_R = (1-w_G(1-f_G))\times(1-w_P(1-f_P)) \quad (0 \le w_G \le 1,\ 0 \le w_P \le 1) \quad (4)$$

これらをもとに，配送順序の総合評価 f は，

$$f = f_T / f_R \quad (5)$$

この総合評価 f が小さいほど配送順序として良いものであるとする．

4　遺伝的アルゴリズムの導入[1]

配送点が多くなると，完全列挙法は全ての順序を完全に探索するので計算回数がその階乗に比例して飛躍的に増加してしまい実用的でなくなる．計算量を少なくした厳密解法はいくつか提案されているが，それらは 1 つの最適解を求めることを前提に考えられているので，ファジィ物資配送計画に対し，複数の最適解を提案する場合，逆に計算回数の増加が考えられ，適用させることが難しい．

そこで，ある程度の大きな規模の物資配送計画に対する有効な解法として，遺伝的アルゴリズム(GA) **[2 - 4]**を用いたファジィ物資配送計画手法を考える．

4．1　個体集団の生成

本論文では，遺伝子を配送ポイント番号として，配送ポイント番号が重複しないように並べたものを遺伝子列とする．このときの遺伝子列はすなわち配送順序であり，個体は 1 つの遺伝子列，つまり配送順序を持つものとする．また個体のサイズ，つまり遺伝子の数はポイント数 n となる．

4．2　個体の評価法

M 個の個体集合の各個体（配送順序）について，**3.2** 項で定めた評価関数を用いて評価値を計算する．この評価値 f を用いて GA 空間における個体の適応度を

$$g = 1/f \quad (6)$$

として定め，評価値の小さい配送路を持つ個体ほど優秀であり，適応度が高いものであるとする．このとき世代数が決定した最終世代であれば，個体集合の中で適応度の上位数個の個体を準最適解として終了する．そうでないときは，世代の更新を行う．

5　メッシュ地図を特化した Dijkstra の重み付きグラフの最短路アルゴリズム

最短経路の決定のアルゴリズムは，基本的にはE．W．Dijkstra により発見された重み付きグラフにおける 2 点間の最短道決定[7]の手続きを用いる．しかし，E．W．Dijkstra の手続きでメッシュのように中央点が多い場合，全ての中央点に対して探索するのでは時間がかかるとともに，中央点に隣接しているメッシュの中央点でなければ，道は存在しないため，無駄が多く出てくる．よって，隣接メッシュの中央点だけ探索するように変更し，時間短縮を計る．メッシュ地図に特化した場合とそのままの場合での経路探索時間の違いについてのスケジューリングの結果，スケジューリング結果は省くが，特化することにより約 2 倍以上の高速化が実現できた．

メッシュ地図と Dijkstra のアルゴリズムを用いることにより，任意の配送点間において，時間帯により可変であいまいさを持つ移動時間とその移動経路を得ることができる．

6　複数配送車による配送スケジューリング

複数配送車による配送スケジューリングで問題となるのは，各配送車がどの配送点を配送するかを決定することである．これまでの1台による配送スケジューリングでは，配送点を遺伝子，配送順序を遺伝子列として遺伝的アルゴリズムを用いて最良配送順序の探索をしている．そこで，この配送順序である遺伝子列に仕切り "|" を配送車両N台に対して(N−1)箇所選び，分割された部分の遺伝子列を配送車N台がそれぞれ担当する方法が考えられる．しかし，このアルゴリズムでは遺伝子列に仕切り "|" を選ぶ場合，配送点数と配送車両数によって発生しうる仕切りの選択数の組み合わせは多く，それら全てに対してスケジューリングし，評価していては計算時間が増加してしまい，実用的ではなくなる．

そこで，本稿ではこの複数配送車による配送スケジューリングを，メッシュ地図から作成されるエリア地図を使用してスケジューリングを決定する方法を提案する．

まずメッシュ地図より，ある一定の大きさのエリアデータからなるエリア地図を作成し，このエリア地図をもとに複数の配送車両を各配送地域に割り当てる．ある配送地域の中にある配送点を，1台の配送車が担当する配送点とし，各配送地域内での配送スケジューリングを行う．

エリア地図内の配送地域は，配送車の台数に応じた数とし，複数の配送車両を割り当てていく．

6．1　配送地域割り当てアルゴリズム

Step1：　配送車両N台を，N個のエリアデータにランダムに割り当てる．

Step2：　配送車両N台について，それぞれを評価関数に従って評価する．

Step3：　配送車両N台からランダムに2台選び，その配送車両同士でエリアデータのある地域をランダムに入れ替える．

Step4：　Step2に戻り，入れ替えを行ったエリアデータでのスケジューリングを再評価する．評価が良ければその入れ替えを固定し，評価が悪ければその入れ替えを元に戻す．

Step5：　Step3,4を繰り返し，配送車両N台の評価から総合評価を求め，その最小を保存し，Step1へ戻る．

以上を繰り返し、保存しておいた総合評価の中で最小のものを最良配送地域割り当てとする．

6．2　配送車両の最大積載量

各配送車両において，配送する荷物の総重量が，配送車両の最大積載量を越えないように配送点を割り当てる．配送車両$v_i\ (i:1\sim n)$に割り当てられた配送点kの配送量を$w_{v_i}^k$とし，配送車両v_iの総配送量w_{v_i}を求める．また最大積載量を$W_{\max}$とし，最大積載量を超えないようにする．

$$w_{v_i} = \sum_{k=1}^{m} w_{v_i}^k \tag{7}$$

$$w_{v_i} \le W_{\max\ v_i} \tag{8}$$

6．3　配送車両コスト

配送車両コストは，配送を行う際に掛かる燃料費や人件費を考える．単位距離当りの燃料費をt_F，人件費をt_Mとし，配送車両1台の配送距離t_D，配送車1台の労働時間t_Tを求め，配送料金$t_F \times t_D$と給料$t_M \times t_T$を計算する．そしてこれに対応する燃料費コストf_F，人件費コストf_Mを求め，2つの目的関数(f_F, f_M)に重み(w)をつけ，総合評価f_sを求める[1].

$$f_s = (1 - w_F(1 - f_F)) \times (1 - w_M(1 - f_M))$$
$$(0 \le w_F \le 1, 0 \le w_M \le 1) \tag{9}$$

6．4　配送地域エリアデータの集積度

配送車両ごとに割り当てられたエリアデータの集積度を求める．この集積度とは，各配送車両に割り当てられたエリアデータが集中している度合いである．エリアデータが集中していないと，その配送車両の移動時間及び移動距離は大きくなってしまい，配送コストが多くかかる．各配送車両の配送地域を効率的に割り当て，更に配送コストを最小にする配送地域を割り当てる．

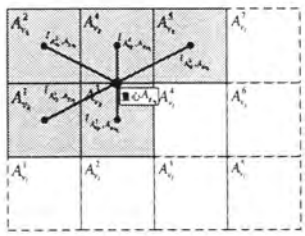


図4　組み替え前の集積度

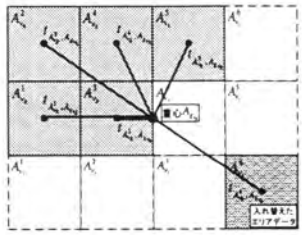


図5　組み換え後の集積度

配送車両v_k, v_lそれぞれに割り当てられたエリアデータ数をn_{vk}, n_{vl}，エリアデータを$A_{v_k}^{n_{vk}}, A_{v_l}^{n_{vl}}$，エリアデータの重心を$A_{g_{vk}}, A_{g_{vl}}$とする．更に，割り当てられたエリアデータからエリアデータの重心までの距離を$t_{A_{v_k}^{n_{vk}}, A_{v_k}^{n_{vk}}}, t_{A_{v_l}^{n_{vl}}, A_{v_l}^{n_{vl}}}$とし，組み換え前の集積度(分散)を求める．

$$V_{v_k} = \frac{\sum_{j=1}^{n_{vk}} (t_{A_{v_k}^j, A_{g v_k}})^2}{n_{v_k}} \tag{11}$$

$$V_{v_l} = \frac{\sum_{j=1}^{n_{vl}} (t_{A_{v_l}^j, A_{g v_l}})^2}{n_{v_l}} \tag{12}$$

同様に組み換え後の集積度V_{vk}', V_{vl}'から，総合集積度$V = V_{vk}' + V_{vl}'$を求め，総合集積度を最小にするようなエリアデータの組み換えを行う．

7　スケジューリングとその結果

10個の配送点を設定し，物資配送計画法に従い巡回するスケジューリングを行う．配送車両は最大3台とし，点Oを配送開始地点および最終地点とする．各配送点の滞在時間は最短15(min)・平均30(min)・最長45(min)，配送開始時刻を13:00として最良配送経路探索を行う．

メッシュ地図用に特化したDijkstraの重み付きグラフの最短路アルゴリズムと，配送順序探索アルゴリズムにGA探索法を適用．配送点A→Hに対する優先関係，配送点Eに14:00から15:30までの到着時刻指定を考慮する．

配送シミュレーションの初期設定は，配送車両1台の使用費を20000円，燃料費を30円／km，人件費を時給1000

円とし，配送車両１台の最大積載量を 3000kg とする．また配送点への配送両を全て 300kg とする．

・優先関係の設定は(3)式の重要度(p_{ij})を１とする．

・制約条件の設定は図 **2** の概形のファジィ目標メンバーシップ関数を用い，(1)式の各パラメータを $p = 780$，$q = 810$，$r = 930$，$s = 960$ とする．

・(4)式の重みは $w_G = 1$，$w_P = 1$ とする．

GA の各パラメータは，個体数 $M = 120$，選択個体数 60，エリート個体数 12，エリート個体は適応度上位 10%，選択率は適応度上位 50%，突然変異率 0.3，終了判定世代数 100 とする．スケジューリングの結果を表 **1**，配送評価を表 **2**，配送地域の割り当て結果を図 **6**，配送経路を図 **4** に示す．

以上の結果から，制約条件を満たし，かつ複数台の配送車両を使用することで，巡回する際に必要な配送コストを低く抑えることができる配送スケジューリングを提案することができている．

9　まとめ

本論文では，物資配送計画法の提案を目的とし，そのための手法を示した．現実に問題となる移動時間や制約条件を考慮し，実用可能な時間で使用できる物資配送計画法を示すことができた．また，複数配送車両を考慮下での，配送コストを最小にする配送スケジューリングを提案した．

今後の課題としては，メッシュ地図の細密化による計算時間増加への対処が考えられる．また，複数配送車両を考慮する場合，配送地域割り当ての際の評価指数を増やし，有効な配送地域の精度の向上と，配送コストの削減を目指す必要がある．

表１　スケジューリング結果

表1.1 配送車両1台目の配送順序

訪問順序	到着時間			滞在時間		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大
O(出発点)	13:00	13:00	13:00			
↓						
A	13:08	13:14	13:20	0:20	0:30	0:40
↓						
F	13:41	14:06	14:30	0:20	0:30	0:40
↓						
E	14:03	14:39	15:15	0:20	0:30	0:40
↓						
B	14:33	15:25	16:17	0:20	0:30	0:40
↓						
H	15:07	16:19	17:32	0:20	0:30	0:40
↓						
O(終了点)	15:35	17:03	18:32			

表1.2 配送車両2台目の配送順序

訪問順序	到着時間			滞在時間		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大
O(出発点)	13:00	13:00	13:00			
↓						
D	13:05	13:09	13:13	0:20	0:30	0:40
↓						
O(終了点)	13:30	13:48	14:07			

表1.3 配送車両3台目の配送順序

訪問順序	到着時間			滞在時間		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大
O(出発点)	13:00	13:00	13:00			
↓						
I	13:08	13:14	13:20	0:20	0:30	0:40
↓						
G	13:38	14:00	14:22	0:20	0:30	0:40
↓						
C	14:05	14:43	15:21	0:20	0:30	0:40
↓						
O(終了点)	14:26	15:16	16:07			

表２　配送評価

		使用費コスト (×100)	人件費コスト (×100)	燃料費コスト (×100)	配送コスト (×1,000,000)	総配送コスト (×1,000,000)
配送車両1台による配送		20.0	5.2	7.3	759.2	759.2
配送車両2台による配送	配送車両1台目	20.0	2.0	3.0	120.0	271.2
	配送車両2台目	20.0	2.1	3.6	151.2	
配送車両3台による配送	配送車両1台目	20.0	2.8	4.0	224.0	295.2
	配送車両2台目	20.0	0.6	0.8	9.6	
	配送車両3台目	20.0	1.4	2.2	61.6	

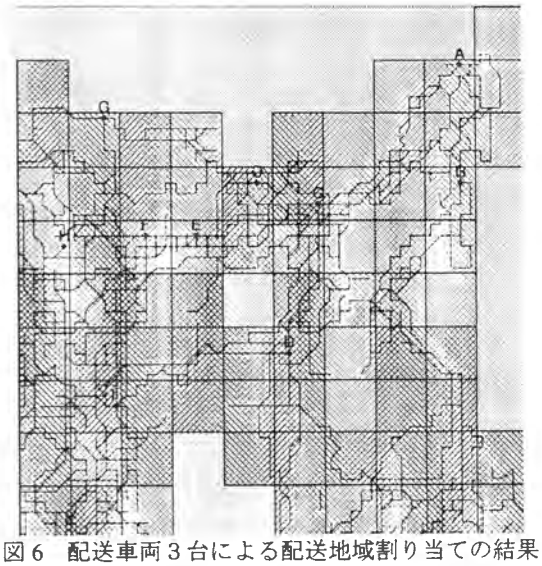
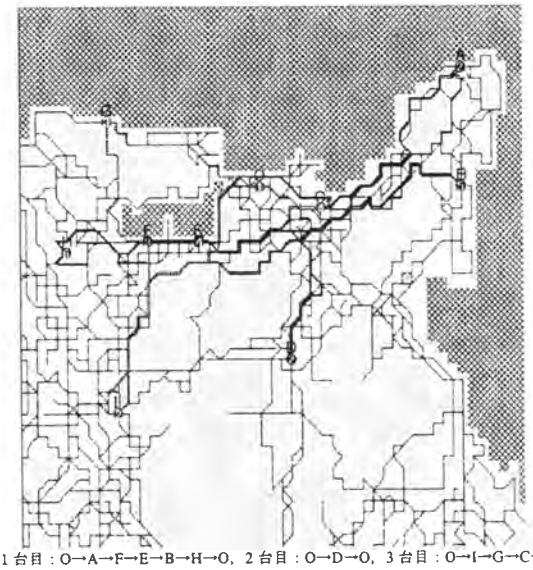


図６　配送車両３台による配送地域割り当ての結果



（１台目：O→A→F→E→B→H→O，２台目：O→D→O，３台目：O→I→G→C→O）

図７　運用シミュレーション結果

参考文献

[1] 前田，濱田，村上，遺伝的アルゴリズムファジィ評価を用いた物資配送計画，知能と情報(日本知能情報ファジィ学会誌)，**vol.15, No.1, pp.111-126 (2003)**

[2] 坂和正敏，田中雅博，遺伝的アルゴリズム，**pp.17-30,115-123(1995)**朝倉書店

[3] 三宮信夫，喜多一，玉置久，岩本貴司，遺伝アルゴリズムと最適化，**pp.1-51(1998)**朝倉書店

[4] 北野宏明，遺伝的アルゴリズム，**pp.43-60(1993)**産業図書

[5] 村上周太，向殿政夫，本多中二，前田幹夫，和多田淳三，坂和正敏，ファジィシステム演習問題集，**pp.9-10,49-56,171-187(1992)**工業調査会

[6] 水本雅晴，ファジィ理論とその応用，**pp.107-121(1987)**サイエンス社

[7] C.L.リュー，成嶋弘，秋山仁，コンピュータサイエンスのための組み合わせ構造とグラフ理論入門，**pp.111-114 (1978)**マグロウヒル好学社

連絡先：〒804-8550　北九州市戸畑区仙水町１－１
九州工業大学工学部電気工学科
前田　幹夫
TEL　(093)884-3249
E-mail　mmaeda@comp.kyutech.ac.jp

遺伝的アルゴリズムによる選挙区の区割り決定に関する研究

A Study on Electoral Districts Determination Using Genetic Algorithm

中尾一成　　畠中利治　　魚崎勝司
Issei Nakao, Toshiharu hatanaka, Katuji Uosaki
大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

Abstract: Determination of single seat electoral district is a complex combinational problem that considers not only disparity in the relative weight of one vote but also geographical and historical circumstances of the municipality. Since the actual work of changing electoral boundaries is performed manually, it takes much cost, and the possibility of intentional district is also pointed out. In this paper, we propose a genetic algorithm approach to automatic determination of electoral district. The contiguity matrix that indicates the municipality connection, is made using fuzzy reasoning and the candidates of electoral district evolve to the optimum by means of the equity of value of a vote and the compactness of each district. The numerical example using the actual data of Osaka prefecture shows the availability of the proposal approach.

1　はじめに

現在，衆議院議員の小選挙区選挙の選挙区の区割りは，1票の格差の是正を目的に原則として10年ごとに改定されることが定められている．平成14年には，平成12年度の国勢調査に基づく，衆議院議員選挙区画定審議会の小選挙区の区割り改定案の勧告（いわゆる5増5減案）により，公職選挙法が一部改正され，20都道府県において計68選挙区が改定された．この結果，格差は2.628倍から2.124倍に縮小されたものの，一票の価値が等しいという原則に基づいて，さらなる格差の是正を求める声も少なくない．

実際の小選挙区の区割りは，都道府県単位に配分された定数のもとで，一票の格差だけでなく，以前の中選挙区の選挙区割りなどの地域の地理的条件などを考慮しながら，飛び地を作らない構成となるようになされる非常に難しい組合せ問題である．このため，選挙区の改定作業を人手で行うことには，非常に大きなコストを要し，また，恣意的な区割りが行われる危険性も指摘されている．そこで，計算機を用いた小選挙区の区割りの援用あるいは自動化をはかるシステムの開発は，公平な選挙区の区割りを決定するうえで有用であり，このような立場から，最適化手法に基づく選挙区の区割り法が研究されてきている．斉藤らは，相互結合型のニューラルネットワークを利用した小選挙区の区割り画定法を提案している [1]．ここでは，選挙区の区割りのための制約条件を，ニューラルネットワークの動作式に埋め込むことで，自動的に最適な区割りを求めている．しかし，この手法では，何らかの要因で制約条件が変化した場合，これを動作式に表現しなければならない．したがって，このような調整を行うには，ニューラルネットワークに関する専門的な知識が要求され，区割り作業の担当者による調整が困難であると考えれらる．

そこで，本研究では，近年，生物の進化を模擬した最適化手法として様々な問題に適用されている遺伝的アルゴリズムを用いた小選挙区の区割り手法を提案する．遺伝的アルゴリズムを用いることで，自動的に区割りが可能であるほか，オペレータが対話的に進化を進めることや複数の解の候補の提示が可能になることから，より現実的には，区割り作業の有用な支援ツールとなることが期待できる．

本論文では，まず，そのための基礎的な検討として，選挙区を構成する単位である自治体を遺伝子座とし，遺伝子が選挙区を表すような遺伝的アルゴリズムを考える．また，地理的条件などによる行政区画同士の関係をファジィ推論を用いて数値化し，行政区画の関係を与える隣接行列を作成し，人口格差と共に個体の適応度を求めるために用いることを示す．選挙区は原則として飛び地を作らないように作成されなければならないので，飛び地の数を制約条件として遺伝的アルゴリズムを構成する．これにより，オペレータが各パラメータを与えることで，自動的に選挙区の区割り作業が行えることを大阪府の人口などのデータをもとにした数値シミュレーション結果で示す．

なお，本論文の構成は次の通りである．2章で小選挙区の区割り問題について述べ，3章で提案手法の概要を示す．4章では，実際のデータを用いた数値シミュレーションの結果を紹介し，提案手法の有用性につい

て検討する．

2　小選挙区の区割り問題の設定

実際の小選挙区の区割りの決定は，次の3つの基準に照らして行われている．

1. 選挙区の人口格差は2倍以内とする．
2. 飛び地を作らない．
3. 原則として行政区域は分割しない．

例外的に人口の多い都市が複数の選挙区に分割されている．本論文においても同様に人口の多い都市は，現在の区割りにおける分割をそのまま用いることとした．人口格差は，当然のことながら，より小さいことが望ましい．そこで，本論文では，遺伝的アルゴリズムを人口格差が小さい選挙区ほどよいという適応度を設定し，飛び地の数を制約条件に，選挙区割りを探索することを考える．

ここで，単に飛び地がない選挙区とは，その選挙区を構成する行政区画どうしが地理的に境界を接しているという条件を満たすことである．畠中らは，そのような場合に遺伝的アルゴリズムを用いた小選挙区の区割りが可能であることを示した [2]．しかし，実際の選挙区は，生活圏が一体となっている行政区画や道路や鉄道などを介してつながっている行政区画を同じ選挙区としてまとめる方が望ましい．そこで，本論文では，行政区画同士の関係の深さを隣接行列として与えることを考える．オペレーターが与える情報から，ファジィ推論を用いて選挙区を構成する行政区画の結びつきの深さを数値化し，結びつきの程度を定量的に選挙区の評価に組み入れることを可能にすることを考える．

3　遺伝的アルゴリズムを用いた区割りの最適化

3.1　個体表現

個体表現は，交叉，突然変異によって致死遺伝子にならないような個体表現でなければならない．そこで，個体は図1.に示すように，区割り対象の都道府県における選挙区を構成する市および郡や町村などの行政区画に等しい長さの数列で構成されるものとする．異なる選挙区に分割される人口の多い市については，あらかじめ適当な複数のエリアに分割して扱うと，より格差の小さい区割りが可能になると思われるが，今回の実験では，現在の区割りに用いられている分割を用いた．また，各遺伝子座の遺伝子は，その行政区画が編入される選挙区の番号とした．

図 1: GA の染色体

3.2　遺伝的操作

遺伝的操作としては，交叉と突然変異を施す．交叉は，ここでは，一様交叉を採用した．また，突然変異は，選ばれた遺伝子座に対して小さな確率で，その値をランダムに変えるものとした．

3.3　隣接行列

隣接行列を求めるには，まず，地理的条件，政治的条件，歴史的条件などの条件ごとに行政区画同士の関係をテーブルとして用意する．そして，それぞれのテーブルからファジィ推論を用いて隣接行列を求めるという手順で隣接行列を作る．非ファジィ化には Min-Max 法を用い，隣接行列の要素を定める．図3に隣接行列の一部分を例示する．値は [0,1] に正規化している．結びつきが深い行政区画間は1に近い値となり，地理的に隣接しない場合は要素を0とする．対角成分は1とした．

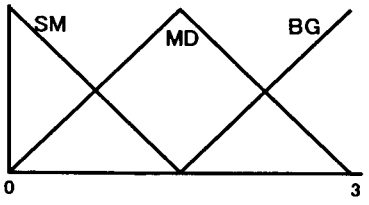


図 2: ファジィ集合

	能勢町	豊能町	池田市	箕面市	豊中市
能勢町	1	0.9	0	0	0
豊能町	0.9	1	0	0.6	0
池田市	0	0	1	0.6	0.8
箕面市	0	0.6	0.6	1	0.8
豊中市	0	0	0.8	0.8	1

図 3: 隣接行列の例

3.4　適応度

選挙区の区割りは，人口格差を小さくすることだけでなく，地域の歴史的つながり，道路や鉄道によるつながりなどが考慮される．ここでは，人口格差に対する適応度，地域同士の関係に対する評価量の重み付き

和を個体の適応度と考えるものとする．

3.4.1 人口格差に対する評価

人口格差に対する適応度は，人口が最大の選挙区と人口が最小の選挙区の人口比を考える．

$$f_1 = \frac{\min_{j\in[1,K]} Q_j}{\max_{j\in[1,K]} Q_j} \tag{1}$$

ただし，

$$Q_j = \sum_{i\in S_j} P_i$$

である．

また，ここで，f_1，K，$j(=1,2,,K)$，$S_j = \{i|X_i = j\}$，および P_i は，それぞれ，人口格差に対する適応度，選挙区数 (都道府県に割り当てられた議員定数)，選挙区番号，選挙区 j に属する行政区画の集合，および遺伝子座 i における行政区画の人口である．f_1 が小さいほど人口格差が大きいということになり，1 票の格差も大きくなる．f_1 の最大値は 1 である．

3.4.2 地域同士の関係に対する評価

地域同士の関係に対する適応度は，あらかじめ各行政区画が他のどの区画と隣接しているかを示す隣接行列を与えておくことで求められる．行列の要素を各地域同士のつながりの強さを示す数値にすることで，地域同士の関係に対する適応度を決めることができる．隣接行列はオペレータが決め，パラメータとして遺伝的アルゴリズムに組み込まれる．

$$f_2 = \frac{\alpha}{M}\sum_{j=1}^{K} R_j \tag{2}$$

ここで，f_2，R_j，M は，それぞれ，地域同士の関係に対する適応度，隣接行列における選挙区 j に属する行政区画同士の関係値の和であり，M はすべての行政区画の関係値の和である．また，α は f_2 の最大値が 1 に近くなるように適当に選ぶ正の実数である．

3.4.3 個体の適応度

個体の適応度は，人口格差に対する適応度 f_1 と地域同士の関係に対する適応度 f_2 の重み付き和

$$f = \frac{w_1 f_1 + w_2 f_2}{w_1 + w_2} - penalty * S \tag{3}$$

で与えられる．

ここで，$penalty$ は行政区画を一つも持たない選挙区がある場合の罰則，S は罰則に当てはまる選挙区数である．w_1，w_2 を操作することにより人口格差と地域同士の関係の 2 つの要素の重要度の比率を変えることができ，また，行政区画を一つも持たない選挙区が存在している場合は，適応度を下げることができる．

3.5 制約条件

選挙区の区割りは，原則として飛び地を作らないように作成されている．そこで，飛び地数を制約条件として考える．ここでは，4 を満たさない遺伝子は致死遺伝子とし，致死遺伝子を生み出さないように進化させる．つまり，致死遺伝子を生み出した場合はその遺伝子を壊し，再構築する．

$$k < n\,,\, n = \begin{cases} \dfrac{L}{\beta_1} - \dfrac{N}{\beta_2} & \text{if } \dfrac{M}{\beta_1} - \dfrac{N}{\beta_2} \geq 1 \\ 1 & \text{if } \dfrac{L}{\beta_1} - \dfrac{N}{\beta 2} < 1 \end{cases} \tag{4}$$

ただし，n は，小数点以下を切り捨て，整数とする．ここで k，L，N は，それぞれ，固体の飛び地の数，行政区画数 (遺伝視座の数)，その時点での世代数である．また，β_1，β_2 は適当に決める正の整数である．なお，飛び地の数 k は，隣接行列をもとに計算することができる．

3.6 選択

親の選択はトーナメント選択を用いる．トーナメント選択に置けるエントリー数は任意に決定できるようにした．また，エリート保存選択も併せて用いるものとする．

4 シミュレーション

提案手法を用いて，大阪府の人口などのデータに基づいて，小選挙区の区割りを実際に作成した．また，行政的なつながりを数値化した行列と，交通機関のつながりを数値化した行列を用意し，それらをファジィ推論を用いて隣接行列を作成した．遺伝的アルゴリズムの設定は，個体数 100，交叉確率 0.5，および突然変異確率 0.1 とし，トーナメント選択に置けるエントリー数は 5 とした．また，評価関数のパラメータは，それぞれ $\alpha = 1.25$，$\beta_1 = 2$，$\beta_2 = 5$，$penalty = 1$，$w_1 = 2$，$w_2 = 1$ とした．このとき，1000 世代の世代交代を行っ

たときの，各世代の適応度の平均と最良個体の適応度を図 4 に示す．また，比較のため現在の選挙区を図 5 に示し，提案手法によって作成された選挙区を図 6 に示す．シミュレーションでは，1000 世代の世代交代で

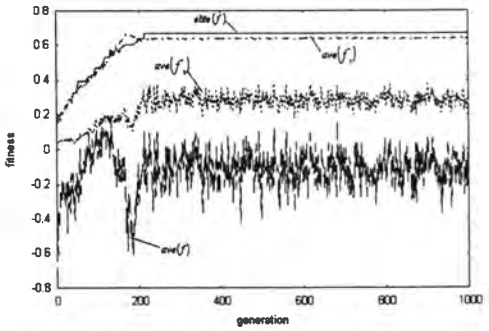


図 4: 適応度の平均と最良個体の適応度

図 5: 実際の選挙区の区割り

図 6: 提案手法による選挙区の区割り

良好な結果が得られた．図 4 から分かるように，f は 200 世代ほどで収束している．また，人口格差の適応度は $f_1 = 0.690$ となっているので，逆数を取って人口格差は約 1.45 倍となっている．また，地域の結びつきに対する適応度は $f_2 = 0.648$ である．現在の大阪府の区割りでは，人口の格差は約 1.46 倍であり，また，隣接行列に照らし合わせた適応度は 0.468 である．これより，提案手法により，人口格差と選挙区を構成する行政区画間の結びつきの深さの両面を考慮した選挙区割りが可能であることが示された．

制約条件について考えると，飛び地について制約条件を設けたことにより，遺伝的アルゴリズムの集団は，飛び地が少ない個体が支配的になる．飛び地を持たないという条件を満たす個体は，隣接行列から計算される f_2 も大きくなるため，格差に対応する f_1 のウエイトを大きくする方が進化を促進する結果になった．

5 結論

本研究では，小選挙区の区割りに遺伝的アルゴリズムを適用し，区割りの最適化を行った．行政区画同士の関係をテーマ毎に行列にまとめたものをいくつか作り，それらから，ファジィ推論を用いて隣接行列を求めた．テーマ毎に行列を作ることによって，行政区画同士のつながりを容易に数値化することが可能になった．また，隣接行列として地域のつながりを選挙区の区割りに組み込んで評価関数を構成することで，人口格差を小さくすると同時に地理的にまとまりのある選挙区を実現した．これにより，オペレータが行政区画に関する情報を与えるだけで，計算機により自動的に選挙区の区割りが与えられることが可能になることが示された．

人口格差はさらに改善されるべきものである．そこで，行政区画をより細かに決め，隣接行列をさらにより地域の実情にあわせて作ることで，より良い結果を得ることができると思われる．また，本論文では複数の評価に対して，重み付き和から適応度を構成したが，多目的遺伝的アルゴリズムを用いて選挙区を構成していくことが考えられる．また，提案手法は小学校の校区の設定などの施設の配置問題への拡張も可能であり，これらは研究中である．

参考文献

[1] 斎藤, 武藤：ニューラルコンピューティングによる小選挙区区割り手法 , 情報処理学会論文誌, Vol.37, No.4, pp.588–596 (1996).

[2] 畠中, 魚崎：遺伝的アルゴリズムを用いた小選挙区区割り画定法, 第 12 回インテリジェントシステムシンポジウム論文集, (2002).

[3] A. Mehrotra, E. L. Johnson and G. L. Nemhauser : An Optimiz ation Based Heuristic for Political Districting, Management Science, Vol.44, No.44, pp.1100–1113 (1998).

ナーススケジューリング問題解法のための共存型GAの探索効率の改善
An Improvement on Search Efficiency of Cooperative GA for Nurse Scheduling Problem Solving

○糸賀　健† 星野　孝総‡ 亀井　且有‡
Takeshi Itoga Yukinobu Hoshino Katsuari Kamei

立命館大学大学院理工学研究科†
Graduate School of Science and Engineering
Ritsumeikan University

立命館大学理工学部‡
Computer Science
Ritsumeikan University

Abstract Nurse Scheduling Problem (NSP) is a kind of the optimal combination problem with multiplex constraints and multiple-purpose. Since it is hard work to create the scheduling table, there is growing demand for automatic scheduling systems. Cooperative GA (CGA) was proposed as an effective solution method for problems like the above problem. However, various children are hard to be generated in order that CGA may cross by one parent pair. Moreover, One kind of coding of CGA is difficult to make a wide search under many constraints. In this paper, we propose Multi-Coding Type Cooperative GA (MCTCGA) as an effective solver for NSP. MCTCGA generates various children, by crossing of two or more parent pairs, and aims at an improvement in search efficiency by combining two kinds of coding with different search features.

1 はじめに

ナーススケジューリング問題 (Nurse Scheduling Problem : NSP) は多重制約性，多目的性を持つ組み合わせ最適化問題の一種である．人間による表の作成は困難であり，自動化へのニーズは高い．これまでに遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) を用いた解法 [1, 2] が提案されている．一般にGAでは，表を1個体とするため，適応度関数の設計が困難となることや，遺伝演算によって致死遺伝子が多数生成される問題が指摘されている [3].

これらの問題に対する有効な解法として，共存型GA (Cooperative GA : CGA) が提案された [3]. CGAでは，表の一部を1個体とし，個体集団で1つの表を表す．したがって，制約条件や評価項目を個体と集団に分割して加えることができ，適応度関数が容易に設計できる．また，CGAではコーディングを固定させることができ，一部の制約を減らし致死遺伝子を抑制できる．しかしながら，CGAでは，1つの親ペアにより交叉を行うため，多様な子が生成されにくい．また，制約条件が多い場合，一部の制約を減らすためにコーディングを固定させることは探索の幅を狭くする危険がある．このように，CGAは局所解に陥りやすい．

本研究では，これらの問題を解決するためにマルチコーディング共存型GA (Multi-Coding Type Cooperative GA : MCTCGA) を提案する．提案手法では，複数の親ペアにより交叉を行うことで，多様な子の生成を実現する．また，コーディングを固定させず，探索特性の異なる2種類のコーディングを組合わせて用いる．これにより，探索効率の向上が期待できる．

2 ナーススケジューリング問題

NSPは，1病棟における看護師1ヶ月分の勤務表を様々な制約や要求を考慮して作成する問題である．表は看護師数 M，日数 N とすると，$N \times M$ の2次元配列で表現できる．一般的な勤務形態は日勤，準夜勤，深夜勤の3交替制である．また，看護師のレベルはベテラン，中堅，新人に分けられている．制約条件や評価項目は性質によりいくつかに分類することができる．

個人に関する制約

1. 「休休深」「準日休」などの勤務パターンは禁止
2. 6日間連続勤務禁止
3. 休みは土，日，祝日の数だけ割振る
4. 夜勤は1ヶ月に8回以下
5. 日勤リーダーはベテラン看護師から選ぶ

1日に関する制約

1. 必要勤務者数の確保
2. 看護の質の維持

評価項目

1. 「日深準」「休休日」などの優先パターンを増やす
2. 休みはできるだけ連休にする
3. 夜勤数を均等にする
4. 看護師の勤務負荷を均等にする
5. 希望休暇はできるだけ満たす
6. 夜勤は1週間に2回以内に抑える

これらの制約を満たした表の作成はきわめて困難であり，また，最適解を得るためにすべての組合せを考える事は，計算機の性能を考慮すると事実上不可能である．したがって，最適解よりもむしろ準最適解を効率的に求める探索アルゴリズムが必要とされている．

3　共存型 GA の NSP への適用

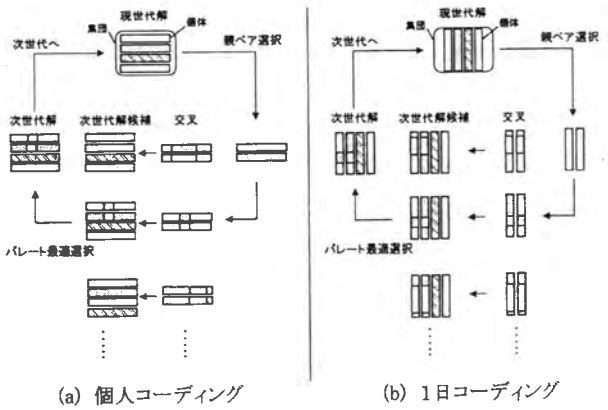
3.1　共存型 GA による解法

NSP は制約条件と評価項目が多くこれらを全て同時に処理すると問題が複雑になる．しかしながら，NSP の制約条件と評価項目は夜勤に関するものと休日・日勤に関するものとにほぼ分離できる．一般に，CGA では，問題を 2 段階に分割してスケジューリングを行っている [3]．すなわち，第 1 段階では深夜勤と準夜勤のスケジュールだけを決定する．そして第 1 段階の決定を拘束条件として固定して，第 2 段階では休日・日勤のスケジュールを決定する．

まず，第 1 段階では，全体のスケジュールを 1 集団に，個人のスケジュールを 1 個体に対応させてコーディングする．これを，個人コーディングと呼ぶ．この場合，制約条件や評価項目を個体と集団に分割して加えることができ，適応度関数が容易に設計できる．図 1-(a) に個人コーディングを用いた CGA の世代交代モデルを示す．まず，初期集団の生成を行い，次に各個体について適応度を評価する．適応度の評価は，個人コーディングでは，個人のスケジュールの目的に対して適切な適応度関数を設定し，評価する．次に，交叉に使用される親ペアの選択・交叉を行う．CGA では，交叉に使用される親ペアは 1 世代において 1 ペアとし，交叉個所をランダムに変えることで，複数の子ペアを生成する．生成された子ペアを親ペアと置き換え次世代解候補を生成し，現世代解と次世代解候補の中から集団の評価によるパレート最適選択を用いて次世代解を選択する．また，突然変異は行わない．これにより，1 日の必要夜勤者数の制約を満たすスケジュールを生成できる．

次に，第 2 段階では，全体のスケジュールを 1 集団に，1 日のスケジュールを 1 個体に対応させてコーディングする．これを，1 日コーディングと呼ぶ．図 1-(b) に 1 日コーディングを用いた CGA の世代交代モデルを示す．ここで，第 2 段階では 1 日コーディングに固定させる．これにより，個人に関する休みの数の制約を満たすスケジュールを生成できる．

しかし，他の制約については考慮されておらず，制約条件が多い場合，各段階で 1 種類のコーディングに固定させることは探索の幅を狭くする危険がある．このように，CGA は局所解に陥りやすい．



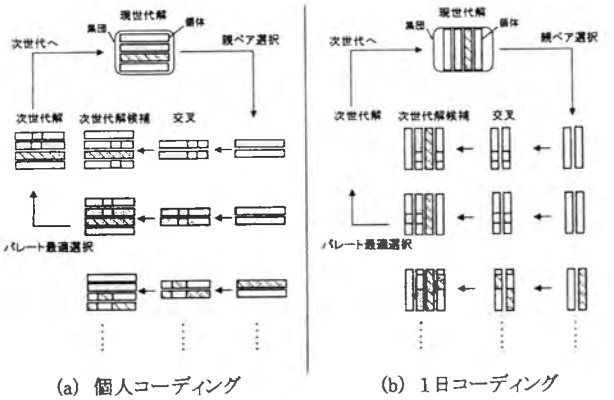
(a) 個人コーディング　　(b) 1日コーディング

図 1　CGA の世代交代モデル

3.2　マルチコーディング共存型 GA の提案

本研究では，前節で述べた問題に対する有効な解法としてマルチコーディング共存型 GA（Multi-Coding Type Cooperative GA : MCTCGA）を提案する．図 2 に提案手法の世代交代モデルを示す．提案手法では，一世代において，1 ペアの親を選択し交叉箇所をランダムに決め，1 ペアの子を生成する．そして親ペアの選択を複数回行うことで複数の子ペアを生成する．これにより，提案手法では，多様な子を生成することができるため，探索空間の拡大，探索効率の向上が期待できる．

また，提案手法では，各段階とも 1 種類のコーディングに固定させず，個人コーディングと 1 日コーディングを組合わせたコーディング法を用いる．以下，これをマルチコーディングと呼ぶ．マルチコーディングでは図 2 に示すように，1 世代ごとにどちらのコーディングを用いて遺伝演算を行うかを自由に設定できる．したがって，探索に新たな自由度が生まれるため，探索効率の向上が期待できる．また，個人コーディングでは個人に関する評価項目を，1 日コーディングでは 1 日に関する評価項目を中心に探索が進むと考えられる．このことから，目的や状況に応じてコーディングを切替えるような手法が考えられる．そこで今回は，1 世代ごとにコーディングを切替える方法を試みる．



(a) 個人コーディング　　(b) 1日コーディング

図 2　提案手法の世代交代モデル

4　数値実験

提案手法の有効性を検証するため比較実験を行った．作成する表は看護師数 M=16 人，N=日数 31 日とする．今回は，制約条件の多い第 2 段階で比較を行う．そのため，夜勤のスケジュールはあらかじめ割振られており，夜勤に関する制約および評価項目はすでに満たされているものとする．第 2 段階における目的を以下に示す．

個人に関する目的

1. 休みは土，日，祝日の数だけ割振る
2. 6 日間連続勤務禁止
3. 勤務パターンによる負荷の軽減

1 日に関する目的

1. 必要日勤者数の確保（平日 7〜9 人，土日 6 人）
2. 日勤看護の質の維持（平日 40 以上，土日 30 以上）

全体に関する目的

1. 個人の勤務負荷の最小化
2. 個人の勤務負荷の均等化
3. 1日の勤務負荷の最小化

ここで，勤務パターンによる負荷の軽減とは，表1に示すように，できるだけ勤務負荷の少ないパターンを増やすことを目的とする．また，日勤看護の質の維持とは，日勤をする看護師のレベルの合計が最低日勤看護レベル（平日40以上，土日30以上）を満たすことを目的とする．看護師16人のレベルは表2に示すように1〜10の10段階で評価する．

表1　勤務パターンの評価値の例

パターン	評価値	例
最優先パターン	0点	「日深準」「準休休」など
優先パターン	1点	「準休日」「休日深」など
妥協パターン	3点	「日準準」「休準準」など
禁止パターン	7点	「休休深」「準日休」など

表2　看護師16人のレベル

Nurse	1	2	3	4	5	6	7	8
Level	9	9	8	8	7	7	6	6
Nurse	9	10	11	12	13	14	15	16
Level	5	5	5	4	3	3	2	1

先に述べた項目を用いて，個体を評価する．個人コーディング，1日コーディングそれぞれの場合の適応度関数を式(1)，式(2)に示す．

$$Penalty1_i = |F_1 - F_{2i}| + \alpha \cdot F_{3i} + \beta \cdot F_{4i} \quad (1)$$

$$Penalty2_j = G_{1j} + \gamma \cdot G_{2j} \quad (2)$$

ただし，

F_1 ：1ヶ月の土，日，祝日の数
F_{2i} ：看護師iの1ヶ月の休日の数
F_{3i} ：看護師iの6日間連続勤務の回数
F_{4i} ：看護師iの勤務パターンに対する評価（表1）
G_{1j} ：j日の必要日勤者数の過剰あるいは不足人数
G_{2j} ：j日の日勤看護の質に対する評価

ここで，α，β，γは重み係数であり[0,1]の値をとる．$Penalty1_i$は看護師iの勤務負荷，$Penalty2_j$はj日の勤務負荷に対する評価値であり，値が低いほど勤務負荷が少ないことを示している．

また，看護師iの勤務パターンに対する評価（F_{4i}）は式(3)で求める．

$$F_{4i} = \sum_{j=1}^{N} d_{ij} \quad (3)$$

ここで，d_{ij}は看護師iにおけるj日の勤務の評価値を表し，評価は当日と前日，前々日の3日間の勤務パターンで評価する．勤務パターンの評価は表1に示すように，全勤務パターンを勤務負荷の度合いで4種類に分けて評価する．

また，j日の日勤看護の質に対する評価（G_{2j}）は式(4)で求める．

$$G_{2j} = \begin{cases} S_j - \sum_k e_{jk} & (S_j > \sum_k e_{jk}) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (4)$$

ここで，e_{jk}はj日における日勤をするk人目の看護師のレベルを表し，S_jはj日の最低日勤看護レベルを表す．看護師16人のレベルを表2に示す．

集団の評価は，個人の勤務負荷の最小化と均等化，そして1日の勤務負荷の最小化の3種類がある．それぞれ個人の勤務負荷の平均値と標準偏差，1日の勤務負荷の総和を評価値とし，式(5)〜(7)で求める．これらの評価値の最小化が集団の目的となる．集団の評価はパレート最適選択を用いるため，3目的から形成されるパレート最適集合の中から次世代解を1つ選択する．

$$Average = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} Penalty1_i \quad (5)$$

$$Deviation = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}(Penalty1_i - Average)^2} \quad (6)$$

$$Rank = \sum_{j=1}^{N} Penalty2_j \quad (7)$$

5　実験結果と考察

実験を行う際のパラメータについて述べる．遺伝演算として，選択は，親ペアのうち一方をルーレット選択，もう一方を，ランダム選択で行う．交叉は2点交叉，交叉数300，世代数は1万世代とした．これら選択，交叉法および個体の適応度関数の重みは試行錯誤的に決定した．また，規定世代数終了後に得られる解は，各世代で選ばれる次世代解の中で最適解までの距離が最小のものとする．今回の問題で最適解が存在するかは，わからないため，集団の評価値が全て理想値0を最適解とした．よって次世代解と最適解までの距離は式(8)で求める．

$$distance = \sqrt{Average^2 + Deviation^2 + Rank^2} \quad (8)$$

以上のような設定で，提案手法の有効性を検証するため比較実験を行った．以下に示す結果は，10試行の平均値とする．

まず，複数の親ペアから子を生成する有効性について検証する．比較はCGA，提案手法ともに1日コーディングで固定して比較を行う．実験結果を以下に示す．探索過程で得られた最良解と最適解までの距離の推移を図3に示す．提案手法は，実行可能解へ収束しており，精度の良い解が得られている．また，探索過程で得られた解候補数の推移を図4に示す．従来法は終了世代まで解候補数にほとんど変化がないが，提案手法は収束するまではCGAに比べ解候補数が多く，より幅広い探索空間を探索していることがわかる．

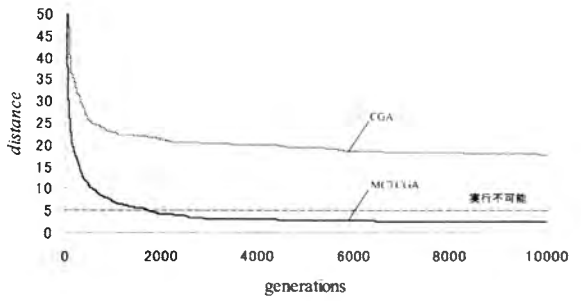


図 3　CGA と MCTCGA の探索結果

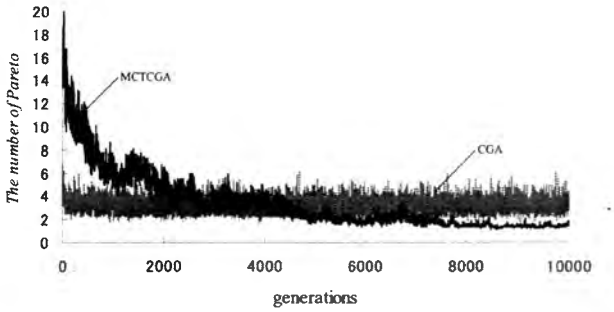


図 4　解候補数の推移比較

次に，マルチコーディングを用いた探索の有効性について検証する．比較は，提案手法において図 2 に示すように個人コーディング，1 日コーディングにそれぞれ固定した場合とマルチコーディングを比較した．実験結果を以下に示す．探索過程で得られた最良解と最適解までの距離の推移を図 5 に示す．全て実行可能解へ収束しているが，マルチコーディングが他の 2 つのコーディングに比べより精度の良い解が得られている．また，それぞれのコーディングでの探索挙動を図 6〜図 8 に示す．個人コーディングでは，*Deviation* の変化が 1 日コーディングに比べ大きく，1 日コーディングでは，*Rank* の変化が個人コーディングに比べ大きく，それぞれ特徴の異なった探索をしていることがわかる．マルチコーディングでは，*Deviation* と *Rank* ともに変化が大きく，2 つのコーディングの特徴を合わせもった探索となっていることがわかる．

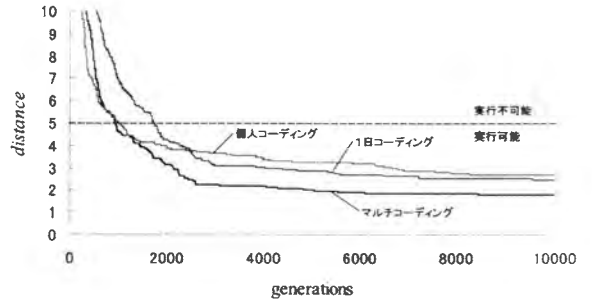


図 5　コーディング別の探索結果

6　おわりに

本研究では，マルチコーディング共存型 GA を提案した．提案手法では，複数の親ペアにより交叉を行うことで，多様な子の生成を可能とした．また，探索特性の異なる 2 種類のコーディングを組合わせるコーディング法を提案した．比較実験では，CGA に比べ探索効率および解精度の向上，探索空間の拡大が見られた．また，今回は，1 世代ごとにコーディングを交互に切替える方法を試みた．その結果，解の精度が向上した．これは形質遺伝性から考えると，形質が破壊されやすいと考えられる．しかし，解の精度は向上しており，ここで矛盾が生じる．よって，解精度の向上には他のことが関係していると考えられる．今後の課題として，形質遺伝と解精度の関係について検証していかなければならない．また，最適な切替え法について検討したい．

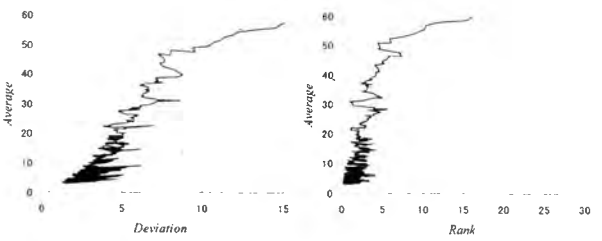


図 6　個人コーディングの探索挙動

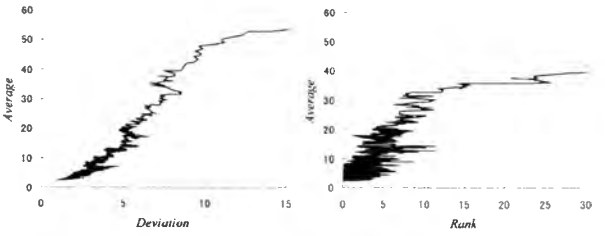


図 7　1 日コーディングの探索挙動

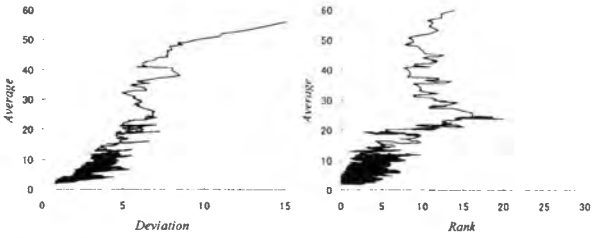


図 8　マルチコーディングの探索挙動

参考文献

[1] 大谷，長谷山，北島：ナーススケジューリング問題の GA による解法に関する考察，信学技報，ITS2001-72，IE2001-211 (2002)

[2] 長野，宮崎：勤務に対する嗜好の個人差を考慮した看護婦スケジューリング，日本経営工学会論文誌，Vol.47，No.3 pp.143–149 (1996)

[3] 山村雅幸，小林重信 他：「遺伝的アルゴリズムによるナーススケジューリング」，北野宏明著．遺伝的アルゴリズム 2，pp.89–125，産業図書 (1995)

[連絡先]
住所　：　〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1
立命館大学理工学部情報学科亀井研究室
Tel/Fax　：　077-561-2807
e-mail　：　itoga@spice.cs.ritsumei.ac.jp

複数の交叉演算による遺伝的アルゴリズムの改良(その2)

Improvement of Genetic Algorithm by Several Crossover Operations (2)

馬野 元秀 Motohide Umano　増井 敏克 Toshikatsu Masui　宇野 裕之 Yushi Uno　瀬田 和久 Kazuhisa Seta　岡田 真 Makoto Okada

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
Department of Mathematics and Information Sciences
College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

Abstract Genetic algorithm is an algorithm that imitates the evolution and one of techniques for the probability-based learning and optimization. In this paper we propose a genetic algorithm with several crossover operations, where we select from several crossover operations the most appropriate one by fuzzy rules with the change of the fitness value. We apply the method to the optimization problem of functions and compare the times of finding the maximum value.

1. はじめに

遺伝的アルゴリズム (GA: genetic algorithm) は，生物の進化を模倣したアルゴリズムであり，確率的な探索手法の一つである [1].

GA では個体集団を変化させる交叉演算が解探索を行う中心的な役割を担う．しかし，交叉演算には様々なものがあり，局面によって最適なものを選ぶことでより効果を発揮できると考えられる．

以前，我々は文献 [2] で定義した破壊度の定義を文献 [3] で改良し，世代を利用したファジィルールを用いて交叉演算を選んだ．しかし，世代によって作成したルールのパラメータの設定が難しかった．

そこで，世代を用いない交叉演算の選び方について検討し，関数最適化問題に適用して比較を行う．

2. 交叉演算による比較

2.1 単一の交叉演算

基本的な交叉演算として，一点交叉，二点交叉，一様交叉がある．一点交叉，二点交叉はランダムに交叉点を設定し，親の個体の一部を入れ換える (図1，図2).

一様交叉は $\{0,1\}$ をランダムに発生させて親の遺伝子分の長さのマスクを作る．このマスクに従って，マスクが 0 のときは遺伝子はそのままで，1 のときは遺伝子を交換して，子 1 と子 2 を生成する．マスクの 1 を生成する割合により，入れ替えの割合を調整できる (図3)．ここでは，1 を生成する割合が 0.3 と 0.5 のものを，それぞれ一様交叉 (0.3) と一様交叉 (0.5) と表記する．

親 1	10011|0101	$\Longrightarrow$	子 1	10011|1001
親 2	01110|1001		子 2	01110|0101

図 1: 一点交叉

親 1	100|11|0101	$\Longrightarrow$	子 1	100|10|0101
親 2	011|10|1001		子 2	011|11|1001

図 2: 二点交叉

マスク	010001100			
親 1	100110101	$\Longrightarrow$	子 1	110111001
親 2	011101001		子 2	001100101

図 3: 一様交叉

実験には次の 3 つの関数を用い，最大値とそのときの x または (x_1, x_2) を求める．

$$f_1(x) = 5\exp\left(\frac{-|x-10|}{10}\right)\cos(x-10)+5 \quad (0 \le x \le 32.767)$$

$$f_2(x) = 5\cos(x-15)\cos(0.418(x-15))+5 \quad (0 \le x \le 32.767)$$

$$f_3(x_1,x_2) = \frac{-(x_1-5)^2+10\cos(x_2-5)+40}{5} \quad (0 \le x_i \le 10.23)$$

遺伝子は 2 進数によるコード化を用い，それぞれ，15 ビット，15 ビット，20 ビット (10 ビット

表 1: 単一の交叉演算

交叉方法	f_1	f_2	f_3
一点交叉	2816 回 33.07 世代 734 回	3852 回 43.17 世代 1808 回	1110 回 56.34 世代 0 回
二点交叉	2914 回 31.74 世代 574 回	4238 回 41.21 世代 1559 回	1151 回 55.08 世代 0 回
一様交叉 (0.3)	2940 回 32.22 世代 321 回	4459 回 42.55 世代 1080 回	1242 回 56.31 世代 0 回
一様交叉 (0.5)	3166 回 30.81 世代 249 回	4846 回 40.99 世代 926 回	1279 回 55.03 世代 0 回

×2) で表現し，交叉率を 0.8，突然変異率を 0.01，個体数を 21（うち 1 つをエリート保存用）とした．100 世代分の実行を 1 試行とし，10000 回試行を行う．以前，我々は 1000 回の試行を行っていた [3] が，比較の精度を上げるために今回は 10000 回に変更している．

それぞれの交叉演算に対して 3 つの関数で実験を行った結果を表 1 に示す．上段が最適値を見つけ出すことができた回数，中段が最適値を見つけた場合の世代の平均値，下段が局所解に陥ってしまった回数である．局所解に陥ったかどうかの判定は，各グラフの中で最適値のある山に到達できなかったことにより行った．

単一の交叉演算の結果を比較すると，収束する世代や収束回数に差があることがわかる．そこで，複数の交叉演算を組み合わせることで，収束を早めたり，最適値を求める回数を増やすことができると考えられる [2]．

2.2 ランダムな組み合わせ

まず，複数の交叉演算をランダムに組み合わせることを考える．交叉を行う際に，各個体のペアに対してランダムに (等確率で) 交叉演算を選択した．結果は表 2 のようになった．

単純に組み合わせるだけでは，単一の交叉演算を行った結果のほぼ中間の値になっていることが分かる．

2.3 新しい演算の導入

(1) 局所探索

以前，我々は「2 ビット変異」という演算を追加した [3]．これは，親の遺伝子の下位 2 ビットのすべての組み合わせの中でもっとも適応度の高いものを選択し，新しい子とする方法である (図 4)．

表 2: ランダムな組み合わせによる交叉演算

交叉方法	f_1	f_2	f_3
一点交叉 + 二点交叉	2882 回 32.39 世代 694 回	3991 回 42.23 世代 1659 回	1101 回 56.18 世代 0 回
一点交叉 + 一様交叉 (0.5)	3092 回 31.11 世代 385 回	4498 回 41.53 世代 1159 回	1215 回 55.19 世代 0 回
一様交叉 (0.3) + 一様交叉 (0.5)	3105 回 31.07 世代 270 回	4530 回 42.12 世代 1066 回	1272 回 54.62 世代 0 回

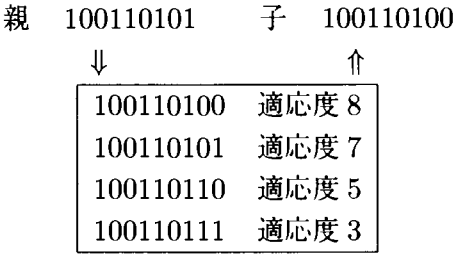


図 4: 2 ビット変異

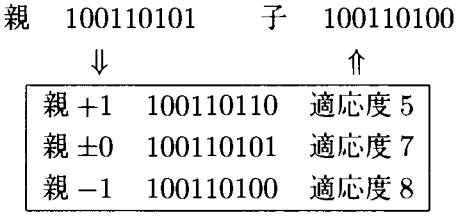


図 5: 近傍

この方法は，何世代繰り返しても同じ範囲を探索しているだけで効果が小さい．そこで，今回新しく「近傍」という演算を導入する．これは，親の個体の x を ±1 した個体と親自身の個体の中で適応度の最も高い個体を子とする演算である (図 5)．

(2) ローテーション

さらに，幅広い探索を行うために「ローテーション」を導入する．これは親の個体の x を 1 ビットずつ左にシフトし，図 6 のように最上位ビットをもう一方の親の最下位ビットに追加する演算である．

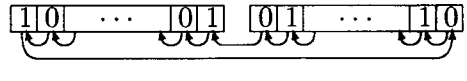


図 6: ローテーション

表 3: 単一の交叉演算

交叉方法	f_1	f_2	f_3
ローテーション	814 回 53.73 世代 0 回	615 回 52.75 世代 0 回	91 回 62.96 世代 0 回

ローテーションを単一の交叉演算として実験を行った結果は表 3 の通りである．この結果，局所解には陥らないが，収束しにくいことが分かる．

2.4 破壊度

それぞれの交叉演算が各個体をどの程度変化させるかの指標として破壊度を導入した [2][3]．2 つの親 P_1，P_2 に交叉演算を行って生成される 2 つの子を C_1，C_2 とする．そして，変化量 D を次の式で求める．

$$D = (|P_1 - C_1| + |P_2 - C_2|) \wedge (|P_1 - C_2| + |P_2 - C_1|)$$

この式は 2 つの親と子の片方ずつを組み合わせた親と子の距離の小さい方を変化量としていることを表している．

この平均値を正規化した値を破壊度とする．親をランダムに生成し，D を計算するのを 10000 回繰り返した結果，破壊度は表 4, 表 5 のようになった．これにより，近傍と 2 ビット変異は変化が小さく，一様交叉やローテーションは変化が大きいことが分かる．これを用いることで複数の交叉演算を用いるときに状況に従って破壊度を基にして交叉演算を選択することができる．なお，破壊度は遺伝子のコーディングの方法にのみ依存することになる．

表 4: 破壊度 (ローテーション無し)

交叉方法	1 変数	2 変数
交叉なし	0.00000	0.00000
近傍	0.00041	0.00486
2 ビット変異	0.00062	0.01278
一点交叉	0.23324	0.34217
二点交叉	0.28715	0.39631
一様交叉 (0.3)	0.78266	0.84572
一様交叉 (0.5)	1.00000	1.00000

表 5: 破壊度 (ローテーションあり)

交叉方法	1 変数	2 変数
交叉なし	0.00000	0.00000
近傍	0.00014	0.00204
2 ビット変異	0.00021	0.00537
一点交叉	0.07814	0.14370
二点交叉	0.09620	0.16643
一様交叉 (0.3)	0.26221	0.35516
一様交叉 (0.5)	0.33503	0.41995
ローテーション	1.00000	1.00000

3. ルールの変更

以前のルールは世代を利用して，序盤では破壊度の大きな演算，終盤では破壊度の小さい演算を用いていた．一応の結果は得られたが，序盤・終盤の定義により結果が大きく変化してしまう．そこで，今回は世代を用いないルールによって交叉演算を選択することを考える．

(1) 各個体の適応度によるルール

まず，各個体の適応度を利用して交叉演算を選択する方法を考える．直感的には適応度の高い個体はあまり変化させず (速く収束させる)，適応度の低い個体を大きく変化させる (幅広く探索し，局所解に入らないようにする) 方法が考えられる．そこで，20 個体のうち，適応度の高いものから 4 つずつ (個体の数÷交叉演算の数) に対して破壊度の小さい演算を順に割り当てる．この方法を「各個体毎」と表記する．

(2) 適応度の変化量によるルール

世代を用いないもう一つの方法として，前世代からの適応度の変化量を利用する．すなわち，交叉演算によってどのくらい適応度が変化したかで判断する．

変化量が大きいときはまだ収束しておらず，変化量が小さくなると収束してきたと考えられる．そこで，変化量が小さいときには破壊度の小さい演算を用い，変化量が大きいときには破壊度の大きい演算を用いればよい．ここで，変化量には各世代における適応度の最大値の変化量を利用する．そして，それ以前の世代までの変化量の最大値を 1 として 0〜1 に正規化した値と定義し，破壊度がこの値に最も近い交叉演算を使用する．この方法を「単純」と表記する．

以上の実験を行った結果は表 6 のようになった．

ここでは，一点交叉+二点交叉+一様交叉 (0.3)+一様交叉 (0.5) を「4つの交叉1」，一点交叉+二点交叉+一様交叉 (0.5)+ローテーションを「4つの交叉2」と表記している．

大きく良くなっているわけではないが，「各個体毎」は総合的に性能が向上している．また，f_3 のような関数で近傍を用いた際，「単純」は速く多くの解を見つけることができていることが分かる．近傍は破壊度は非常に小さいが，収束に対して大きく貢献しており，ローテーションも他の演算と組み合わせることで効果があることが分かる．

4. おわりに

本論文では，交叉演算による遺伝子の破壊度を利用し，各世代における適応度の変化量を用いたルールにより交叉演算を選択する方法について述べた．適応度の変化量を利用することで世代による序盤・終盤の定義が不要になった．

また，近傍とローテーションの導入により，より速くより幅広い探索を行うことができ，結果として従来の方法よりも探索能力を向上することができた．

今後は，より良いルールに改良していくことと，このような方法が他の問題にも適用できるかどうかについて検討していきたい．

参考文献

[1] J.H. Holland : Adaptation in Natural and Artificial Systems, The University of Michigan Press (1975)

[2] 馬野 元秀, 神澤 武史, 宇野 裕之：複数の交叉演算子を用いた遺伝的アルゴリズムについて, 第28回知能システムシンポジウム講演論文集, pp273-278 (2001)

[3] 馬野 元秀, 吉里 友広, 増井 敏克, 宇野 裕之, 瀬田 和久, 岡田 真：複数の交叉演算を用いた遺伝的アルゴリズムの改良, 第18回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp299-302 (2002)

[問い合わせ先]
〒599-8531 堺市学園町 1 - 1
大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
馬野 元秀
TEL: 072-254-9675
FAX: 072-254-9930
E-mail: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

表 6: 適応度のルールによる交叉演算

交叉方法	f_1	f_2	f_3
4つの交叉1 (ランダム)	2983回 30.80世代 385回	4357回 41.89世代 1323回	1228回 54.61世代 0回
4つの交叉1 (各個体毎)	3001回 30.57世代 375回	4448回 41.46世代 1200回	1225回 55.12世代 0回
4つの交叉1 (単純)	2947回 32.08世代 399回	4219回 42.26世代 1245回	1158回 56.76世代 0回
2ビット変異 +4つの交叉1 (ランダム)	3378回 29.81世代 485回	5401回 41.59世代 1391回	2514回 49.44世代 0回
2ビット変異 +4つの交叉1 (各個体毎)	3415回 29.52世代 449回	5507回 41.66世代 1410回	2559回 49.68世代 0回
2ビット変異 +4つの交叉1 (単純)	3021回 36.31世代 563回	4038回 46.84世代 1490回	2195回 54.66世代 0回
近傍 +4つの交叉1 (ランダム)	9565回 32.24世代 227回	8606回 29.91世代 799回	9871回 47.89世代 0回
近傍 +4つの交叉1 (各個体毎)	9603回 32.08世代 277回	8600回 29.98世代 1315回	9905回 47.19世代 0回
近傍 +4つの交叉1 (単純)	9350回 33.04世代 470回	8541回 31.84世代 1342回	10000回 34.61世代 0回
4つの交叉2 (ランダム)	5482回 34.17世代 8回	7066回 40.06世代 2回	2121回 53.44世代 0回
4つの交叉2 (各個体毎)	5854回 36.07世代 1回	7238回 40.69世代 1回	2173回 53.89世代 0回
4つの交叉2 (単純)	3468回 30.46世代 140回	5018回 40.17世代 360回	1206回 53.67世代 0回
2ビット変異 +4つの交叉2 (ランダム)	4872回 33.60世代 32回	7132回 41.38世代 5回	2510回 48.35世代 0回
2ビット変異 +4つの交叉2 (各個体毎)	4788回 32.53世代 30回	7115回 41.04世代 5回	2604回 48.00世代 0回
2ビット変異 +4つの交叉2 (単純)	3237回 38.53世代 255回	4431回 50.68世代 551回	2155回 56.81世代 0回
近傍 +4つの交叉2 (ランダム)	9925回 30.72世代 30回	9995回 29.15世代 0回	9826回 48.92世代 0回
近傍 +4つの交叉2 (各個体毎)	9920回 30.15世代 37回	9993回 28.72世代 0回	9869回 48.00世代 0回
近傍 +4つの交叉2 (単純)	9709回 35.17世代 184回	9529回 35.58世代 415回	9995回 39.19世代 0回

分散型発電装置の電力系統への遺伝的アルゴリズムによる最適化配置

Genetic Algorithm Optimization of Dispersed Generator Arrangement in Electric Power System

岡本　宏・西守　克己・西村　亮・石原　永伯
Hiroshi OKAMOTO,Katsumi NISHIMORI,Ryo NISHIMURA,Naganori ISHIHARA

高田　輝和*・徳永　幸実*
Terukazu TAKATA*, Yukimi TOKUNAGA

鳥取大学
Tottori University

*中国電力株式会社
*Chugoku Electric Power Co.,Inc.

Abstract: Dispersed generators (DG) such as fuel cells and solar cells etc. are going to be installed in electric power system. Dispersed facilities can become maintaining and raising power quality, cost performance of power supply, and reduction of the environment pollution by the appropriate arrangement. This report discusses how much the power loss can be reduced if DGs are optimally located at the distributed node of the power system. A solution method using genetic algorithm is proposed to determine the optimal arrangement and power size of DG for minimizing the power loss. The proposed method has been applied to simulate the actual power system and compared with all search method to evaluate their performance.

1. はじめに

経済成長とエネルギー需給安定、および環境保全は密接な関係にある。電力業界においても、経済、エネルギー、環境のバランスをとりながら発展することが望まれる。わが国は、火力・原子力・水力を中心とした大規模電力系統とすることで、信頼性確保および経済性の追及を目指してきた。近年、その電力系統に分散型電源（Distributed Generator：DG）が導入されつつある。この背景には、大規模電力系統におけるエネルギー効率の向上が、多年にわたる努力の結果限界に近づいていること、DG は環境負荷の少ないエネルギー源として期待できることなどがある。

本研究では、DG の導入により電力損失が減少するという点に着目し、中小規模電力系統において系統の電力損失を最小とするよう、DG 配置の最適化を図ることを目的とした。DG の最適配置パターンは、遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm：GA）を用いた手法により求めた。さらに、環境税が将来導入されることを想定し、環境税がどの程度であればDG 導入の経済的メリットが発生するのかを調べた。

2. 電力系統への DG 導入問題について

2.1 DG 導入モデルの定式化 [1),2)]

まず、対象系統における DG の最適な設置場所、容量を選定するために、最適配置問題として定式化した。定式化における仮定は以下の通りである。

1) 電源は系統の負荷ノードに設置される。
2) 各ノードの許容設置台数は 1 台とする。
3) 負荷ノードの電力は既知である。
4) 設置電源は有効電力のみを供給する。

DG を設置することで発生するメリット・デメリットはいろいろあり、これらを正しく評価するためにも、目的関数の設定は重要である。本来は複数の項目を考慮したうえで設定すべきであるが、今回は電力損失のみを考慮し、最小化すべき目的関数として (1) 式のように設定した。そして、その逆数をとって評価関数 fitness とした。すなわち、本研究では (1) 式を最小化、あるいは (2) 式を最大化することで DG 配置の最適化とした。

$$Z_{LOSS} = \frac{1}{2}\left\{\sum_{i=1}^{n}\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n}\left(S_{ij}+S_{ji}\right)\right\} \qquad (1)$$

$$\text{fitness} = \frac{1}{Z_{LOSS}} \qquad (2)$$

ただし

n ：ノード数
S_{ij}：ノード i からノード j の方向の送電線潮流
S_{ji}：ノード j からノード i の方向の送電線潮流

次に、DG が無秩序に系統に導入されると、過度の電圧上昇あるいは低下が生じる可能性がある。そのため、各ノードが満たすべき制約条件として (3) 式のような上下限制約を設けた。

$$V_{min} \leqq V_i \leqq V_{max} \qquad (3)$$

ただし

V_i：ノード i の電圧
V_{max}：ノード電圧の上限値
V_{min}：ノード電圧の下限値

図1に対象系統を示す。ノード1、2は系統に電力を供給する変電所である。ノード4、5、12～15は変圧器中性点あるいは三次巻線である。本研究では、これらを除く計21ノードをDG設置可能ノードとした。ノード6、27には大口需要家のもつ自家発電設備、ノード8、9、17、24には小規模水力発電所があり、系統に電力を供給している。この系統に新たにn個のDGを設置することを考えた。適切な場所にDGを設置すると、(1) 式の値は減少し (2) 式の値は増加する。よって、(2) 式の値を最大化することでDG配置の最適化とした。対象系統の全需要電力は468MW、全電力損失は7.512MWである。

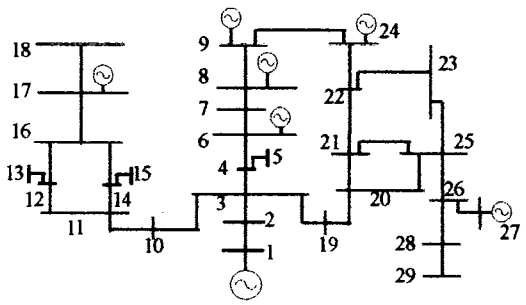


図1　対象系統

2.2　DG導入モデルへの単純GAの適用

図2に本研究で提案するGA法の処理手順を示す。以下、同図中の各項目について述べる。

<符号化>

GAを適用する場合、まず問題の変数をストリングへと符号化する必要がある。本研究では、遺伝子型を二進法によるストリングで表し、表現型をDGの配置パターンとした。DGの配置パターンは、設置位置（設置するノード）と設置容量で規定される。本研究では各ノードの許容設置台数は1台としているので、ノード番号と設置の有無でDGの配置パターンを表すことができる。よって、提案方法では、各個体の遺伝子の位置（遺伝子座）とノード番号を対応させ、その遺伝子の種類で設置の有無を表すことにした。図3に例を示す。

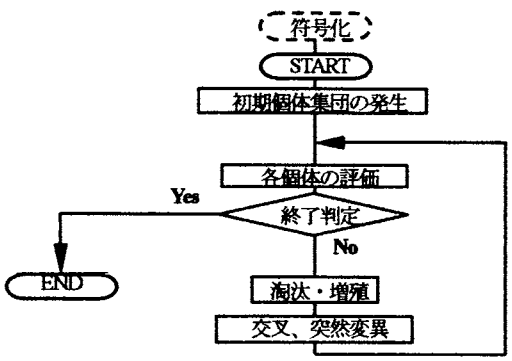


図2　GA法のフローチャート

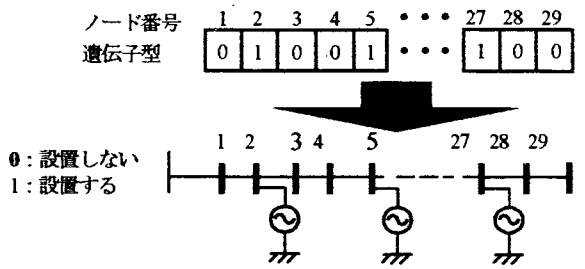


図3　符号化

<ステップ1：初期個体集団の発生>

GAによる進化シミュレーションは総数N個の初期個体集団、言い換えると総数N個の初期系統集団の発生から始まる。今回は初期個体を、乱数を用いてランダムに生成した。

<ステップ2：評価>

本研究では、生成した各個体の遺伝子型は、対象系統のどのノードにDGを設置するのかを表している。遺伝子が'1'となったノードはDGが設置されるノードであるから、これを発電電力の増加で表す。そして、発電電力変化後の系統について電力潮流計算を行い、得られるノード電圧、送電線潮流から (1) 式および (2) 式を算出した。総数N個の個体、すなわち総数N個の系統すべてについて (2) 式の評価関数を算出した。その中で最大値をとる系統をその世代の代表として記録した。

<ステップ3：終了判定>

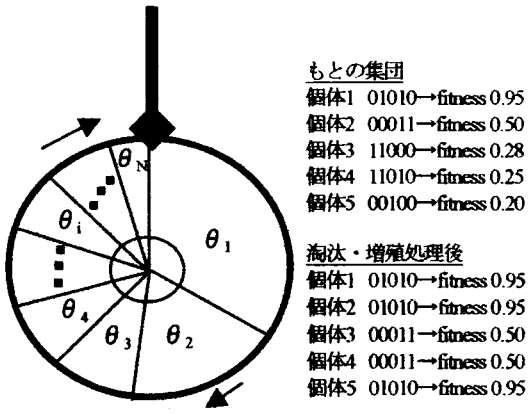
各個体の評価値を算出した後、生成された個体集団が、進化シミュレーションを終了するための判定基準を満たしているかどうかを調べる。判定基準はGAを適用する問題に依存するが、代表的なものとしては次のようなものがある。

1) 個体集団中の最大の適応度が、あるしきい値より大きくなった
2) 個体集団全体の平均適応度が、あるしきい値より大きくなった
3) 世代交代回数に対する個体集団の適応度の増加率が、あるしきい値以下の世代が一定更新回数以上続いた
4) 世代交代の回数があらかじめ定めた回数に到達した

今回は4)に基づいて終了判定を行った。

<ステップ4：淘汰・増殖>

淘汰・増殖は、算出された適応度に基づいて、次の世代に残すべく個体を選ぶ処理である。提案法ではこの淘汰・増殖を、ルーレット方式という規則に基づいて行っている。ルーレット方式とその実行例を図4に示す。



$\theta_i \propto$ fitness(i)

図4　淘汰・増殖

図4のルーレットにおいて、個体1から個体Nに対応する扇形の角度 $\theta_1 \sim \theta_N$ は、それぞれ適応度 fitness(1)から fitness (N)に比例するように作られているとする。単純GAにおける淘汰・増殖は、このようなルーレットをN回だけまわし、それぞれの回でルーレットの矢印の位置にきた個体を、重複を許して選択することに等しい。ルーレット方式では、各個体の生存確率はその適応度に比例する。このため、適応度の高い個体ほど増殖しやすく、適応度の低い個体は淘汰されやすくなっている。

＜ステップ5：交叉＞

図5に交叉の例を示す。交叉は、個体（本研究では系統）のペアを取り出し、その遺伝子型をランダムな位置で部分的に入れかえる操作である。提案方法では一点交叉と呼ばれる最も基本的な交叉を実行する。定めた交叉率に従ってペアを取り出し、あるノード以降を入れかえて新しい系統を作成する。この交叉は、大幅に異なった系統の創出に相当する。

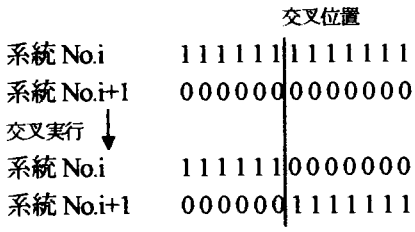


図5　交叉（一点交叉）

＜ステップ6：突然変異＞

交叉に続いて突然変異と呼ばれる操作を実行する。これはある確率（=突然変異率）で個体の遺伝子を変える操作である。図6に突然変異の例を示す。提案方法では、突然変異率に従ってi番目の系統を取り出し、さらにその中から無作為にノードを選び、ビット反転を行う。ビット反転はDG設置の有無を表すから、この突然変異はわずかに異なる系統の創出に相当する。

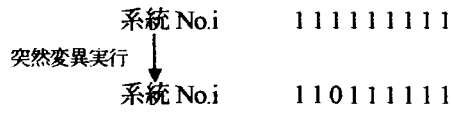


図6　突然変異

3. DG導入モデルのシミュレーション

3.1　DG導入量と電力損失の関係

図1に示す対象系統にGA法を適用し、DG導入量と電力損失の関係を調べた。最適解（最小となる電力損失）を求めるため、全探索法による計算も行った。図1中の設置可能ノードのうち、ノード8、9、10、17、24、29の近くには水源があると考え、各々に出力5MWの集約化されたマイクロ水力発電システムを導入するものとした。この時点でDGの導入量は30MWとなる。そして、残りの15ノードに20MWのDGを設置していき、電力損失がどのように変化するかを調べた。GAの遺伝パラメータについては、総個体数30、交叉率0.8、突然変異率0.05、世代交代回数50とした。

図7にシミュレーション結果を示す。DGの導入量が増加するにつれ、電力損失が減少していることがわかる。DGを90MW（5MW電源6台と20MW電源3台）導入すると、系統の電力損失をDG導入前の半分以下にまで減らすことができた。

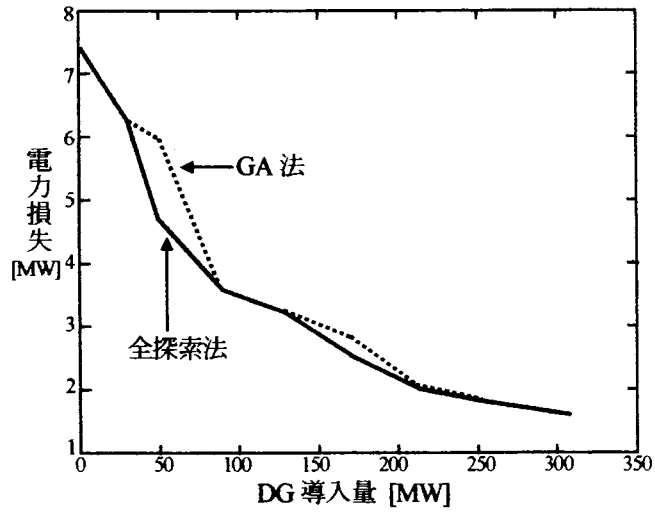


図7　DG導入量と電力損失の関係

次に、本研究で用いたGA法と全探索法の比較を行う。図7より、GA法を用いると全探索法とほぼ同じ結果が

得られると考えられる。また表1より、GA法は短時間でかなり精度のよい近似解を得ることができるといえる。よって、GAを用いる本提案手法は、DG配置問題に対して有効であることが示された。

表1　GA法と全探索法の比較

	GA法	全探索法
総個体数	1300	32768
最適解 [MW]	1.612	1.592
計算時間 [sec]	4.4044×10^{4} (約半日)	1.0617×10^{6} (約12日)

3.2　DGの配置パターンの決定

3.1の結果を参考にし、DGの導入量に上限を与え、系統の電力損失を最小とするDGの配置パターンを調べた。DG導入量の上限は90MWと150MWの二通りとした。90MWあるいは150MWの構成は、DG設置台数（あるいは電源容量）によって異なる。そこで、いくつかの構成方法を提案し、各構成方法において最適化を図った。GAの遺伝パラメータについては、総個体数30、交叉率0.7、突然変異率0.05、世代交代回数50とした。結果を表2に示す。

表2　配置パターンの決定

導入量 [MW]	90				150		
設置台数	3	6	9	15	6	10	15
DG容量 [MW]	30	15	10	6	25	15	10
電力損失 [MW]	3.08	3.13	3.61	4.39	1.80	2.34	3.06
配置パターン				6			6
		7	7	7	7	7	7
			8	8		8	8
				9			9
			10	10		10	10
	11	11	11	11	11	11	11
		16	16	16	16	16	16
	17	17	17	17	17	17	17
	18	18	18	18	18	18	18
				21			21
				22			22
			23	23		23	23
				26		26	26
				28			28
		29	29	29	29	29	29

導入量90MWの場合、電力損失の最小値は3.08MWであった。これより、全需要電力の約1/5をDGで供給すれば、電力損失は半分以下にまで減少することがわかった。また、同じ導入量でも、構成方法が異なれば電力損失の減少量も異なることがわかった。表2の場合、設置台数を少なくして1台の容量を大きくするほうが、電力損失が少なくなる。これは、対象系統の全需要電力が468MWであるので、この系統に何らかの影響を与えるためには、ある程度容量の大きな電源が必要となるためであると考える。

次に配置パターンについて検討する。導入量が90MWの場合、設置台数に関係なく、ノード11、17、18が含まれていた。これより、本研究の対象系統に限って言えば、これらのノードにDGを設置することで効果的に電力損失を減少させることができる、ということがわかった。

4. 結論

本研究では、中小規模電力系統へのDG新規導入を検討するための枠組みとして、系統の電力損失最小化を目的としたDG最適配置問題を提案した。最適配置問題を解く方法として、GAを適用した手法を利用した。

まず、対象系統におけるDG導入量と電力損失の関係を調べ、DGを導入することで電力損失が減少することを定量的に明らかにした。全探索法による解との比較を行った結果、GA法は全探索法よりも短時間で精度よく近似解を得ることができる、ということがわかった。次にDG導入量に上限を与え、その制約内で電力損失を最小とするDG配置場所を求めた。その結果、DG容量が大きいほど電力損失が小さくなった。また、より効果的に電力損失を減少させるノードを探すことができた。これらより、GAを用いた提案法は、DG最適配置問題に対して有効であると考えられる。

参考文献

[1] 安居院、長尾：ジェネティックアルゴリズム、昭晃堂、1993

[2] 佐々木、造賀、久保川：燃料電池最適配置計画問題の遺伝的アルゴリズムによる解法、電気学会論文誌B、117巻、pp1109-1114、1997

[連絡先]　〒鳥取市湖山町
鳥取大学工学部電気電子工学科
西守克己
Tel. 0857- - Fax. 0857
E-mail: nisimori@ele.tottori-u.ac.jp

GAを用いた積算電力計の指示値領域抽出

An indication-region extraction of a watt-hour meter using GA

大木　誠	相原　一貴	日高　一幸	三宅　宏典	大北　正昭	岸田　悟
Makoto Ohki	Kazutaka Aihara	Kazuyuki Hidaka	Kousuke Miyake	Masaaki Ohkita	Satoru Kishida
鳥取大学	(株) テスク	鳥取大学	鳥取大学	鳥取大学	鳥取大学
Tottori Univ.	Tesuku Corporation	Tottori Univ.	Tottori Univ.	Tottori Univ.	Tottori Univ.

Abstract: This paper illustrates a new system to read an indication of a watt-hour meter and proposes a method to efficiently extract the indication value. A person dispatched by an electric power company, a reader, makes his/her rounds of a region every one or two months and register the indication of the watt-hour meter. However, the reader, sometime, fails to read the indications. Such mistakes are usually found out after reading tasks a day. When the reader fails to read it, the reader must go to the place again. This brings about not only working cost but a waste of time. This research aims to reduce such problem.

1. はじめに

工場や大規模量販店などの大口需要家とは異なり、一般需要家には普通電力量計いわゆる積算電力計が設置されている。電力会社から派遣された作業員は定期的にこれらの積算電力計を巡回し、指示値を目視で記録することにより、電力供給量を管理している。このような作業は検針と呼ばれる。検針の誤りが判明した場合、再び当該地に赴き、指示値を読み取る必要が生じる。これは検針作業が目視により行われている限り、絶対に無くすことは出来ず、作業コストのみならず時間的コストの浪費を招いている。このような検針誤りによる作業負荷を軽減するために、本研究では積算電力計の指示値を読み取り、PCのデータ・ベースを更新するシステムに取り組んでいる。

指示値読み取りシステムは大きく、指示値領域を特定するための処理と、特定した指示値領域内の値を認識する処理に分けられる。本報告では、GA を用いた指示値領域を特定する処理、すなわち指示値領域抽出処理について述べる。

2. 積算電力計指示値読み取りシステム

本研究では作業員が定期的に担当地域を巡回し、一般需要家の積算電力計を検針することを想定する。そこで、図1に示すようなビデオ・キャプチャー・カードを装備したノート型PCおよびCCDカメラにより試験システムを構成した。本システムでは、以下のような手順で処理を行う。

(1) 作業者が操作し、CCDカメラにより積算電力計の指示値面を撮影する。
(2) 入力画像の前処理として、濃淡画像化，濃淡2値化，エッジ強度計算，エッジ強度2値化を行う。
(3) GAにより指示値領域を抽出する。
(4) 次の処理で効果的に指示値を認識するために、画像のサイズや傾きをAffine変換により補正する。
(5) 数字テンプレートとのパターン・マッチングを行い、指示値を認識する。
(6) 指示値認識の結果をPC上のデータ・ベースに反映する。このとき、明らかに異常が認められる場合、警告を発するなどの処理を行う。

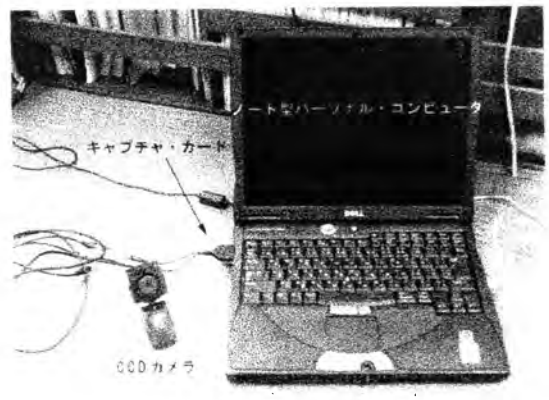


図1 試験システムの構成

3. GAによる指示値領域抽出

本研究ではGAを用いて積算電力計の指示値領域を抽出する。図2に示すように指示値領域候補の矩形領域を5個のパラメータで表現し、これらの組合せ(x_0, y_0, w, h, θ)を染色体とした。

個体群のサイズを100とし、ランキング選択により50%を選択した。世代数を3つの区間に分割し、それぞれの世代数区間ごとに異なる探索を行った。

(1) $0 \leq g < G_1$の各世代では、図3に示すように回転角のみを探索する。y_{0min}からy_{0max}までy_0を変化させ、各y_0に対する傾き$\tan\theta$の直線L_{y0}上の平均エッジ強度を求め、上位4本の直線の和を角度θの評価とした。このとき突然変異の変化幅を$\Delta_\theta \in [-\pi/4, \pi/4]$とした。最終的に得られた角度を$\theta_{det}$とした。
(2) $G_1 \leq g < G_2$の各世代では、突然変異の変化幅を$\Delta_{xc}, \Delta_{yc} \in [-10, 10]$とし、$x_c$, y_cのみを探索する。ここでは、(w,h)=(124,31), (184,46), (244,61)また角度を(1)で得た$\theta = \theta_{det}$で固定し、そのうち最良の評価結果を採用した。評価関数fは以下の8個の評価値の線形結合を用いた。

$$f=\eta_1 E_R+\eta_2 W_R+\eta_3 Q_R+\eta_4 D_R+\eta_5 G_F+\eta_6 S_F+\eta_7 P_R+\eta_8 E_F \quad (1)$$

①矩形領域内の平均エッジ強度に関する評価:E_R
②矩形領域の大きさ:W_R
③矩形領域のアスペクト比に関する評価関数:Q_R
④矩形領域内のエッジ方向の均一性:D_R
⑤矩形枠上の輝度の標準偏差に関する評価関数:G_F
⑥矩形枠上の輝度の暗さ：S_F
⑦矩形領域内の白黒画素数比に関する評価関数:P_R
⑧矩形枠の外側の平均エッジ強度:E_F

(3) $G_2 \leqq g < G$ の各世代では、突然変異の変化幅を Δ_{xc}, $\Delta_{yc} \in [-4,4]$, $\Delta_w \in [-10,25]$, $\Delta_h \in [-2,10]$とし、w, hを重点的に探索する。角度は(1)で得た $\theta=\theta_{det}$ で固定した。

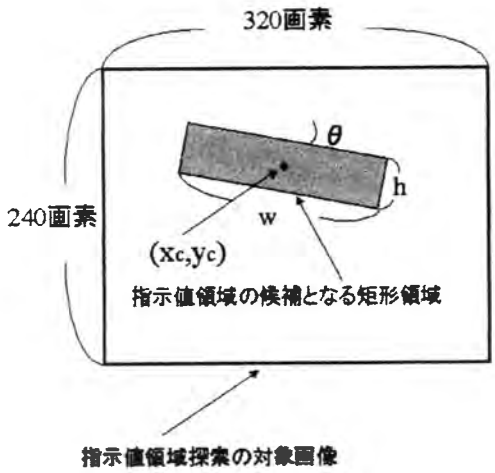


図2 染色体の定義

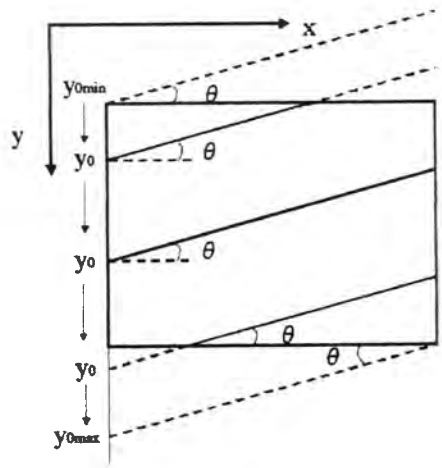


図3 回転角度の評価

4. 実験結果と検討

比較のため、類似の研究である文献[1]の手法も試みた。このとき評価には式(1)を用いた。撮影条件の異なる30枚の画像に対し、指示値領域抽出実験を行った。

図4に示すように、文献[1,2]の手法では、比較的良好に指示値領域が抽出された場合もあるが、全く異なる領域を抽出したり、また矩形領域の回転の影響に大きく依存して、抽出に失敗している。

これに対し図5に示すように、提案手法では、画像の大きさや、回転の影響を受けず、ほとんど全ての場合において良好に指示値領域が抽出できた。これは、初期世代において、提案手法のようにして画像の回転角度を探索することにより、精度良く角度のパラメータが探索できたためであると考えられる。

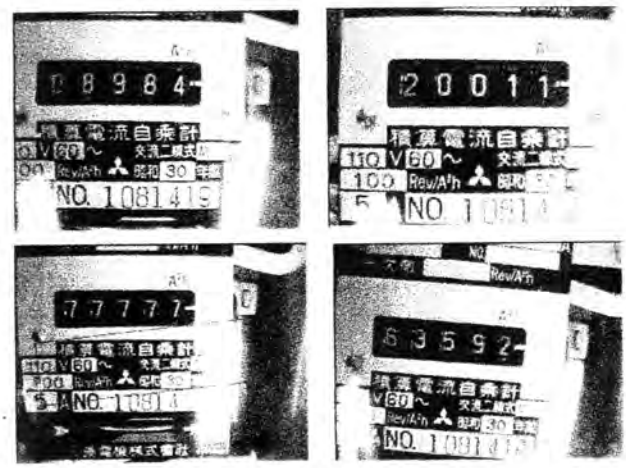


図4 文献[1,2]の手法による結果

図5 提案手法による結果

5. おわりに

本報告では、積算電力計を CCD カメラで撮影し、指示値を自動的に読み取るシステムを提案した。この中で、GA を用いて指示値領域を抽出する手法を提案した。実験により、提案手法の有効性を確認した。

今後は、抽出した指示値領域内をテンプレート・マッチングにより指示値認識を行う部分を実現し、システムを完成させる予定である。

参考文献

[1] 斎藤, "遺伝的アルゴリズムを用いた濃淡テンプレート画像の姿勢認識," 電学論,vol.121-C,pp.1500-1507.
[2] 斎藤, "遺伝的アルゴリズムを用いた濃淡情景画像中の看板文字列抽出," 電学論,vol.121-C,pp.1555-1561.

連絡先

〒680-8552 鳥取市湖山町南 4−101
鳥取大学　工学部　電気電子工学科
大木　誠
電話：0857-31-5231, **FAX.**：0857-31-0880
e-mail: mohki@ele.tottori-u.ac.jp

GAによるアナログフィルタの自動設計とFPAA実装
Automatic design and FPAA implementation of analog filter by using GA

神酒 勤 † 牧野 真大 † 成枝 剛司 †
Tsutomu Miki Masahiro Makino Tsuyoshi Narieda
† 九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻
Graduate School of Life Science and Systems Engineering
Kyushu Institute of Technology

Abstract: Recently, several automatic design systems of analog circuit using GA have been reported. Unfortunately most of them need after-product tuning or re-design because of using computer simulations in evaluation. In order to overcome the problem, we try to construct the real hardware directly and evaluate the performance on itself. In this paper, an automatic design method of analog systems by using FPAA (field programmable analog array) and GA technic is discussed. Advantages of the proposed system are 1)no hardware tunning, 2)no need for design knowledge.

1 はじめに

製品のサイクルが非常に短くなっている現在，設計期間の短縮は大きな課題となっている．その鍵を握るのが自動設計技術の開発である．しかし，アナログ回路は素子の物性特性を利用しており，設計者のノウハウによって回路の性能が大きく左右されるので，自動設計を行うのは難しいとされている．近年，GAを用いた回路設計が試みられている[1]．素子の接続と各素子の定数を"0"，"1"で表し，それを組み合わせたものを遺伝子と見立て，GAにより最良の個体，つまり最良の回路を作り出すという試みである．しかし，これらの研究のほとんどが計算機シミュレーションを用いて評価しているので，素子ばらつき等に敏感なアナログ回路では実際に利用する場合に再設計や再チューニングが必要となることが多い．

本研究では，GAと書き換え可能なアナログLSIであるField Programmable Analog Array(FPAA)[4]を用い，アナログ回路自動設計システムの構築を試みる．本手法は，実デバイスを設計・評価に用いるのでデバイス内の素子のばらつきやオフセットなども含めた回路の最適化が行える．

2 GAによるアナログ回路生成

2.1 FPAA(Field Programmable Analog Array)[4]

FPAAはスイッチトキャパシタ技術を用いたプログラマブルデバイスである．FPAAで実装したLPFの回路を図1に示す．この回路のASCIIコードを次に示す．

0 0 0007 4000 0082 D820 1000 01D0
0000 0001 0970 01C0 0000 0090 8000

このASCIIコードはFPAA内のコンデンサ容量，回路結線情報など実際の回路をディジタル表現したものである．

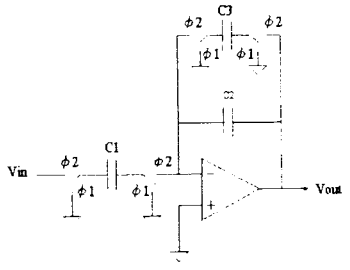


図 1: スイッチトキャパシタ技術によるLPFの構成

図 2: 回路遺伝子

図 3: 回路モデル

2.2 FPAA を利用した GA による回路生成

本研究における回路遺伝子を図 2 に示す．2 入力 1 出力の回路ユニットを 1 個の回路遺伝子として表す．回路遺伝子は 14 個のパラメータからなる．3 個が入出力，10 個がコンデンサ容量値，1 個が FPAA 内の使用領域を表す．ここでは，コンデンサ容量値を GA により生成することで回路の進化を行う．

本論文では，図 3 に示すように 2 つの回路ユニットを用いて，LPF と HPF をカスケード接続したフィルタモデルを構成し，それぞれのパラメータを GA により進化させ目的の回路生成を試みる．

図 1 において，LPF をスイッチトキャパシタ回路で実現する場合，コンデンサ容量を変更することで遮断周波数，帯域ゲインを変化させることができる．LPF の遮断周波数 f_0，帯域ゲイン G は以下の式によって定まる．

$$f_0 = \frac{f_c C_3}{\pi(2C_2 + C_3)} \quad (1)$$

$$G = \frac{C_1}{C_3} \quad (2)$$

f_c は，FPAA のスイッチング周波数を表し，ここでは f_c=1MHz とする．GA により各フィルタのコンデンサ容量を進化的に変化し．このことにより、多様な遮断周波数と帯域ゲインを持つフィルタを生成，世代交代を進めることにより目的のフィルタへ収束させる．

2.3 GA の回路生成アルゴリズム

本研究における GA では，次世代の回路生成を行う個体の選択方法としてルーレット方式を用いる．次世代回路の生殖においては，交叉のみを行い突然変異は行わない．また，次世代の個体は全て交叉によって生成する．交叉方法には一様交叉を用いる．交叉はルーレット方式で選択された個体と，親となる世代の中で最も適合度の高い個体で行う．ルーレット方式で選択された個体が最大適合度を持つ個体の場合は，親世代の中で二番目に適合度の高い個体を交叉相手とする．本手法によるアナログ回路設計のフローを図 4 に示す．

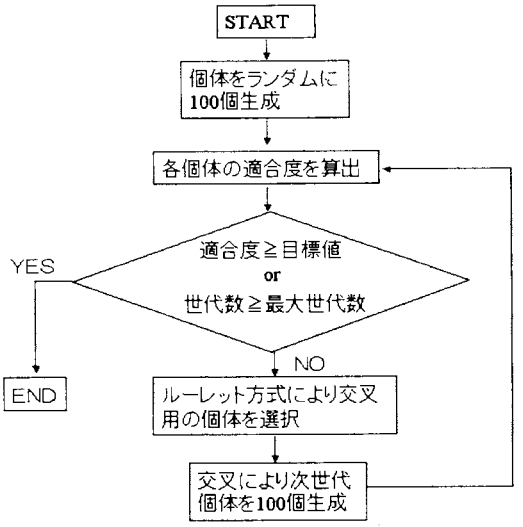


図 4: アナログ回路生成フロー

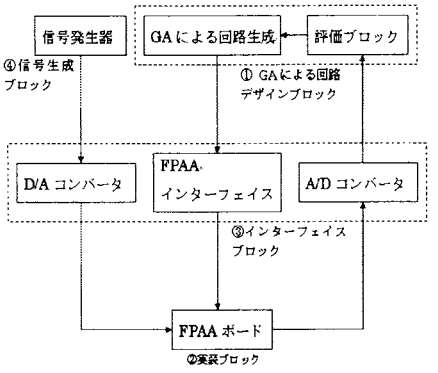


図 5: 本システムの全体ブロック図

3 FPAA を用いたアナログ回路実装

3.1 システム構成

本システムの全体ブロックを図 5 に示す．本システムは① GA による回路生成ブロック，②実装ブロック，③インターフェイスブロックおよび④信号生成ブロックからなる．

①では，GA によって 100 個の個体を生成する．生成された個体 (回路) を実装し，実デバイスより得られる信号を評価して次世代の回路生成を行う．

②では①によって生成された回路を FPAA に実装する．実装完了後，信号発生器によって生成された評価信号を処理する．

③は FPAA インターフェイス，D/A コンバータ，A/D コンバータの 3 つからなる．FPAA インターフェイスによって①で生成した回路データを

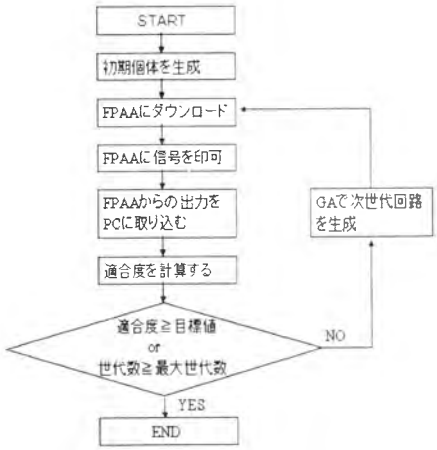


図 6: 本システムの実行フロー

FPAA ブロックへ送信する．D/A コンバータは④で生成された信号を FPAA ブロックへ送信する．A/D コンバータは FPAA の出力信号を①の評価ブロックへ送信する．

④は評価用信号を PC で生成するブロックである．生成した信号は DA コンバータを通して FPAA へ印加される．このブロックを使用せずに，生の信号を外部から直接 FPAA に印加することも可能である．

3.2 GA による自動設計

本システムにおける実行フローを図 6 に示す．以下の手順で回路を生成する．

1) 乱数を用いて 100 個の初期個体 (回路候補) を生成する．
2) 1)(または 6)) で生成した回路を FPAA へ書き込む．
3) 回路構成が完了した後，評価信号を FPAA に印加し，その出力信号を PC に取り込む．
4) FPAA の出力結果と期待波形を比較し誤差を求め，適合度を計算する．2)〜4) の操作を 100 個の個体に対して行う．
5) 適合度が目標値を超えるか，または世代数が最大世代数を超えれば処理を終了する．それ以外の場合は 6) の処理を行う．
6) 算出された適合度を基に GA によって次世代個体を 100 個生成し，2) へ戻る．

本システムで生成された回路の評価は，出力波形と期待波形の誤差を比較することによって行う．目標サンプル電圧を T_{Vi}，出力サンプル電圧を O_{Vi} とすると，期待波形と出力波形の最小自乗平均誤差 E は次式で表される．

$$E = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(T_{Vi} - O_{Vi})^2} \qquad (3)$$

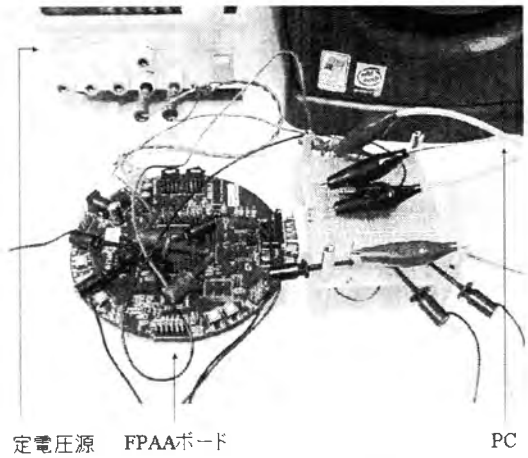


図 7: システム概観

ここで N は各信号のサンプル数を示す。

上記 E を用いて適合度 (FIT) を次式のように定義する．

$$FIT = \frac{1}{1+E} \qquad (4)$$

4 本システムを用いたノイズフィルタの生成

本システム概観を図 7 に示す．PC 上には FPAA とのインターフェイスボードとして A/D，D/A 変換ボードを実装している．GA で生成した回路データ (バイナリコード) を ASCII 形式に変換し，RS232C ポートを通して FPAA へ書き込む．

以下に本システムの諸条件を示す．

- 入力：2.5 ± 2.5[V]
- 出力：2.5 ± 2.5[V]
- GA で生成するサンプル数：100
- GA で生成する染色体の最大世代数：30
- 終了条件：「適合値が 0.95 以上になる」もしくは「最大世代数に達する」のいずれかを満たしたとき終了

本システムの性能を評価するために，5kHz の正弦波にホワイトノイズを重畳させた波形から，ノイズを除去するフィルタの生成を試みた．図 8 に入力波形，図 9 に期待波形を示す．各世代毎の平均適合度の推移を図 10 に示す．

また，上記実験において GA により生成された最良固体 (回路) の出力波形と，Anadigm Designer(FPAA 専用の回路設計ソフトウェア)[5] を用いて人手により設計した BPF の出力波形を図 11 に示す．

図 10，図 11 より，本システムで生成した回路は，専用ツールを用い人手により設計した回路と

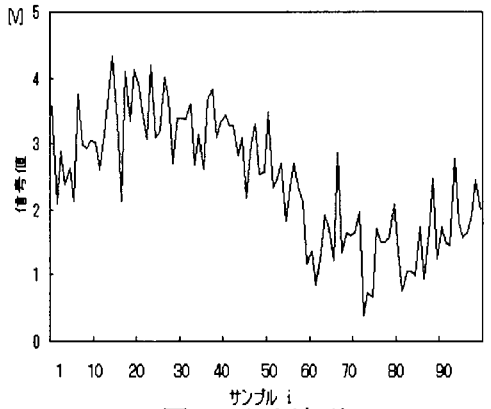


図 8: 入力波形

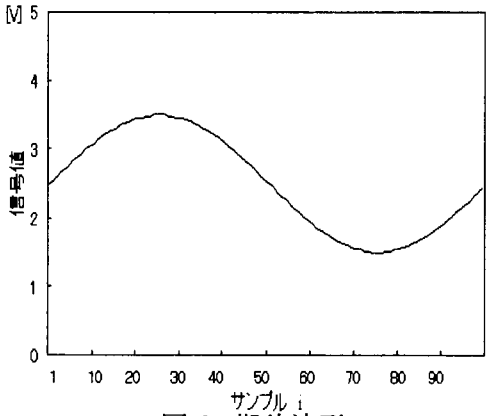


図 9: 期待波形

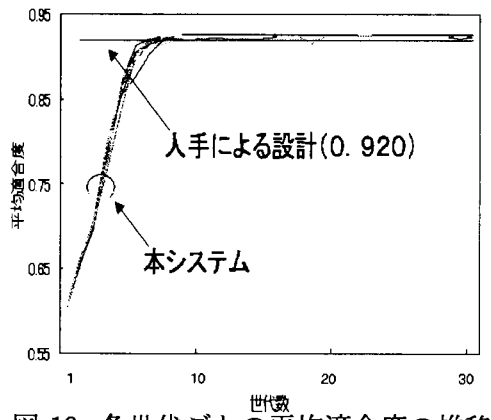


図 10: 各世代ごとの平均適合度の推移

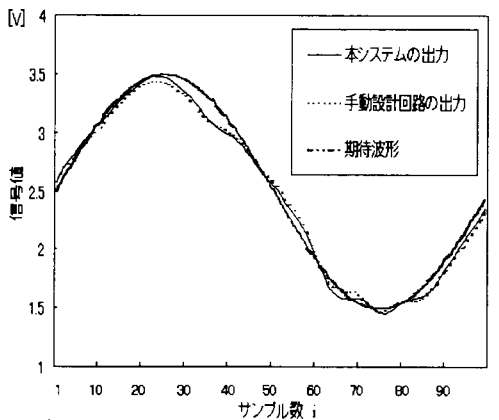


図 11: 本システムによる出力波形と Anadigm Designer[5] による BPF の出力波形

同等以上の性能を示していることがわかる．また第 10 世代目でほぼ収束しており，収束性においても良好な結果を得た．

5 おわりに

本研究では，遺伝的アルゴリズム (GA) と書き換え可能 LSI である FPAA を用いることにより，アナログシステムを自動設計し，実デバイスに実装するシステムを構築した．期待する出力波形を設定するだけで所望のアナログ回路を実現する．ノイズが重畳した信号からノイズを除去するアナログフィルタの設計を行い良好な結果を得た．本システムの特長は以下のとおりである．

1) 期待波形を与えるだけで，その特性を満たすアナログ回路が専門知識なしに容易に設計できる．
2) 実デバイスを用いて回路設計を行うため，素子のばらつきも含めた回路設計が可能である．

本論文ではシステム評価のためにノイズ除去フィルタの設計を行った。今後は，より複雑な回路の自動設計を試みる．

参考文献

[1] 安藤晋，石塚満，伊庭斉, “可変長遺伝子を用いた進化型アナログ回路”, 信学技報, Vol.99, No.95, pp.25-32, 1999.
[2] 伊庭斉志 “遺伝的アルゴリズムの基礎”, オーム社, 1994.
[3] 武部幹，岩田穆，高橋宣明，国枝博昭 “スイッチトキャパシタ回路”, 現代工学社, 1985.
[4] “仕様記述型アナログアレイ (FPAA) 形 2SAA10E40 取扱説明書”，オムロン株式会社，2001.
[5] “AnadigmDesigner User Manual”,Anadigm Inc.,2000.

連絡先：
〒 808-0196
北九州市若松区ひびきの 2-4
九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻
神酒 勤
Tel/Fax ：093-695-6125
Email : miki@brain.kyutech.ac.jp

GAによるブロック・マッチング探索を用いたオプティカル・フロー推定法の一提案

A proposal on optical flow estimation by the block-matching search using GA

大木 誠	赤木 貴明	三宅 宏典	日高 一幸	大北 正昭	岸田 悟
Makoto Ohki	Takaaki Akagi	Kousuke Miyake	Kazuyuki Hidaka	Masaaki Ohkita	Satoru Kishida
鳥取大学	㈱メイテック	鳥取大学	鳥取大学	鳥取大学	鳥取大学
Tottori Univ.	Meitech Corporation	Tottori Univ.	Tottori Univ.	Tottori Univ.	Tottori Univ.

Abstract: In this paper, we propose a system to make an environment map for an autonomous mobile robot which our research group is developing. The autonomous mobile robot is considered to travel in indoor environment, inside of a building such as a hospital. In our system, a stereography is applied for determining 3-dimentional information of the environment. In this procedure, characteristic points corresponding among two or more camera images must be specified. Those characteristic points are tracked between two consecutive flames by using optical flow. In this technique, we propose an optical flow estimation by using GA.

1. はじめに

我々の研究グループでは、病院や介護施設での人や物の安全な搬送を目的とした自律移動車の研究に取り組んでいる。この自律移動車は屋内の壁やドアの突起や、常設障害物の地図情報を保持しており、この情報に基づいて走行するものである。本研究では、この地図情報を獲得するために、CCDカメラを移動させながら撮影し、ステレオ・マッチングにより3次元情報を獲得しようとするものである。このとき、連続するフレーム間での対応点を追跡するために、フレーム間でのオプティカル・フローを推定する。オプティカル・フロー推定には様々な手法が提案されているが、ここでは推定精度と処理に要する時間を考慮して、GAを用いた手法を提案する。

2. 地図情報獲得システム

図1に示すような手順により、自律移動車が走行する廊下などの3次元情報を獲得するため、CCDカメラを奥行き方向に移動させながら、対象を撮影する。図2に示すように、初期フレームと最終フレームの間での特徴点の対応をとり、次式により3次元情報を獲得する。

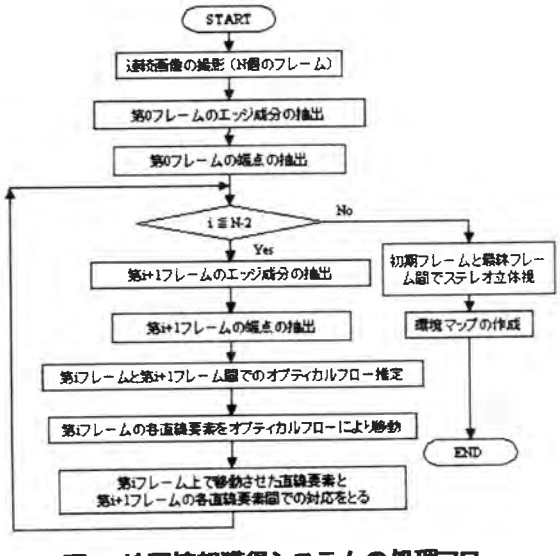


図1 地図情報獲得システムの処理フロー

$$x = \frac{-x_1 x_2 (L+f)}{f(x_2 - x_1)} \tag{1}$$

$$y = \frac{-x_1 y_2 (L+f)}{f(x_2 - x_1)} \tag{2}$$

$$z = \frac{x_2 (L+f)}{x_2 - x_1} \tag{3}$$

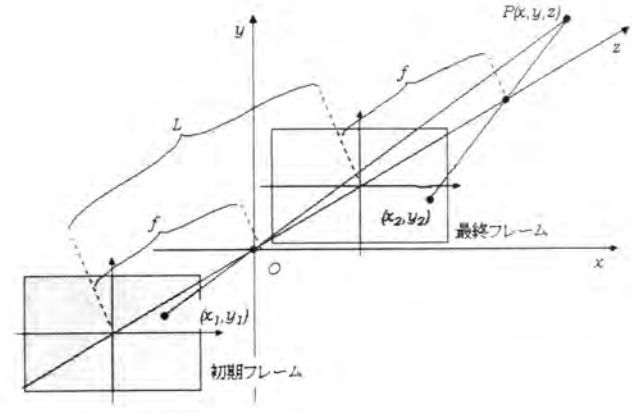


図2 ステレオ立体視

3. GAを用いたオプティカル・フロー推定法

オプティカル・フロー推定には、濃淡画像の時空間微分の拘束式を幾つかの方法で解く光学勾配法や、画像中の小領域の移動量を探索するブロック・マッチング法など数多くの手法が提案されている。ここでは、ブロック・マッチング法に遺伝的アルゴリズムを適用し、効果的にオプティカル・フローを推定する手法を提案する。

1次フレームにおいて格子状に区切った小領域を定義し、テンプレート・ブロックとする。このテンプレート・ブロックを2次フレーム内で走査させながら、式(4)の差分評価Dが最も小さい値をとる移動量(u,v)を探索する。このようにして得た(u,v)がオプティカル・フロー推定値である。Wは小領域を示す。

$$D(u,v)=\sum_{(n,m)\in W}\left|\begin{array}{l}I(x+m,y+n;t)\\ -I(x+m-u,y+n-v;t+\Delta t)\end{array}\right| \quad (4)$$

オプティカル・フロー(u,v)を効果的に探索するために、GA を適用する。全てのフレームを撮影した後に、フレーム間の特徴点追跡を行うが、ここでの処理が高速に行えなければ全体の処理に要する時間も膨大となる。したがってここでの GA は小規模のものが望ましい。そこで、2 個の int 型変数の組を染色体コード(u,v)とし、GA により(u,v)を探索する。GA での処理の流れおよび次世代への個体の再生手順を図3および図4に示す。個体群のサイズを10とし、4個の優位個体を保存、6個体を優位4個体から、交差・突然変異により生成する。突然変異確率は0.01とした。

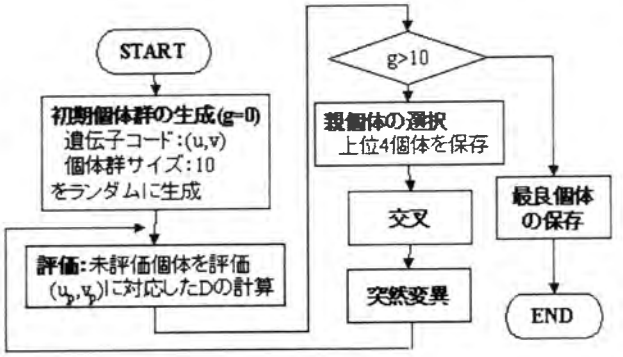


図3 GA での処理の流れ

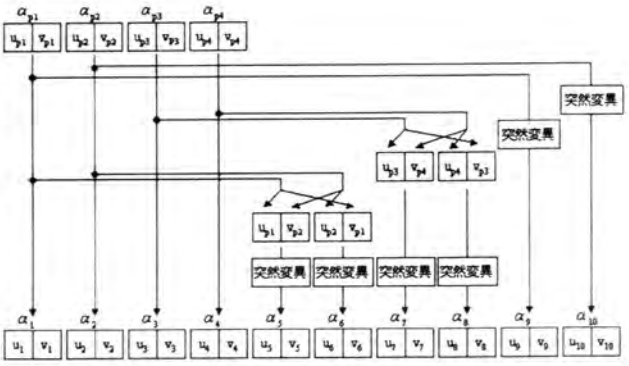
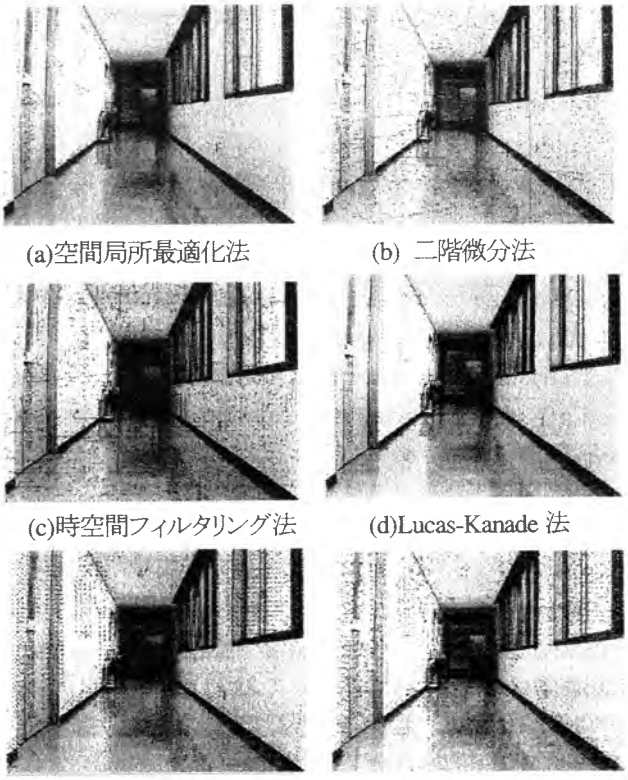


図4 染色体コードと生成手順

4. 実験と検討

本報告では、建物内の廊下においてCCDカメラを移動させながら2枚の連続するフレームを撮影し、GA によるオプティカル・フロー推定の結果について検討した。比較のため、光学勾配法である空間局所最適化法, 二階微分法, 時空間フィルタリング法, Lucas-Kanade 法そしてGA を用いないブロック・マッチング法も試みた。

空間局所最適化法, 二階微分法, 時空間フィルタリング法では、良好なオプティカル・フロー推定を行うことが出来なかった。これは、対象画像において一様色で塗りつぶしたような部分が多く含まれていることが主要因であると考えられる。Lucas-Kanade 法では、特徴点付近のオプティカル・フローが比較的良好に検出されているが、検出されなかった部分も多い。これらに対し、ブロック・マッチング法および提案法では、ほぼ全ての特徴点において正確なオプティカル・フローが検出されている。



(a)空間局所最適化法　(b) 二階微分法

(c)時空間フィルタリング法　(d)Lucas-Kanade 法

(e)ブロック・マッチング法　(f)提案法

図5 オプティカル・フロー推定実験の結果

処理時間については、空間局所最適化法では0.66[sec], 二階微分法では 0.83[sec], 時空間フィルタリング法では 0.05[sec], Lucas-Kanade 法では 0.11[sec], ブロック・マッチング法では 28.79[sec], 提案法では9.34[sec]であった。このことから、提案法により比較的高速に精度よいオプティカル・フロー推定が行えるといえる。

5. おわりに

本報告では、ステレオ立体視での特徴点追跡に用いるオプティカル・フロー推定に対して、GA を適用する手法を提案した。このステレオ立体視は自律移動車が走行する屋内環境の地図情報を3次元情報として獲得するためのものである。種々のオプティカル・フロー推定の手法を実現し、提案手法により比較的高速に精度よいオプティカル・フロー推定が可能であることを確認した。

しかしオプティカル・フロー推定に要する時間は十分短いとは言えず、更なる高速化の検討が必要である。また、ステレオ立体視のための初期フレームと最終フレームの移動に角度をつけることも検討中である。

連絡先
〒680-8552 鳥取市湖山町南4－101
鳥取大学　工学部　電気電子工学科
大木　誠
電話:0857-31-5231, **FAX.**:0857-31-0880
e-mail: mohki@ele.tottori-u.ac.jp

判別問題向け知識獲得環境について

A knowledge acquisition environment for classification problems

稲葉　広典　糀谷　和人　中嶋　宏

Hironori Inaba　Kazuto Kojitani　Hiroshi Nakajima

オムロン株式会社　コントロール研究所　知識制御グループ

Control Technology Laboratory, Knowledge & Control Technology Group, OMRON Corporation

Abstract: In this paper, a knowledge acquisition environment is discussed from the viewpoints of a human-machine collaborative system and a general software platform. Both of semiautomatic knowledge acquisition and human-machine interaction has been realized as the functionality of the software platform within the environment. In addition, the software platform is designed focusing on classification problems to make acquired knowledge effective and efficient.

1. はじめに

自動車、家電機器などの製造ラインにおいては、人間の感性による異音検査による製品品質の維持・向上が強く求められてきた。一方で、熟練を要することやコスト削減などを理由に、これまでの人間による検査ではなく、機械による検査への要求が高まっている。近年、FA業界のIT化にともない、このような検査工程を自動化する異音検査システムが開発され、実用化がはじまっている[7]。異音検査システムでは、現場で収集されたデータを利用して、不良品を判定するための知識を獲得する枠組みが必要である。

上記のような知識獲得作業を行う場合、人の持つノウハウは極めて重要な役割を持つ。従来までも、非常にスキルの高い一部の専門家によって、十分な性能の知識を作成することを可能としてきた。しかし、熟練するには、かなりの時間を要する。また、誰でもが十分なレベルに熟練できるとは限らない。一方、あまりに人に頼りすぎると、作成される知識の均質性が失われてしまうという問題がある（属人性の問題）。作成される知識に対して、一定の品質を確保しようとした場合、知識にばらつきが生じることは、大きな問題である。逆に、全てを機械にまかせると、知識作成がうまくいかなかった場合、手戻り作業が大きくなり、作業の効率化が難しい。したがって、人と機械の協調的な作業を実現する枠組みを構築しなければならない。

これまでに、我々はそのような人と機械の協調作業の実現を目指し、知識獲得プラットフォーム（KAP：Knowledge Acquisition Platform）を提案し[3], [4], [5]、研究を行ってきた。そして今回、異音検査における良品・不良品判定という具体的な事例を対象に、KAPのアーキテクチャに基づく判別問題向け知識獲得環境（C-KAP：Classification-KAP）の開発を行った。本稿では、開発したC-KAPを実際に利用した場合の効果を検証する。まず2章で、KAPについて説明し、これまでのわれわれの取組みを紹介する。次に3章で、KAPに基づいて開発したC-KAPの概要を述べる。4章では、C-KAPの効果を検証する。最後に、5章でまとめを行う。

2. ＫＡＰの概要

2.1 KAPの必要性

知識獲得作業の手順を図1に示す。入力データに対して、

① 選択 → ② 前処理 → ③ 特徴量抽出 →

④ モデリング → ⑤ 解釈／評価

というステップで知識が出力される[1] [2][3]。

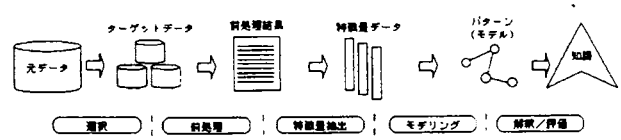


図 1：知識獲得作業の手順

各ステップでは、人間が行うべき確認や評価と、機械で自動化できる演算処理などの作業が混在しており、全てを自動化しようとすると、期待する性能の知識が獲得できなかった場合に修正を行うときの手戻りが大きくなる。逆に、全てを人間主導で行おうとすると、人のスキルによる差が大きくなり、知識の均質性が損なわれる。したがって、知識の性能を確保しつつ、知識獲得作業を効率的に行うには、人と機械のインタラクションが重要である。表1に知識獲得作業の形態による比較を示す。

表 1：知識獲得システムの形態による比較

	完全自動	人間主導	人-機械協調
長所	知識作成工数が少なくてすむ。 知識の均質性が高い。	人間のノウハウが容易に取り込める。 熟練者であれば、高いレベルの知識が期待できる。	作業ごとに人間による確認・調整が容易。 知識の均質性が高い。
短所	各ステップでの確認・調整ができないため、知識作成に失敗した場合の修正・手戻り作業が大きい。	知識の均質性が低く（属人性が強い）、熟練者でなければ、知識が作成できないこともある。	インタラクションによる作業時間の増大 操作スキルが必要

また、我々は[4]で、表2のような知識獲得作業の課題を抽出している。ここでは

(1) 開発者への情報提供

(2) 開発ツールの有効利用

(3) 知識の再利用

の3つが挙げられており、インタラクション作業への支援と開発の効率化の必要性を示している。

表 2：知識獲得作業の課題

項目	課題	期待効果
開発者への情報提供	(1) 汎用な開発手順の提供 (2) 類似開発事例の情報提供 (3) グラフ化・統計処理・特徴量選択・特徴量有効性の評価	・開発者のスキル向上 ・調査・検討・試行錯誤の軽減 ・各ステップの目的の明確化 ・各作業成果物の目標設定の支援
開発ツールの有効利用	(1) 複数の開発で共通に使われる機能の提供 (2) ツールインタフェースの統合環境 (3) 過去に作成・使用したツールの再利用環境 (4) ツールの適応領域の明確化 (5) グラフィカルな開発／シミュレーション環境	・開発の自動化促進 ・同一機能の再開発防止 ・ツール操作負担の軽減 ・保守性の向上
知識の再利用	(1) 開発の副産物（ノウハウ・ソフトウェアツール）の共有・再利用 (2) 開発の成果物の共有と再利用	・情報検索・ツール検索作業負担の軽減

以上のように、知識獲得作業では、人と機械の効率的な協調作業を実現するための枠組みが重要である。

2.2 KAP の構成

2.1 をふまえて、我々は知識獲得プラットフォーム（以下、KAP と表記）を提案してきた[3], [4], [5]。KAP の概念図を図 2 に示す。

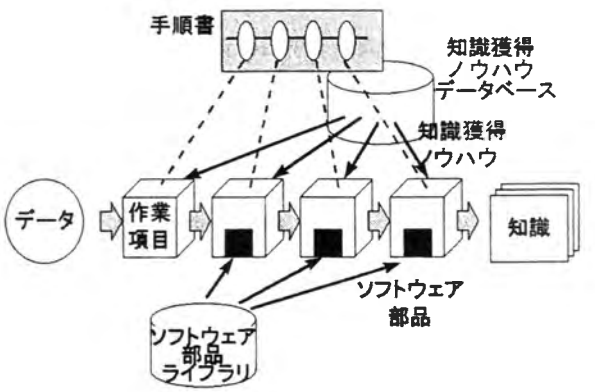


図 2：KAP の概念

KAP は以下の３つの要素から構成される。

(1) 知識獲得手順書

知識獲得作業の各ステップで行われる知識獲得戦略決定を支援する。

(2) 知識獲得ソフトウェア部品ライブラリ

既存の資産を活かして開発の自動化を促進し、開発効率を高める。

(3) 知識獲得ノウハウデータベース

開発者の試行錯誤を減少させ、開発に必要な情報の検索・調査作業負担を軽減する。

KAP のアーキテクチャを用いることにより、機械的に処理可能な部分は、知識獲得ソフトウェア部品ライブラリで自動化し、人間が処理すべき部分は、知識獲得手順書や知識獲得ノウハウデータベースで、作業の効率化を図ることができる。また、開発の過程で得られたノウハウを知識獲得ノウハウデータベースに登録しておくことで、以後の開発では、さらなる知識の高品質化が期待できる。

3. 判別問題向け知識獲得環境（C-KAP）

KAP のアーキテクチャに基づいて判別問題向けの知識獲得環境 C-KAP を構築した。今回は、この C-KAP を異音検査システムの良品・不良品判定に用いるファジィ知識獲得に適用した。

3.1 C-KAP で扱う判別問題

今回、C-KAP で扱うのは、FA 現場などで行われる異音検査の良品・不良品判別問題である。まず、実際の検査ラインから収集した良品・不良品の波形データを元に特徴量を計算する。その特徴量から良品・不良品をうまく分離するようなファジィ知識を作成する。そして、その知識を利用して、未知の良品・不良品を判別することを目的とする。ファジィルールは if then 形式で記述されており、人が見て知識の内容を判断することが可能である。

3.2 異音検査の知識獲得手順

異音検査システムのファジィ知識獲得に C-KAP を適用するにあたり、図 1 の知識獲得作業手順にしたがって作業項目を切り分け、人と機械の役割分担を設定する。

[選択]：データセット決定

学習および評価に用いるデータセットを選択する。

[前処理]：異音強調

正常音と異常音をうまく区別できるようにフィルタを設定したり、波形を変換したりする。

[特徴量抽出]：特徴量計算パラメータ設定

ファジィ知識の作成に用いる 40 種類の特徴量を計算するために必要なパラメータを、ノウハウと試行錯誤によって求め、特徴量を計算する。

[モデリング]：知識（ファジィルール）の作成

選択された有効特徴量を元に、メンバシップ関数（MF）を調整し、ファジィルールを定義する。

[解釈／評価]：評価／検証

テストデータを用いて評価を行い、作成された知識の有効性を検証する。

3.3 判別問題における知識獲得作業の課題

判別問題に KAP を適用する場合の課題を以下に挙げる。

(a) 開発者のスキル向上：

熟練していない開発者であっても、熟練した開発者と同等の知識を獲得できるか。

(b) 知識の均質性の確保：

作成される知識に一定の品質が保障されるか。

(c) 知識の効果的な検証：

作成される知識の有効性をどうやって高めるか。

(d) 人間のノウハウの効果的な取り込み：

人間のノウハウをどうやって取り入れれば、効果的な知識獲得作業が行えるか。

3.4 C-KAP による解決策

上記の課題を解決するため、KAP のアーキテクチャに基づいて C-KAP を構築する。その際、効果的な知識生成を実行するため、

(1) [選択]

(2) [前処理] および [特徴量抽出]

(3) [モデリング]

に対応して、3 つのツールを導入する計画である。本稿では、上記(3)に該当する「ファジィ知識自動生成ツール」を中心に議論する。

人手で知識の作成を行う場合、試行錯誤的な作業が多くなり、知識の作成方法は各人のスキルに拠るところが大きく、作成される知識の質にばらつきが生じる。実用システムにおいては、作成される知識に均質性があることが望ましい。ファジィ知識自動生成ツールは、遺伝的アルゴリズム（GA）とファジィ決定木を使って、メンバシップ関数（MF）を最適化し、ファジィルールを生成するものである。ここでは、3.3 の課題の解決を図るとともに、人と機械の役割分担をふまえた設計を行っている。

- 40 個の特徴量に対し、人手で有効な特徴量を選択し、知識生成を実行する。
- 知識作成時に人手で見逃し率・過検出率の上限を設定し、作成される知識の品質を確保する。
- 知識の性能を見逃し率(FNR：false negative rate)・過検出率(FPR：false positive rate)を統合した指標により評価する[6]。

  見逃し率：

  $$FNR = \frac{\text{正常と誤判定された異常品の数}}{\text{全異常品の数}}$$

  過検出率：

  $$FPR = \frac{\text{異常と誤判定された正常品の数}}{\text{全正常品の数}}$$

図 3 にファジィ知識自動生成ツールの画面を示す。

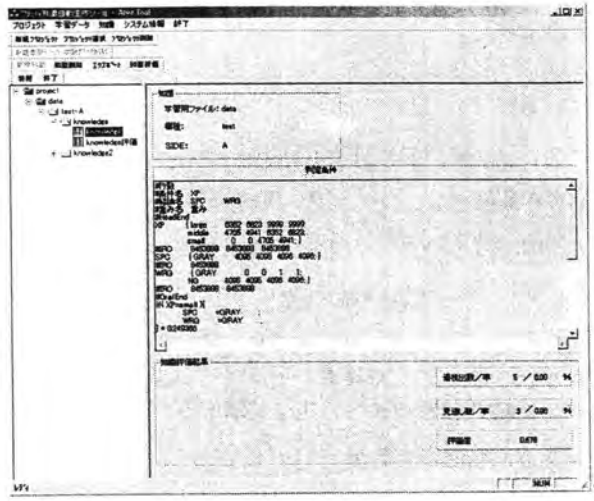


図 3：ファジィ知識自動生成ツールの画面

図 4 に C-KAP の構成図を示す。また、各構成要素に含まれる具体例を一部抜粋しておく。

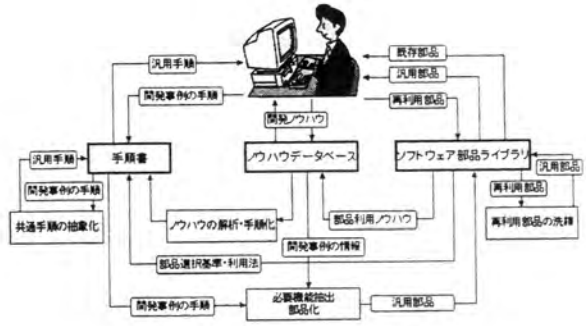


図 4：C-KAP の構成

手順書：

- 判別問題向け知識獲得手順書

  知識を作成するための手順を説明したドキュメント

- ファジィ知識自動生成ツールマニュアル

  ファジィ知識自動生成ツールの利用方法を説明したドキュメント

- ファジィ知識自動生成ツールパラメータ調整手順書

  ファジィ知識自動生成ツールを実行するときのパラメータ設定の指針を説明したドキュメント

ソフトウェア部品ライブラリ：

- ファジィ ID3

  ファジィ決定木を生成するアルゴリズム。

- 遺伝的アルゴリズム（GA）

  自然淘汰の原理に基づく最適化アルゴリズム。

・ 特徴量演算ツール

ファジィ知識生成に用いる 40 個の特徴量を自動的に計算するツール。

・ ファジィ知識自動生成ツール

MF を最適化し、ファジィ知識を生成する。

ノウハウデータベース：

・ GA パラメータ設定の共有化

経験の浅いユーザが、GA 演算に利用するパラメータをできるように、熟練者がパラメータをチューニングした結果をデータベースに登録する。

・ 作成済の知識の再利用

作成した知識はファジィ知識自動生成ツール上で参照したり、異音検査システムに入力される形式で、ファイルに出力したりできる。

4. 考察

開発した C-KAP を異音検査の判別問題に適用したときの効果を検証する。

(課題に対する効果)

(a) 手順書の提供による開発者のスキル向上：

知識獲得手順書やツールマニュアルを示し、熟練者でなくとも、知識獲得作業を行うことができた。

(b) 知識に対する目標値の設定による均質性の確保：

人と機械の協調作業を実現したファジィ知識自動生成ツールを用いることで、人手で作成するよりも、性能のよい知識が作成できた。また、見逃し率・過検出率を統合した性能評価を行うことで、知識の均質性を維持することができた。

(c) 効果的な知識検証方法の実現：

人は交差検証の分割数を指定するだけでよく、あとは自動的に検証が行われるため、分割数の大きな交差検証も容易に実現可能となった。

(d) 知識作成における人間のノウハウの取り込み：

ファジィ知識自動生成ツールでは、人が当たりをつけた特徴量を選択し、機械がその特徴量のみを利用した知識生成を行うことで、性能のよい知識が効果的に作成できた。

また、今回、C-KAP にファジィ知識自動生成ツールを導入するにあたって、以下の効果が確認できた。

(e) ノウハウを利用した既存資産の効果的な再利用：

ファジィ知識自動生成ツールの作成において、ファジィ ID3 や遺伝的アルゴリズムといった既存のソフトウェア資産を利用するためのノウハウが残されていたため、効果的に再利用することができた。

(f) 目的の明確化によるシステム開発の効率化：

各ステップでの入出力関係が明確であるため、ステップごとのツールの開発が容易である。今回モデリングのステップに該当するファジィ知識自動生成ツールを導入したが、今後、選択や前処理のステップにツールを導入する場合にも、導入済のファジィ知識自動生成ツールに関しては、カスタマイズが不要である。このような段階的なシステム開発にも有効であることがわかった。

5. まとめ

本稿では、知識獲得プラットフォーム KAP のアーキテクチャに基づき、判別問題向けの知識獲得環境を構築し、その効果を検証した。人と機械の協調的な作業を実現することで、性能のよい知識をより効率的に作成することできた。また、これまでに作成されたソフトウェアを有効に活用することでシステム開発が効率化でき、各ステップの切り分けが明確であれば、今後の拡張も容易に行えることが確認できた。

今後は、新たなツールを導入するなどして、開発の効率化を進め、さらに検証を続けていく予定である。

【参考文献】

[1] U.M.Fayyad, G.Piatetsky-Shapilo, and P.Smyth.: Advances In Knowledge Discovery and Data Mining, AAAI Press/The MIT Press (1996).

[2] G.Piatetsky-Shapilo: An Overview of Knowledge Discovery in Databases: Recent Progress and Challenges: W.P.Ziarko (Ed.): Roughsets,FuzzySets and Knowkledge Discovery, pp.1-10, Springer-Verlag (1995)

[3] H.Nakajima: Fuzzy Logic and Data Mining, Proc. Of the 1996 Asian Fuzzy Systems Symposium, pp.133-138 (1996).

[4] 熊本浩他:知識獲得作業における課題と考察, 第 13 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集(1997)

[5] 糀谷和人他: 知識獲得作業の効率化のためのアーキテクチャに関する考察, 第 13 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集(1997)

[6] 糀谷和人他: 検査システム向けファジィ判別知識の生成に関する考察 ーファジィ決定木学習と遺伝的アルゴリズムの適用ー, 第 19 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集(2003)

[7] 入江篤他: 異音検査システムならびに波形解析ソリューションサービス, 第 19 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集(2003)

【連絡先】
〒619-0283 京都府相楽郡木津町木津川台 9 丁目 1 番
オムロン(株) 技術本部 コントロール研究所 知識制御グループ
稲葉広典
TEL : 0774-74-2018 FAX : 0774-74-2004
E-mail:hironori_inaba@omron.co.jp

DEA効率値のファジィルールによる推論

Estimation of DEA efficiency values by fuzzy decision rules

円谷　友英　　田中　英夫
Tomoe Entani　　Hideo Tanaka
高知大学　　広島国際大学
Kochi University　　Hiroshima International University

Abstract: We classify units with input and output data based on their relative efficiency values. Efficiency values depend on units' evaluated viewpoints. We assign efficient classes to units based on their efficiency values from one of the extreme viewpoints, the pessimistic one, where the inferior input and/or output items for the evaluated unit are focused. The decision table consists of the given data and assigned efficient classes as the condition and decision attributes respectively. Since there are order relations in attributes, the dominance relation based rough set approach is applied. The decision rules which describe the efficient classes by means of the relevant input and output items are induced from the decision table. The induced if-then rules can be extended to fuzzy ones and they are useful to estimate the efficiency for a new unit.

1　はじめに

DEA (Data Envelopment Analysis) は，多入出力システムにおける効率性の評価手法であり，各事業体 (DMU:Decision Making Units) の効率値を，ウェイト変数による仮想出力値の仮想入力値に対する相対的な最大値として定式化している [1]．これは，すべての DMU を考慮して，分析対象となる DMU にとって楽観的観点から得られる評価値である．相対的な効率性はこのような楽観的な立場だけでなく，いろいろな立場から測ることができる．そこで，仮想出力値の仮想入力値に対する相対的な比を最小化することで，DMU にとって悲観的観点から評価値を求める方法が提案されている [2]．本研究では，いろいろな評価立場を考慮するとき可能性がある効率値の 1 つの端点となる悲観的観点から得られる評価値を DMU の効率値とする．これに基づいて DMU をいくつかの効率性クラスに分類する．割り当てられる効率性クラスが決定属性となり，与えられる入出力値が条件属性となる決定表を作る．

Pawlak により提案されたラフ集合理論は，同値関係に基づいてデータを近似する概念であり，これを用いて決定表から if-then ルールを抽出できる [4]．属性の同値関係に基づく従来のラフ集合に対して，さらに Greco らは属性の序数関係を考慮している [3]．本研究で条件属性となる入出力値と決定属性となる効率性クラスは，明らかに序数属性であるので，序数関係を考慮したラフ集合理論を適用してルールを抽出し，これらをファジィ化する．入出力値と効率性クラスの関係を表すルールは，新しい DMU の入出力値が与えられるとき，その効率性を測るための効率性クラスの推定に用いることができる．

2　悲観的観点からの評価値

DMU_o の相対的な評価値は次のように表すことができる．

$$\theta_o = \frac{\frac{\boldsymbol{u}^t \boldsymbol{y}_o}{\boldsymbol{v}^t \boldsymbol{x}_o}}{\max_j \left(\frac{\boldsymbol{u}^t \boldsymbol{y}_j}{\boldsymbol{v}^t \boldsymbol{x}_j} \right)} \tag{1}$$

ただし，$\boldsymbol{x}_j$ と $\boldsymbol{y}_j$ は要素がすべて正である入出力ベクトルであり，$\boldsymbol{u}$ と $\boldsymbol{v}$ はウェイト変数ベクトルである．入出力項目の数はそれぞれ m 個と k 個であり，DMU の数は n 個である．

悲観的観点からの評価値は，(1) をウェイト変数に関して最小化して，次の問題により求められる．

$$\theta_{o*} = \min_{\boldsymbol{u},\boldsymbol{v}} \frac{\frac{\boldsymbol{u}^t \boldsymbol{y}_o}{\boldsymbol{v}^t \boldsymbol{x}_o}}{\max_j \left(\frac{\boldsymbol{u}^t \boldsymbol{y}_j}{\boldsymbol{v}^t \boldsymbol{x}_j} \right)} \quad \text{s.t.} \quad \boldsymbol{u} \geq \boldsymbol{0},\ \boldsymbol{v} \geq \boldsymbol{0} \tag{2}$$

(2) はウェイト変数を含まない問題に変形することができ，θ_{o*} が求められる．

得られた効率値に基づいてすべての DMU に効率性クラスを割り当てる．DMU の効率性を評価するとき，各 DMU の効率値が常に必要ということはなく，いくつかの効率性クラスで十分であることが多い．与えられる入出力値を条件属性とし，割り当てられる効率性クラスを決定属性とすると，決定表を作ることができる．

3　決定表からのルール抽出

効率値は出力の入力に対する比で測られるので，より小さな入力値とより大きな出力値を持つ DMU の効率値がより大きくなる．すなわち，本研究で用いる条件属性と決定属性には序数関係がある．そこで，文献 [3] に提案されている属性の序数性を考慮したラフ集合を用いてルールを抽出する．ここでは，関係 D が次のように定義されている．

[Dominance relation]

$$jDi \leftrightarrow \forall r\ x_{ir} \geq x_{jr} \text{ and } \forall p\ y_{ip} \leq y_{jp}$$

jDi は，すべての入出力値において DMU_j が DMU_i より優れており，明らかに DMU_j が DMU_i より効率的であることを示している．

DMU_i より効率的である DMU の集合 $D^+(i)$ と DMU_i のほうが効率的である DMU の集合 $D^-(i)$ はそれぞれ次のように定義されている．

$$D^+(i) = \{j \in U : jDi\} \quad D^-(i) = \{j \in U : iDj\}$$

ここで，U はすべての DMU の集合である．

また，効率性クラス C_t の上下方累積集合は次のように求めることができる．

[Upper and lower cumulative sets]

$$C_t^{\geq} = \cup_{s \leq t} C_s \qquad C_t^{\leq} = \cup_{s \geq t} C_s$$

$C_t^{\geq}$ と $C_t^{\leq}$ の上下界近似は，D^+ と D^- を用いて，次のように表すことができる．

$$\overline{P}(C_t^{\geq}) = \cup_{i \in C_t^{\geq}} D^+(i) \quad \overline{P}(C_t^{\leq}) = \cup_{i \in C_t^{\leq}} D^-(i)$$
$$\underline{P}(C_t^{\geq}) = \{i \in U : D^+(i) \subseteq C_t^{\geq}\}$$
$$\underline{P}(C_t^{\leq}) = \{i \in U : D^-(i) \subseteq C_t^{\leq}\}$$

得られた下界近似から，各効率性クラスの上下方累積集合 $C_t^{\geq}$ と $C_t^{\leq}$ について，次のような if-then ルールが決定表から抽出される．

1. If $\forall r\ x_{ir} \leq x_{*r}$ and $\forall p\ y_{ip} \geq y_{*p}$, then $DMU_i \in C_t^{\geq}$, where $DMU_* \in \underline{P}(C_t^{\geq})$
2. If $\forall r\ x_{ir} \geq x_{*r}$ and $\forall p\ y_{ip} \leq y_{*p}$, then $DMU_i \in C_t^{\leq}$, where $DMU_* \in \underline{P}(C_t^{\leq})$

新たな DMU の入出力値が与えられ，それがルール 1 に適合するときは「少なくとも効率性クラス C_t に属する」こと，またルール 2 に適合するときは「たかだか効率性クラス C_t に属する」ことを推定することができる．

あらゆる入出力値に対応するために，ルール 1 を次のようなファジィルールへと拡張する．

1. If $\forall r\ \tilde{x}_{*r}$ and $\forall p\ \tilde{y}_{*p}$, then$DMU_i \in C_t^{\geq}$, where$DMU_* \in \underline{P}(C_t^{\geq})$

$\tilde{x}_{*r}$ と $\tilde{y}_{*p}$ は，それぞれメンバーシップ関数 $\mu_{x_{*r}}(x_{\cdot r})$ と $\mu_{y_{*p}}(y_{\cdot p})$ により定義されるファジィ数である．ルール 2 についても同様にファジィルールへと拡張できる．

ある DMU_i のファジィルールへの適合度は，各条件属性のメンバーシップ値から min 演算 $\wedge$ を用いて，次のように定義される．

$$\mu_*(i) = \mu_{x_{*1}}(x_{i1}) \wedge \cdots \wedge \mu_{x_{*m}}(x_{im}) \wedge \mu_{y_{*1}}(y_{i1}) \wedge \cdots \wedge \mu_{y_{*k}}(y_{ik})$$

DMU_i は，適合する可能性があるルールのうち度合いが最大となるルールに適合するとみなす．ルールを用いることで，DMU の悲観的効率値を求めることなく，その効率性クラスを推定することができる．

4 数値例

表 1: 入出力値と悲観的効率値による効率性クラス

	x_1	x_2	y_1	y_2	効率値	クラス
A	1	5	1	8	0.050	C_4
B	1	6	2	7	0.083	C_3
C	1	2	2	6	0.250	C_2
D	1	5	2	4	0.100	C_3
E	1	4	3	5	0.188	C_2
F	1	1	4	4	0.500	C_1
G	1	6	4	2	0.083	C_3
H	1	3	5	3	0.250	C_2
I	1	4	6	2	0.125	C_3
J	1	2	7	1	0.125	C_3

表 1に示す入出力値を用いて，まず悲観的観点から効率値を求めて効率性クラスを決定する．さらに入出力値と効率性クラスからなる決定表から if-then ルールを抽出し，そのいくつかを示す．ここで，x_1 はすべて等しいので，条件部は x_2, y_1, y_2 からなる．

H : If $x_2 \leq 3, y_1 \geq 5, y_2 \geq 3$, then $DMU \in C_2^{\geq}$
D : If $x_2 \leq 5, y_1 \geq 2, y_2 \geq 4$, then $DMU \in C_3^{\geq}$
G : If $x_2 \leq 6, y_1 \geq 4, y_2 \geq 2$, then $DMU \in C_3^{\geq}$

新たに L;$(x_{L2}, y_{L1}, y_{L2}) = (4, 3, 2)$ を仮定する．先に得られたルールをファジィルールへと拡張したルールへの L の適合度は次のようになる．

$$\mu_H(L) = 0.37 \wedge 0.14 \wedge 0.37 = 0.14$$
$$\mu_D(L) = 1 \wedge 1 \wedge 0.14 = 0.14$$
$$\mu_G(L) = 1 \wedge 0.37 \wedge 0.37 = 0.37$$

G からのファジィルールへの適合度が最大となり，L は少なくとも効率性クラス C_3 に属することが推定される．

5 おわりに

DMU の相対的な効率値は，楽観的・悲観的観点，またその中立的な立場など，いろいろな立場から求めることができ，どの立場が適当かは意思決定者の判断に委ねられる．本研究では，いろいろな評価立場を考慮するとき可能性がある効率値の 1 つの端点となる悲観的観点からの効率値を用いて，DMU をいくつかの効率性クラスに分類した．同様に，他の立場からの評価により得られる効率値を用いても，DMU の効率性クラスを決定することができる．そして，与えられる入出力値を条件属性とし，割り当てられる効率性クラスを決定属性とする決定表から，if-then ルールを抽出した．このとき条件属性と決定属性はともに序数属性となっているので，序数関係を考慮したラフ集合理論を適用した．抽出されたルールをファジィルールへと拡張し，これを用いて新たな DMU の効率性クラスを効率値を計算することなく推定した．

参考文献

[1] A. Charnes, W.W. Cooper, E. Rhodes: Measuring the efficiency of decision making unit, European Journal of Operational Research, Vol.2, pp.429-444 (1978)

[2] T. Entani, Y. Maeda, H. Tanaka: Dual models of interval DEA and its extension to interval data, European Journal of Operational Research, Vol.136, No.1, pp.32-45 (2002)

[3] S. Greco, B. Matarazzo, R. Sloxinski: Rough sets theory for multicriteria decision analysis, European Journal of Operational Research, Vol.129, No.2, pp.1-47 (2001)

[4] Z. Pawlak: Rough sets, International of Journal of Information and Computer Science, Vol.11, No.5, pp.341-356 (1982)

連絡先 :
〒 780-8520
高知市曙町 2-5-1
高知大学　人文学部　社会経済学科
円谷　友英
電話 : 088-844-8212
FAX : 088-844-8225
Email : entani@cc.kochi-u.ac.jp

橋梁の架設現場における事故事例からの規則の抽出とその評価

Evaluation of Rules Extracted from Accident Cases in Construction Sites

西村 文宏
Fumihiro Nishimura
関西大学大学院
Kansai University
Graduate School

広兼 道幸
Michiyuki Hirokane
関西大学
Kansai University

古田 均
Hitoshi Furuta
関西大学
Kansai University

Abstract: In recent years, the total number of accidents is not significantly decreasing, and some problems in the safety management are pointed out. In this research, the extraction method of the minimum decision algorithms by using rough sets and genetic algorithms are proposed. The proposed method can extract the efficient and the simplified decision rules. The decision algorithms were extracted from the accident cases in construction sites. The identification rate and the simplification of the extracted knowledge were evaluated by using the k-fold cross validation method.

1. はじめに

近年の計算機の性能向上と普及に伴い，収集・蓄積され利用可能なデータの量は，増加の一途をたどっている．一方，計算機はこれらの蓄積された資源を有効に活用して，より高度で知的な仕事が要求されている．本研究では，ラフ集合を用いて事例から決定アルゴリズムを導出する過程に遺伝的アルゴリズム(GA)を適用し，データ量に依存しない比較的少ない計算量で，簡潔かつ有用な決定アルゴリズムを導出する手法を提案した．

土木分野では，橋梁架設工事の高度化によって，発生する事故件数が横ばい状態となっており，安全管理に対する問題点が指摘されている．そこで，本研究で提案した手法を，PC(Prestressed Concrete)橋架設時における事故事例に適用して決定アルゴリズムを導出し，安全管理に役立つと考えられる簡潔な規則の抽出を試みた．導出した決定アルゴリズムの簡潔さや有用性を示すため，簡潔な知識を導出するために従来から利用されている C4.5[1]による結果との比較を実施した．比較においては知識の簡潔さのみならず，導出した知識の認識率による評価も実施し，その評価には k -fold cross validation 法[2]を用いた．

2. ラフ集合と GA を併用した知識獲得手法

一般に，決定アルゴリズムは簡潔であるほど良いと考えられる．簡潔な決定アルゴリズムは見通しが良く，そこに表現されている知識も理解しやすい．決定アルゴリズムの中で最も簡潔なものを最小決定アルゴリズムと呼び，ラフ集合を用いた知識獲得ではその導出が目的の1つとなる．しかし，決定表の1つの要素に対して複数の縮約が存在する場合が多く，複数の決定規則が導出されるため，最小決定アルゴリズムの導出は，その組み合わせを考えると膨大な数になる可能性がある．単純には，各決定規則の値の縮約によって得られる簡約化された決定規則の組み合わせをすべて検証し，最も簡潔なものを最適解とすればよい．しかし，場合によっては数十程度の決定規則しか持たない決定表であっても，数千，数万の決定規則が得られる場合があり，容易に組み合わせの爆発が発生する．

そこで本研究では，決定表から得られた決定アルゴリズムを全体として評価しながら効率良く最適な解を得るため，GA を用いた．

完全かつ無矛盾という性質を損なうことなく，可能な限り簡潔な決定アルゴリズム(極小決定アルゴリズム)を導出することを目的として，GA のコーディングを行った．

遺伝子表現

与えられた決定表から得られたすべての決定規則と遺伝子表現，および遺伝子表現と決定アルゴリズムの関係を図1に示す．図1の左側の表に示すように，与えられた決定表における各事例から簡約化された複数の決定規則が導出される．すべての事例から簡

表 1 斜面の崩壊危険度診断の例

斜面	条件属性			決定属性
	高さ	勾配	長さ	危険度
S_1	中	中	長	B
S_2	中	緩	短	C
S_3	高	急	短	A
S_4	高	中	短	A
S_5	低	緩	長	C
S_6	高	緩	長	B

約化された決定規則を導出し，重複したものを除いた数をNrとする．図1は表1から決定アルゴリズムを導出する例であり，表1からは13種類の簡約化された決定規則が得られたことを示す．ここで，決定アルゴリズムは任意の決定規則の組み合わせから導き出されるものと考えた． すなわち，Nr個の決定規則から任意のn($1 \leqq n \leqq Nr$)個の決定規則を組み合わせることで導出することができると考えた．

本論文では，この考え方に基づき，遺伝的アルゴリズムを適用するため，図1の右上に示すような長さ Nr の遺伝子列を用意して，対応する決定規則を用いるか否かを1と0でそれぞれ表現した．さらに，染色体のひとつの遺伝子座が，決定表から導出されたひとつの決定規則に対応しており，遺伝子情報から，図1の右下の表に示すような決定アルゴリズムが得られることになる．

評価関数

GAでは，ルーレット戦略を基本として，エリート戦略を併用する．その際の遺伝子の評価方法として，式1に示す評価関数を用いる．

$$F = \frac{BF}{R_{val} \cdot R_{attr} \cdot R_{rule}} \cdot 0.2^{N_{nc}} \qquad (1)$$

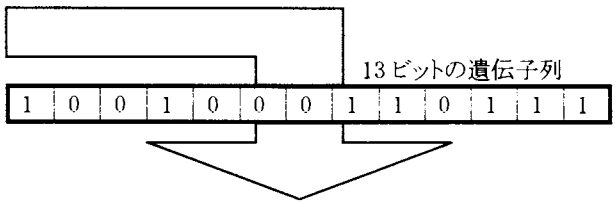
ここで，BFは基準となる適応度で，本研究では200を用いた．R_{val}, R_{attr}, R_{rule} は，それぞれ与えられた決定表に対する，決定アルゴリズム中の条件属性値の数，条件属性の数，および決定規則の数の割合を示す．決定アルゴリズム中の条件属性値の数，条件属性の数，決定規則の数が少なくなり，これらの値が小さいほど簡潔な決定アルゴリズムとなる．つまり，式1では，これらの値が小さくなるほど適応度の値は大きくなり，高く評価されることになる．また，N_{nc} はその個体によって表現される決定アルゴリズムを元の決定表にあてはめたとき，どの決定規則にも当てはまらなかった事例の数である．すなわち，決定アルゴリズムの不完全性を表す指標であり，1以上であれば適応度にペナルティが指数的に与えられることになる．

3. 決定アルゴリズムの導出

本研究で提案した決定アルゴリズムの導出方法を，PC橋架設時における事故事例に適用した．事故事例は206件あり，表2の分類に示すとおり属性は10種類である．表3は，表2の分類に従い206件の事故事例の一部をまとめたものであり，この表に対して提案

決定規則	条件属性			決定属性
	高さ	勾配	長さ	危険度
R_1	中	中	*	B
R_2	中	*	長	B
R_3	*	中	長	B
R_4	中	緩	*	C
R_5	*	緩	短	C
R_6	中	*	短	C
R_7	高	*	短	A
R_8	*	急	短	A
R_9	高	中	*	A
R_{10}	*	中	短	A
R_{11}	低	*	*	C
R_{12}	高	緩	*	B
R_{13}	高	*	長	B

表 1 から得られた
13 種類の決定規則



決定規則	条件属性			決定属性
	高さ	勾配	長さ	危険度
R_1	中	中	*	B
R_4	中	緩	*	C
R_8	*	急	短	A
R_9	高	中	*	A
R_{11}	低	*	*	C
R_{12}	高	緩	*	B
R_{13}	高	*	長	B

遺伝子列で表現された
決定アルゴリズム

図 1 遺伝子コーディングの概念

表2 事故情報の分類

属性＼クラス	1	2	3	4	5	6	7
(a) 時　刻	0:00～8:00	8:00～10:00	10:00～12:00	12:00～13:00	13:00～15:00	15:00～17:00	17:00～24:00
(b) 場　所	資材・製品等置場	足場	製品加工現場	橋脚・橋台	支保工	工場	その他
(c) 作業工程	仮設工	足場および支保工	主桁製作工	架設工	横組工	その他	
(d) 架設工法	プレキャスト桁架設	固定支保工架設	張出し架設	押出し架設	移動支保工架設	プレキャストセグメント架設	その他
(e) 年　齢	～20才	20～30才	30～40才	40～50才	50～60才	60才～	
(f) 職　種	鳶工	PC工	大工	鉄筋工	運転手	その他	
(g) 経験年数	～1年	1～5年	5～10年	10～15年	15～20年	20年～	
(h) 障害程度	～30日	30～60日	60～90日	90～120日	120～150日	150日～	死亡
(i) 障害部位	頭(※眼を除く)	眼	胸・腹	肩・背中・腰	足	手	その他
(j) 事故の型	墜落・転落	挟まれ・巻込まれ	激突され	激突	飛来・落下	切れ・こすれ	崩壊・倒壊

した決定アルゴリズムの導出方法の適用を試みた.

表3に示す事故事例の決定表に適用し, j(事故の型)とi(傷害部位)を決定属性とした2ケースについて, 実際に得られた極小決定アルゴリズムを評価した. また, 導出した決定アルゴリズムの簡潔さや有用性を示すため, 従来から簡潔な知識の導出に利用されているC4.5での結果と比較を行った. さらに, k-fold cross validation 法を用いて, 導出した決定アルゴリズムの認識率による評価も実施した.

表4は, j(事故の型)を決定属性と考え, 5-fold cross validation 法での5回の試行結果をまとめたものである. 提案方法による決定規則数は平均で27.2個であるが, C4.5では平均で35.0個となり, 提案方法が簡約化という点で優れていると言える. また, 属性値の数では提案方法が52.4個, C4.5が92.6個となり, 約56%のサイズに簡約化されている. また, 認識率は, どちらも高い認識率となったが, 提案方法では96.3%という極めて高い認識率を得ることができた.

元の決定表(表3)は, 9個の条件属性, 206件の事例からなる決定表であり, 合計1854個の属性値から構成されていた. 提案方法で得られた決定アルゴリズムは平均で52.4個の属性値であり, 全体として約2.8%のサイズに簡約化された結果が得られた.

表3 PC橋架設時における事故事例の決定表

No.	事故事例に関する属性									
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
1	6	1	1	1	4	1	4	6	7	1
2	6	1	1	1	1	1	2	5	5	1
3	6	1	1	1	1	1	2	5	5	1
4	7	6	3	1	5	2	6	3	5	3
5	2	3	3	1	4	1	6	3	4	1
6	2	3	3	1	4	2	4	1	5	2
7	2	2	3	1	3	3	4	3	2	5
8	6	6	3	1	6	2	2	1	6	4
9	6	6	3	1	5	2	6	6	3	3
10	3	1	2	2	5	1	2	4	5	7
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
206	6	2	2	2	5	1	5	6	1	1

a:時刻, b:場所, c:作業工程, d:架設工法, e:年齢, f:職種, g:経験年数, h:疾病程度, i:障害部位, j:事故の型

表5は, i(障害部位)を決定属性と考え, 先ほどと同様に試行結果をまとめたものである. 提案方法による決定規則数は平均で35.0個であるが, C4.5では平均で37.6個となり, 簡約化の点ではあまり差異が見られなかった. しかし, 属性値の数では提案方法が66.2個, C4.5が98.6個となり, 約67%のサイズに簡約化されている. また, 認識率は, 提案方法では95.3%という極めて高い認識率を得ることができた.

提案方法で得られた決定アルゴリズムは平均で66.2個の属性値で構成されており, 全体として約3.6%のサイズに簡約化された結果が得られた.

4. おわりに

本研究では, ラフ集合を用いて事例から決定アルゴリズムを導出する過程に遺伝的アルゴリズムを適用し, データ量に依存しない比較的少ない計算量で, 簡潔かつ有用な決定アルゴリズムを導出する方法を

表 4 5-fold cross validation による実験結果(事故の型)

Case	C4.5				提案方法			
	認識率	ルール数	属性数	属性値数	認識率	ルール数	属性数	属性値数
1	90.0%	32	8	79	95.0%	25	7	47
					95.0%	25	8	48
					95.0%	27	8	49
2	90.0%	35	7	95	95.0%	27	8	52
					95.0%	28	7	55
					95.0%	27	8	52
3	90.0%	37	6	103	97.5%	29	8	56
					97.5%	28	7	54
					95.0%	27	8	52
4	85.0%	37	5	102	95.0%	27	8	53
					95.0%	28	9	54
					97.5%	26	8	51
5	97.5%	34	7	84	100.0%	28	7	54
					100.0%	28	8	55
					97.5%	28	8	54
平均	90.5%	35.0	6.6	92.6	96.3%	27.2	7.8	52.4

表 5 5-fold cross validation による実験結果(障害部位)

Case	C4.5				提案方法			
	認識率	ルール数	属性数	属性値数	認識率	ルール数	属性数	属性値数
1	85.0%	40	6	108	90.0%	36	9	67
					92.5%	35	9	65
					90.0%	34	9	63
2	95.0%	36	8	91	97.5%	34	8	67
					97.5%	35	9	68
					97.5%	35	9	67
3	95.0%	37	8	96	92.5%	36	9	68
					95.0%	34	9	64
					92.5%	34	8	64
4	85.0%	38	7	103	95.0%	34	8	63
					95.0%	35	7	65
					95.0%	34	8	63
5	95.0%	37	8	95	100.0%	37	9	71
					100.0%	35	9	67
					100.0%	37	9	71
平均	91.0%	37.6	7.4	98.6	95.3%	35.0	8.6	66.2

提案した.

その結果, 決定アルゴリズムのサイズは, 最も良い結果で約2.8%にまで簡約化され, C4.5の結果と比較しても, 簡潔さの面で良好な結果が得られた. また, 決定規則の数に関しても, C4.5の結果に比べて, 少ない決定規則で元の決定表を全て被覆している無矛盾な決定アルゴリズムの導出ができた. さらに認識率においても, C4.5に比べ良好な結果が得られた.

今後, さらに最適化された決定アルゴリズムの導出のためには, 目的の異なる指標を全体的に評価できる, 多目的最適化におけるパレート最適解などの検討が必要である. また, ラフ集合を用いた知識獲得手法では, 離散化が重要な課題であり, 今後, より最適な決定アルゴリズムの導出のためには, 最適な離散化手法の検討が必要である.

本研究は, 関西大学在外研究員制度によって行った.

参考文献

[1] Quinlan, J.R : C4.5 — Programs for Machine Learning, 1993.

[2] Liang, K.H., Krus, D.J., Webb, J.M. : k-fold Cross Validation in Canonical Analysis , pp.539-545, 1995.

連絡先

〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2-1-1
関西大学 総合情報学部
広兼 道幸
電話・FAX: 072-690-2402
Email: hirokane@res.kutc.kansai-u.ac.jp

ラフ集合の決定ルール分析法の提案

Proposal of Method Analyzing Decision Rules of Rough Sets

広川　美津雄　　井上　勝雄
Mitsuo Hirokawa　　Katsuo Inoue
東海大学短期大学部　　広島国際大学
Tokai University　　Hiroshima International University

Abstract : Although Rough sets with the nonliner feature is expected in the research of Design evaluation, it is a significant problem how to analyze a great deal of decision rules extracted from a decision matrix. Thus, the method to analyze and evaluate a lot of decision rules based on Covering Index of Rugh sets from a statistical viewpoint would be proposed. By the method of the proposal, the view of "column scores" corresponding to the category score used by Multi-variable analysis was defined and introduced. Therefore, there is a useful advantage that consideration of an analysis result can be performed easily. In addition, this "column scores" condenses the information on decision rules.The validity of this proposal would be verified using the case study of digital cameras.

1．研究の背景と目的

感性工学で逆問題を解く方法は、線形式の多変量解析で求めていたが、人の評価は非線形な特徴をもつため、今日の数理科学で紹介されている非線形式の手法が用いられ始めた。今日、その中でラフ集合を用いる方法が特に注目されている。

感性工学において、ラフ集合が非線形な特徴をもつということ以外に、注目されているもう一つの理由に、サンプル数と変数の数の制限がないことにある。実際に感性工学のための調査分析を行う際に、多くのサンプルを収集することは困難である。そのため、変数の方が多くなってしまうことが普通である。しかし、このように期待されるラフ集合ではあるが、決定行列からたくさんの決定ルールが求められ、多数の決定ルールの中から、どの属性を採用すればいいのかという課題がある。

そこで、本報告では、たくさん求めらる決定行列からの決定ルールを、決定ルール演算で一緒に求められるCI値をもとに統計的観点を加味して分析評価できる方法を提案する。これは多変量解析で用いられている目的変数に寄与する説明変数の関係を分析するのと似たような方法で考察ができるという利点がある。

2. 決定ルールの分析方法の提案

提案の方法を参考文献[1]で使われている具体的な例題を用いて説明する。

まず、表1にあるように、自動車の形態要素を原因とする属性、イメージ評価を結果として、17個のサンプルについて判定したデータを表2に示す。イメージの中で、「スポーツ」について演算で得られたすべての必然性の決定ルールを表3の右側に示す。評価クラスを結果とする全サンプルの内、ある決定ルールにあてはまるサンプルの占める割合をその決定ルールのCI値（Covering Index）とよび、その値も記した（計算方法は表内参照)。

この表から、スポーティな車をデザインするにはこれらのルールの内のいずれかを造形に取り入れればよい。しかし、CI値が低いものは該当例が少ないという意味で信頼性が低いので、CI値が高いものを考察の対象にする。また、属性数の多いものは実際の知識として有用でないので対象外とする

表1 自動車の形態要素とイメージ

●形態要素	
1. 丸み（線、面、角の）	(A) 丸い　(B) 中間　(C) 角っている
2. キャビンとボデーの関係	(D) 分離型　(E) 半融合型　(F) 一体化
3. ラジエータグリル	(G) 目立つ　(H) 小さい　(I) なし
4. ヘッドランプ	(J) 丸か曲面で表情あり (K) 長方形　(L) なし
5. ヘッドランプの側面への回り込み	(M) あり　(N) なし
6. バンパー	(P) ボデーと別色　(Q) モール付き　(R) 同色
7. ピラーの目立ち度	(S) リヤのみ太い　(T) センターもリアもやや太い (U) リヤのみやや太い
8. キャビンの大きさ	(V) 大きい　(W) 中くらい　(X) 小さい
●イメージ	
(1) スポーツ　(2) パーソナル　(3) ファミリー　(4) フォーマル	

表2 サンプルの形態要素とイメージ

サンプル U	形態要素 1	2	3	4	5	6	7	8	イメージ
1	B	D	I	J	N	R	U	X	1
2	A	E	H	J	M	R	S	X	1
3	B	D	H	K	M	R	S	X	1
4	A	E	H	J	M	R	S	W	2
5	A	E	I	J	N	R	U	X	1
6	C	D	G	J	M	Q	U	W	4
7	A	F	H	J	N	P	T	V	3
8	B	D	H	L	M	R	U	W	1
9	B	E	G	K	M	R	S	V	2
10	C	E	G	K	M	Q	S	W	4
11	A	F	G	J	N	R	S	W	2
12	A	E	I	L	N	R	S	X	1
13	B	D	G	J	N	R	S	W	4
14	A	D	I	J	N	R	U	X	1
15	C	E	I	L	N	R	U	X	1
16	C	F	G	K	M	P	U	V	3
17	A	F	H	J	M	R	S	V	2

表 3 決定ルールと CI 値の求め方

●U = 1	●U = 5	●U = 12	●U = 15
BU	I	I	CR
I	NE	L	I
NU	NU	NE	L
UR	UA	X	NC
X	UE		NE
	UR		NU
	X		UE
			UR
●U = 2			X
X			

(or)

●U = 3	●U = 8	●U = 14
BDM	BDM	DA
BH	BH	I
DH	BU	NU
DRM	BWM	UA
DSM	DH	UR
KD	DRM	X
KH	L	
X	UH	
	UR	

"X"の場合,
CI = 7/8 = 0.875

決定ルール	CI
BU	0.25
I	0.625
NU	0.5
UR	0.625
X	0.875
BDM	0.25
BH	0.25
DH	0.25
DRM	0.25
DSM	0.125
KD	0.125
KH	0.125
NE	0.375
UA	0.25
UE	0.25
BWM	0.125
L	0.375
UH	0.125
DA	0.125
CR	0.125
NC	0.125

というのが考察するときの指針となる。

前述したように、実際の問題となると決定ルール数が数百になることが一般的である。そこで、(1)CI 値が高くかつ属性数の少ない、つまり (2) 単独の属性を導き出す方法について提案する。提案の考え方としては、決定ルールは属性間の二項関係の情報が含まれていると考える。例えば、決定ルール「UR」は、「U: リヤのみやや太いピラー」で「R: バンパーが同色」ならばスポーティな車であるというのが、「0.625」の割合で信頼があるという情報としてみなす。また、決定ルールが「BDM」のような３つの場合は、「BD」と「DM」、「BM」に分解して、CI 値も３等分して分配する。

そのようなルールですべての決定ルールについて求めて組合せ表にする。組合せ表が完成した後、「コラムスコア (Column Scores)」と「累計 CI 値 (Total Covering Index)」、およびそれらの閾値と「組合せ率 (Combination Rate)」を数学式で表すと、次のようになる。

つまり、前述の組合せ表（n：属性数）を、

$$C(i,j) \qquad (i,j \leqq n)$$

とすると、コラムスコア CS_i は次式で求める。

$$CS_i = \sum_{j=1}^{n} C(i,j)$$

コラムスコア の閾値 CS_b は、

$$CS_b = \frac{\sum^{n} CS_i}{n} \times \frac{3}{2}$$

で、累計 CI 値の閾値 TC_b は、

$$TC_b = \frac{\sum_{i}^{n}\sum_{j}^{n} C(i,j)}{N} \times \frac{3}{2}$$

とする。ただし、N の値は組合せ表の中の累計 CI 値の総個数を示す。なお、3/2 は上位の閾値を示す。

次に、この閾値 TC_b 以上の組合わ表を、

$$C_{tc}(i,j) = C(i,j), \text{ if } C(i,j) \geqq TC_b$$
$$C_{tc}(i,j) = 0, \qquad \text{if } C(i,j) > TC_b$$

とする。ここで、p と q を次のように求めると、

$$p = \{ C_{TC}(i,j) > 0 \text{ の総個数 , when } CS_i > CS_b \text{ and } CS_j > CS_b \}$$
$$q = \{ C_{TC}(i,j) > 0 \text{ の総個数} \}$$

となり、この２つの値を用いると、組合せ率 CR は、次の式で求める（図１の中の四角の総個数が p で、太い四角の総個数が q ）。なお、この値が高いほど、属性間が相互に関連していることを示す。

$$CR = \frac{p}{q} \times 100$$

一方、図１の右端にある組合せパターンは、特に強い属性の単独または集まりを示している。この例では、単独の「I」と「X」が見出せる。「N」「R」

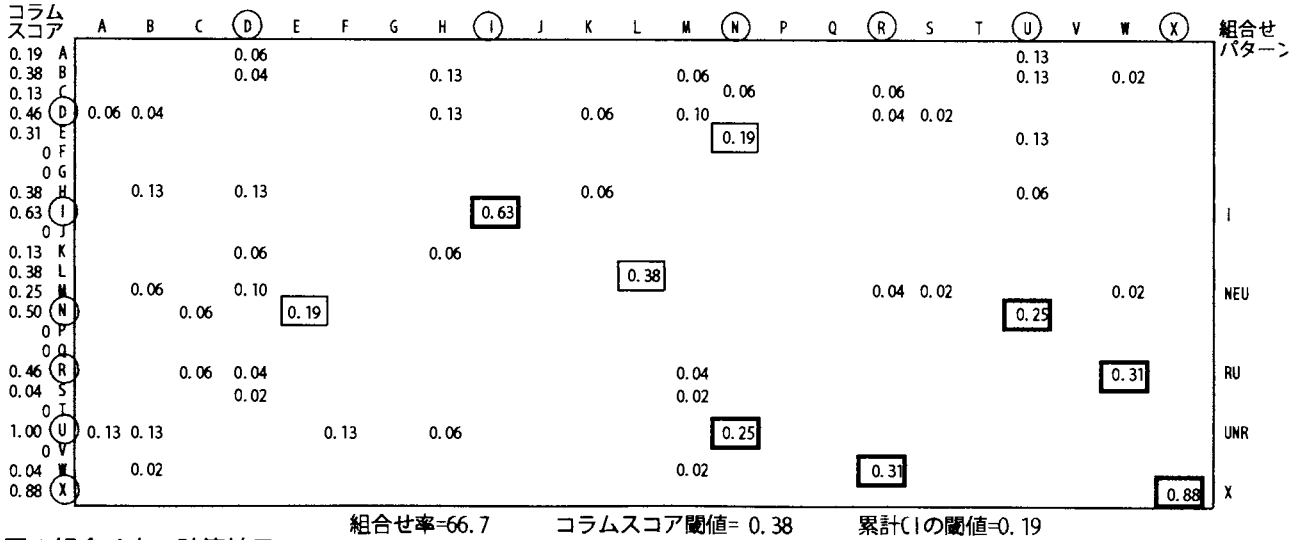


図１組合せ表の計算結果

「U」の組が強く見出せる。これは、図1の右側のCI値が高い決定ルールの情報をよく反映した結果でもある。これは、集約された決定ルールとみなすことも可能と考える。

3. 提案した分析方法の検証

感性工学において、逆問題を解く基本的な考え方は、図2に示すように、人間の製品に対する態度やイメージを具体的な形態要素に還元することである。データ解析的には、態度やイメージを目的変数にして、形態要素を説明変数にして逆問題を解くことになる。そこで今回は、デジタルカメラを事例として、態度とイメージの関係を正準相関分析で求め、イメージと認知部位（認知的な形態要素）の関係を提案した分析手法で求める。

まず、認知部位と態度・イメージ用語を抽出するため、市販されている30機種のデジタルカメラの製品カタログを用意して、被験者に、好きなデザインの製品を上位5位まで順序付けて、好きな理由をデザイン的な形態要素にいたるまで質問を繰り返した。こうして得られた「認知部位」を分類・整理して、17個のアイテム、50個のカテゴリーを抽出した。これらのアイテムをもとに、調査者らの審議でサンプル30について、それぞれのカテゴリーの記号を当てはめたのが表4の左側の部分である。続いて、「態度・イメージ用語」を抽出するために、被験者が発話した態度・イメージ用語を分類・整理してまとめた。これらの用語をラフ集合の結論（決定属性）として用いる。

次に、求められた7つの態度・イメージ用語に対して、各サンプルがどの程度該当するかを5段階評価で平均値を求めた結果が表4の右側である。

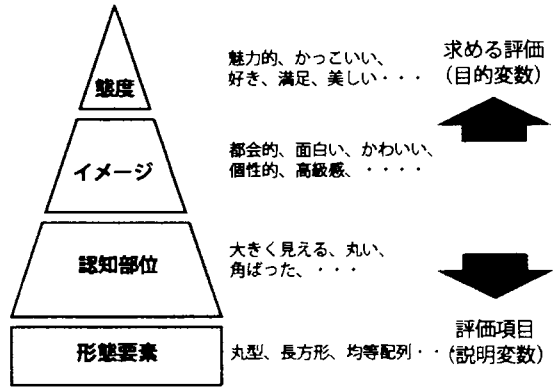


図2 態度やイメージと形態要素との階層的関係

さらに、5段階評価の中央値である「2.5」を境に、該当しない「1」と、該当する「2」を分けた。

正準相関分析を用いて、このデータを計算した結果、態度とイメージの間に次の関係を読み取ることができた。

(a) 審美性、新規性、かっこいいの3つを加味したものは、高級感とモダンなデザインが大きく寄与している。

(b) 新規性は、オリジナリティがあって、少し女性的なデザインと示されている。高級感は新規性に寄与していない。

(c) 審美性つまり美しさは、モダンで少し女性的なデザインと示されている。オリジナリティは美しさには寄与していない。

次に、表4のデータを用いて、イメージと認知部位の関係をラフ集合と本提案の分析手法で求める。例として、イメージの「オリジィナリティ」を決定属性、認知部位を条件属性として決定ルールを求めて本分析を行った。なお、本件のサンプル30×変数50を多変量解析で分析できない。

表5において、オリジィナリティがある場合

表4 デジタルカメラの属性表および態度とイメージの評価

No.	メーカー名	デジカメ機種	全体形状・構成						質感		部分形状									イメージ				態度		
			サイズ	奥行き	プロポーション	コーナーR	Rの方向性	レンズの位置	表面処理の特徴	素材	胴体の凸部（レンズを除く）	胴体に特徴的な溝・凹	広い面	レンズのサイズ	レンズカバー	レンズ部の可動	レンズ周りの装飾	グリップ	ファインダー形状	オリジナリティ	高級感	モダン	女性的	審美性	新規性	かっこいい
1	Panasonic	LUMIX LC40	B	E	I	M	N	P	T	V	b	e	g	h	m	o	q	u	y	2.50	3.00	1.67	1.50	2.33	2.33	2.33
2	Nikon	CoolPix2500	C	E	G	L	O	Q	U	X	b	d	f	j	k	n	s	v	z	3.83	2.33	2.83	3.67	2.83	4.17	2.17
3	Sony	Cyber-Shot U	C	E	J	M	N	Q	T	W	b	e	f	j	k	p	s	v	z	2.83	2.67	3.83	4.17	3.83	3.17	3.17
4	CASIO	LUMIX LC5	B	E	I	M	N	Q	T	V	c	e	f	j	m	p	s	v	x	3.33	2.17	3.33	3.33	2.67	3.50	2.33
	SANYO	DSC-MZ2	C	E	I	L	N	Q	S	V			g	j	l	o	s	u	z	1.83	2.00	2.67	3.00	2.33	1.83	2.33
26	TOSHIBA	Allegretto M25	B	E	I	K	N	P	U	X	b	e				o	s	v	y	2.83	3.50	2.50	1.83	3.33	2.33	
27	FUJI	FinePix F601	B	E	G	L	O	Q	T	V	c	e	f	j	l	o										2.67
28	CASIO	QV-2400UX	B	E	I	M	N	Q	U	X	c	e	g	j	m	n	r	t	z	4.00	2.17	2.33	2.33	2.17	3.00	2.00
29	MINOLTA	DiMAGE X	C	F	H	M	N	Q	T	V	c	e	f	j	m	p	s	w	y	3.17	3.00	3.33	2.83	3.33	3.00	3.00
30	CASIO	QV-R4	B	F	I	L	N	P	R	V	c	e	f	j	l	o	r	v	y	2.33	3.17	2.50	2.67	2.67	2.17	2.67

表5 ラフ集合を用いた分析の結果（オリジナリティ）

アイテム	カテゴリー				Y=2	Y=1
サイズ	大きい	A	0.18	0.16	0	0
	普通	B	2.04	1.21	0.3	0.755
	コンパクト	C	1.75	1.28	**0.95**	0
奥行き	厚い	D	0.37	0.16	0	0
	普通	E	1.94	1.2	**0.68**	**1.408**
	薄い	F	1.28	1.07	**0.82**	0
プロポーション	縦長	G	0.16	0.16	0.16	0
	ほぼ正方形	H	0.82	0.55	0.29	0
	横長	I	0.8	0.55	0.21	**3.033**
	かなり横長	J	0.21	0.21	0.21	0
コーナーR	大きい	K	0.63	0.47	0.16	0
	普通	L	1.81	1.1	0.48	0.212
	小さい	M	2.37	1.84	**1.2**	0.75
Rの方向性	二方向	N	2.63	2.34	1.7	0.212
	三方向	O	0.53	0.11	0	0
レンズの位置	中央側	P	0.93	0.47	0.11	**1.417**
	片隅	Q	3.27	2.64	**2.1**	0.727
表面処理の特徴（主たるテーマ）	鏡面・光沢	R	0.71	0.51	0.34	0.273
	ヘアライン	S	0.42	0.34	0.08	0
	艶消し	T	1.13	0.78	0.34	**1.848**
	シボ	U	3.87	3.08	**1.6**	0
素材	金属	V	1.53	0.78	0.21	0.555
	金属と樹脂	W	1.32	1.26	**0.74**	0
	樹脂・塗装含	X	0.89	0.44	0.05	0.182
胴体の凸部（レンズを除く）	大きい	a	0.16	0.16	0.16	0
	小さい	b	0.86	0.56	0.28	**3.25**
	ない	c	3.12	2.7	**1.8**	0
胴体に特徴的溝・凹	ある	d	0.16	0.16	0.16	0
	ない	e	0	0	0	**2.1**
広い面	ある	f	1.89	1.64	**0.85**	0.05
	ない	g	0.83	0.47	0.04	**1.29**
レンズのサイズ	大きい	h	0.46	0.21	0.16	0
	普通	i	0.36	0.17	0.08	0.39
	小さい	j	1.42	0.98	0.46	**0.84**
レンズカバー	スライド	k	0.26	0.26	0.26	0
	シャッター	l	0.38	0.05	0.05	0.72
	ない	m	1.46	1.07	**0.74**	0.14
レンズ部の可動	回転	n	0.11	0.11	0	0
	前後にズーム	o	0	0	0	**3.3**
	固定	p	0.32	0.32	0.32	0
レンズ周りの装飾	ある	q	0.26	0	0	0.14
	少し	r	1.16	0.69	0.39	0
	ない	s	2.48	2.05	**1.2**	**1.3**
グリップ	厚い	t	0.46	0.13	0.08	0
	薄い・凸形状	u	0.75	0.26	0	0.14
	装飾処理	v	2.42	1.82	**1.08**	0.3
	ない	w	0.42	0.24	0.08	0
ファインダー形状	丸	x	1.55	1.11	0.26	0
	四角	y	0.68	0.44	0.24	**1.69**
	ない	z	1.61	1.33	**0.93**	0
組み合わせ率 =			**49**	**70**	**71**	**100**
コラムスコア閾値 =			1.65	1.19	0.67	0.81
累計CIの閾値 =			0.1	0.11	0.11	0.17
決定ルールの数 =			**628**	**286**	**121**	**86**

(Y=2)、はじめ求められた決定ルール数は「628」で、それを本分析法で計算すると組合せ率は「49%」と低い値であった。決定ルール数をCI値が異なる値になるときを区切り目として「286」および「121」へと少なくして計算すると、表5の右下の四角枠に示すように「70%」および「71%」へと高い値になった。これ以上決定ルール数を少なくすると組合せ率は逆に低下するので、この最大となるところを考察するレベルとした。

同様にして、オリジィナリティがない場合（Y=1）も分析を行った。これらの結果において、Y=2およびY=1ともに高得点のコラムスコアになるものは、そのカテゴリーを考察から外した。表5の中では「E」と「s」である。このようにして、4つのイメージについて本分析を行った。

表5から、オリジナリティのある製品は「サイズがコンパクトで薄形で、コーナーRは小さく2方向で、片隅のレンズ位置で、シボ処理を施された広い面のあるフラットな、かつレンズカバーやファインダーのないデザイン」と解釈できる。これは、調査時点で各社から売り出し始めたカード型のデジタルカメラのデザインである。したがって、本提案の分析手法は現実を反映していると結論できる。

一方、態度やイメージの関係についてさかのぼると、例えば、前述の正準相関分析の結果から「新規性は、オリジナリティがあって少し女性的なデザイン」であるので、新しさを感じるデザインは、オリジナリティの認知部位に、女性的な認知部位である「レンズのサイズが小さめ」と「スライドレンズカバー」を加味することで表現できる。デジタルカメラ市場に女性層のユーザが急激に増大してきており、その造形的処理が新しさを感じるというのも納得できる結果であった。また、その他の態度についても同様であった。

4. まとめと今後の展開

ラフ集合の決定ルールを感性工学の観点から分析する方法を提案するとともに、その有効性をデジタルカメラの事例で検証することができた。

今後、この手法の事例研究の積み重ねにより、使い易くより精度の高い手法に改善してゆきたい。

参考文献

[1] 森典彦、高梨令：ラフ集合の概念による推論を用いた設計支援、東京工芸大学紀要、pp.35-38(1997)

[2] 井上、広川：認知部位と評価用語の関係分析、感性工学研究論文集、VOL.1 NO.2、pp.13-20(2000)

連絡先

〒108-8619 東京都港区高輪2-3-23
東海大学短期大学部　情報・ネットワーク学科
広川 美津雄
電話：Tel:(03)5475-7154（直通）
Fax：(03)3447-6005
E-mail：hirokawa@ttc.u-tokai.ac.jp

決定ルール分析法を用いた通勤電車内空間の快適性の研究

Research of Comfortableness of Space in Commuter Train using Decision Rules Analyzing Method

井上勝雄	山崎有紀	岡田　明	広川美津雄
Katsuo Inoue	Yuki Yamazaki	Akira Okada	Mitsuo Hirokawa
広島国際大学	株式会社オカムラ	大阪市立大学	東海大学
Hiroshima International University	Okamura Corporation	Osaka City University	Tokai University

Abstract: In order to verify the validity of the proposed decision rules analyzing method of Rough sets, the case study about the comfortableness of the space in a commuter train which is a train interior design especially liked by a young woman was performed. It is the report of the result. First, the attitude term, the image adjective, and the form element on a train interior design were extracted from the target subject using the evaluation grid method. And the questionnaire was conducted to samples of 45 kinds of train interior design, and the relation between an attitude term and an image was calculated by the multiple regression analysis. The relation between an image and a form element was analyzed by the decision rules analyzing method. Consequently, the relation between the attitude liked by a young woman and design elements was found and the result reflecting reality was obtained.

1 はじめに

報告者らが提案しているラフ集合の決定ルール分析法[1]の有効性を検証するために、通勤電車内空間の快適性、特に若い女性が好む車内デザインに関した事例研究を行った。その結果を報告する。

研究の方法は、求めようとする評価（女性が好む）を図1に示すように、具体的な形態要素（認知部位）に還元する感性工学の考え方を用いた。

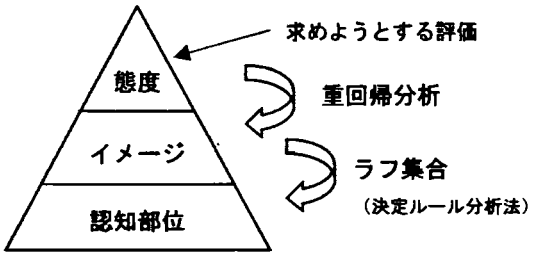


図1　研究の方法（感性工学的考え方）

2　調査実験の方法と考察

具体的方法としては、まず、用意した近郊通勤型車輌や特急車輌を含む電車の車内写真 45 種類をもとに、評価グリッド法（臨床心理的なヒアリング調査実験、2002 年 11 月）を用いて、対象の被験者（女子大生５名）から車内デザインに関する表１に示す４つの態度用語と 15 個のイメージ形容詞及び形態要素を抽出した。なお、形態要素は、11 アイテムと 37 カテゴリー（表３）である。

表１　態度用語とイメージ形容詞

態度	好き	乗りたい	楽しい	安心な
イメージ	落ち着いた	個性的な	スマートな	高級感のある　上品な
	清潔な	日常的な	新しい	統一感のある　はっきりした
	やわらかい	温かみのある	すっきりとした	開放感のある　明るい

次に、19 個の態度用語とイメージ形容詞を用いて、電車の車内写真 45 種類全てについて、女子大生 10 名に対して５段階尺度のイメージ調査（アンケート調査）を実施した。そして、このイメージ調査の平均値（車内写真 45 種類×19 個の語句）をもとに、各態度用語を目的変数、15 個のイメージ形容詞を説明変数にして重回帰分析を行った。その結果、態度に関与しているイメージとの関係が表２（偏回帰係数が高い順に記載）に示すように求められた。

表２　態度に深く関係しているイメージ

好き	高級感のある　はっきりした　スマートな　落ち着いた　明るい
乗りたい	高級感のある　はっきりした　清潔な　落ち着いた
楽しい	上品な　はっきりした　清潔な
安心な	日常的な　明るい　スマートな　落ち着いた

ラフ集合の分析を行うにあたって、前述の実験で抽出した形態要素をもとに、45 種類の車内写真全てについて、実験者らが表３の右端のアルファベットを当てはめた。この形態要素 35 カテゴリーと 45 種類のサンプルで構成された決定表をもとに、ラフ集

合の決定ルール[2]を求めた。そして、得られた多くの決定ルールを提案の決定ルール分析法で解析した。

表３　形態要素の内容

	アイテム	カテゴリー	
1	窓の開放感	大きい	A
2		普通	B
3		小さい	C
4	通路幅	広い	D
5		普通	E
6		狭い	F
7	シートのレイアウト形式	ロングシート	G
8		クロスシート	H
9		セミクロスシート	I
10	シートの厚み	厚い	J
11		普通	K
12		薄い	L
13	シートの形状	直線的	M
14		普通（どちらでもない）	N
15		曲線的	O
16	シート下の空間	有り	P
17		無し	Q
18	シートの色	赤系	a
19		青系	b
20		緑系	c
21		茶系	d
22		紫系	e
23		黒	f
24		その他	g
25	シートの色の色調	はっきりした色	h
26		中間（どちらでもない）	i
27		ぼんやりした色	j
28	シートの使用されている色の数	１色	k
29		２色	l
30		３色以上	m
31	シートの柄	目立って有り	n
32		目立たない程度に有り	o
33		無し	p
34	床の色	白系又は薄いグレー	q
35		茶系	r

例えば、提案の分析法で、「高級感のある」に関して求めた結果が表４である。同様にして、すべてのイメージ形容詞についても解析した。

表４　「高級感のある」に寄与する形態要素

・窓の開放感（大）	・通 路 幅（狭い）	・クロスシート形式
・シートの厚み（普通）	・シートの形状（曲線的）	・シートの色（青系）
・シートの色調（はっきりした色調）	・シートに使用されている色の数（2色）	・床の色（白系又は 薄いグレー）

本研究の目的である「若い女性が好む」という態度に関係しているイメージ形容詞は、表２から５つの語句から構成されているので、それらの結果を表５のように並べた。５つの形容詞に寄与する形態要素のアルファベットの中から、３つ以上同じものがある形態要素のアルファベットを求めると、表の下段に示すように「A・D・M・O・b・h・l・q」となる。これが「若い女性が好む」という態度に関係している形態要素になる。

表５　「好き」に寄与する形態要素の抽出

高級感のある	→	A ・F・H・K・O ・b・h・l ・q
はっきりした	→	A・D ・M ・O・P・b・h・l ・q
スマートな	→	A・D・L・M ・O・P・b・h・l・p・q
落ち着いた	→	D・G・H・K・O・Q・i ・l・p・t
明 る い	→	A・D ・M ・O・Q ・h・j・l・o
好き		A・D ・M ・O ・b・h・l ・q

分析結果から、若い女性が好む車内デザインの形態要素は求められ、それらを考察すると、次のように整理できる。つまり、若い女性が好むのは、

・壁に対する窓の比率は大きい
・通路幅は広い
・シートの形状は曲線的
・シートの色は青系
・シートの色ははっきりした色調
・シートに使用されている色の数は２色
・床の色は白系又は薄いグレー

を満足する車内デザインである。この結果を若い女性に提示して確認すると賛同が得られた。

３　まとめ

報告者らが提案しているラフ集合の決定ルール分析法の有効性を事例で確認できた。また、得られた結果は開発する際のデザイン設計要件としても使えることが見出された。

参考文献

[1]井上、広川：認知部位と評価用語の関係分析、感性工学研究論文集、Vol.1,No.2、 pp.13～20(2000)
[2]Shan,N. and Ziarko,W: An Incremental Learning Algorithm for Constructing Decision Rule, *Proceedings of RSKD'93*, pp.335-346(1993)

連絡先

〒724-0695　広島県賀茂郡黒瀬町学園台 555-36
広島国際大学 人間環境学部 感性情報学科
井上　勝雄
電話 ： 0823-70-4885
FAX ： 0823-70-4852
Email : k-inoue@he.hirokoku-u.ac.jp

ラフ集合の縮約を用いた番組選択パターンの抽出

Extraction of Selection Patterns for TV Programs by use of Reduct in Rough Sets

古屋繁
Shigeru Furuya
拓殖大学
Takushoku University

池田　敏彰
Toshiaki Ikeda
（株）ホロンクリエイト
Holon Create

Abstract: Though we can watch many TV programs by the diffusion such as BS and a cable television, it becomes difficult that we look for the program which we want to watch to increase the number of TV channels. The contents of TV Program such as the genre, contents and performer is made the term of decision, and viewers' program selection which means the frequency of the TV program which viewer have been watching is made the term of subordination.

In this paper, the tendency of the viewer's program selection was explained by using an abbreviation of Rough Set Theory.

As the result, about 70% of abbreviations corresponded with viewers' program selections. We clarify that the relation between viewers' program selections and the frequency of watching TV programs. Viewers are roughly classified into two groups. The first group consisted of subjects who demonstrates a set program selection and less channel surfing. The second group has no set program and shows more channel surfing. Criterion is established in each group by determining whether they watched programs or not.

1.研究の背景・目的

BSやケーブルテレビなど，現在テレビの多チャンネル化が進んでいる。多チャンネル化にともない，番組の内容も関しても、より視聴者のニーズにあわせて、細分化、専門化している。

CSデジタル加入世帯、CATV加入世帯、一般世帯それぞれのテレビ視聴態度に関する調査（表1）[1]によると，各世帯では、テレビ視聴をする前に番組の確認をしているにもかかわらず、実際はチャンネルを切り替えながら、番組を決めていることがわかる。特に、CSデジタル放送ではガイド画面（エレクトロニック・プログラムガイド：EPG）によって放送番組を検索する事ができる環境でありながら、活用されていない。

これは、放送番組の検索に時間がかかったり、操作に手間取り視聴者に負担をかけているためであろう。このようにたチャンネル化が進めば，視聴者が本当に見たい番組を選択することは困難であり、視聴者が見たい番組の選択を支援するしくみが望まれている（図1）。

表1　テレビ視聴態度の現状

［単位：%］

	CSデジタル加入世帯	CATV加入世帯	一般世帯
いろいろチャンネルを切り替えてから見る番組を決める	51.2	50.0	43.8
同時にいくつかの番組を楽しむために，チャンネルを切り替えながら見ることがよくある	49.2	49.1	47.6
何かほかのことをしながらテレビを見ることが多い	62.4	57.8	55.2
暇なときは，テレビをつけていることが多い	67.8	64.0	62.7
テレビを見る前に，番組表で確認する	72.9	73.2	77.9

テレビ視聴に関するグループインタビューによると，以下のことがわかっている［2］。

（1）番組選択を決定づけている要素として「ジャンル」以外の要素も重要。

（2）番組選択は視聴者の好みの番組のパターンと放送されている番組との適合の度合いで決まる。

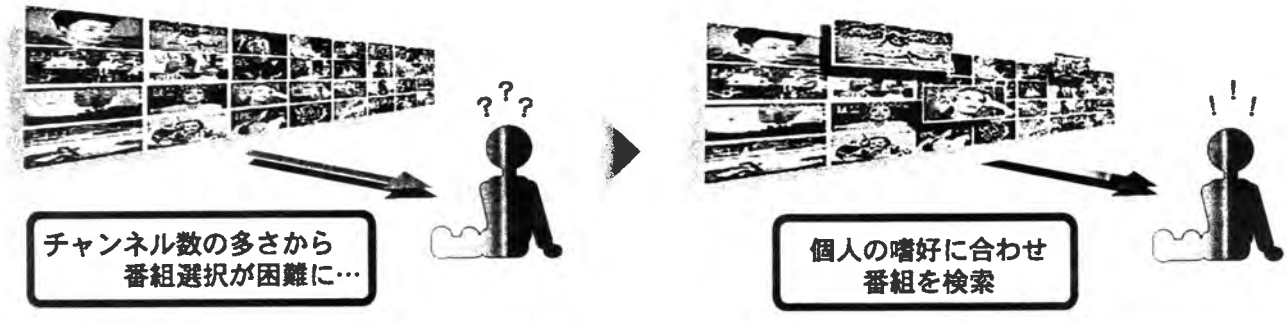


図1　番組選択支援システムのイメージ

（3）視聴者の視聴行動は「視聴者個人の好み」「放送番組に対する集中度」が影響している。

そこで，本研究では，現行の多チャンネル化のなかで番組選択支援システム構築のために，上記のような条件を考慮した視聴者がもつ番組選択パターンの抽出をラフ集合理論［3］を用いておこなった。

2.番組選択のもとになる因子

現行のEPGでの番組内容は、より細分化された放送番組のジャンルによってデータ化されている。しかし、これではジャンルでしか番組を検索することしかできないために、視聴者が見たい番組を探しだすことは困難である。

放送番組に違いを表わすことができ、また、ジャンルだけはなく、ジャンル以外の番組選択因子を抽出する必要がある。そのために、視聴者が放送番組に対してどのような違いを見出しているのかを調査する事によって、放送番組の違いを明らかにし、放送番組のグループ間及び放送番組間の関係から新たな番組選択因子を抽出できるもの考えた（図2）。

調査は、（1）ジャンルに拘らず42タイトルについて、（2）放送番組を8ジャンルに分け、それぞれのジャンルごとに調査分析を行った。調査方法は似ているもの同士を分類、グループ化することで知られているMDA-OR［4］によって行った。。

調査（1）情報・教養番組と娯楽番組に大きく分類することができ、情報・教養番組では情報の質や広がり、娯楽番組では出演者や番組の雰囲気がそれぞれの番組の内容を決定づけていると考えられる。

調査（2）については、「実用・教育・趣味」「ニュース」「音楽」「娯楽」「アニメ」「ドラマ」「スポーツ」「スポーツ情報」の8ジャンルについて行い、その結果をまとめると、情報提供番組には情報を伝える番組とエンターテイメント性を重視した番組に分けることができた。また、娯楽番組は、視聴者の年齢層や番組のの雰囲気、エンターテイメント性を重視した番組、知識や教養を得ることができる番組、ゲストとの対談や交流のある番組等に分類することができた。

また、両調査の結果、情報番組と娯楽番組の関連性が重要であることがわかった（図3）。

以上の調査より各番組の違いが現れるように配慮し，表2に示した番組選択の決め手である番組選択因子を抽出することができた。アルゴリズムの検討に用いた番組選択因子との違いは「出演者の属性」「番組の雰囲気」「スポーツ」「時間帯」の項目の追加である。

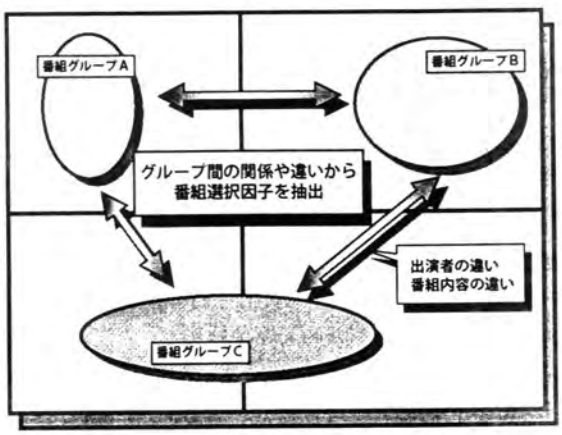


図2 番組選択因子の抽出

3.番組視聴の特性

視聴者の番組に対する好みは番組の視聴時間に現れる。これは、実際の番組選択支援システムを考えたとき、視聴者の好みを番組の視聴時間に変換したデータを扱うことにより各放送番組に対する好みを抽出する事ができると考えるられる。しかし、ここでの問題は視聴番組に対して視聴時間を抽出する際、どれだけの時間を視聴すると「見ている」或いは「見ていない」のかを区別する基準の設定が必要であるということである（図4）（この基準値を視聴時間のしきい値とする）。そこで、ビデオテープに視聴番組を録画することによって視聴履歴調査を行い、視聴時間のしきい値についてラフ集合理論の解析結果をもとに検討を行った。

視聴履歴調査は20代から60代までの男女で6名で、3カ月間の毎日午後6時から午前0時まで見ていた番組を録画してもらった（図5）。調査結果

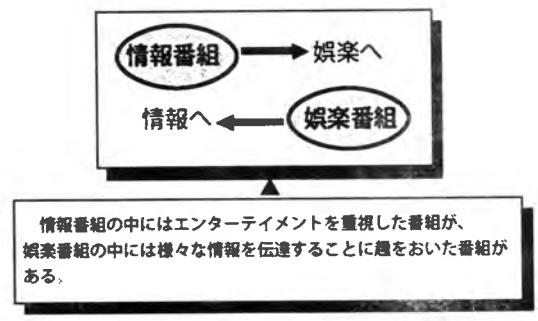


図3 情報番組と娯楽番組の関連図

表２ 番組選択因子

映画	自然・科学
ドラマ	出演者の人気・話題・カリスマ
アニメ	出演者の活躍
スポーツ	出演者の意外性
コメディー	出演者の容姿の格好良さ
娯楽	出演者がコメディアン
	出演者が俳優・アイドル・アーティスト
	キャスター・コメンテーター
	アナウンサー・ナレーター
	視聴者・素人
	ストーリー
	コミカル
	くだけた内容
	シリアス
	ゲストとの対談・交流
	情報・テーマの絞り込み
	多様な情報・テーマ
	役に立つ
	専門的
	知的
	日常を話題
	家族向け
	子供向け
	若者向け
	年配向け
	一般向け
	特定者向け
	期間限定
	毎回連続
	番組時間内で連続
	コーナーに分化
	シリーズ化
	ダイジェスト
	生放送
	球技
	力
	スピード
	個人競技
	スポーツ以外
	午後６時～午後７時
	午後７時～午後１０時
	午後１０時～午後１１時
	午後１１時～午前０時

を書き起こし、各被験者の放送番組に対する視聴時間を抽出した。

視聴履歴調査から視聴者のグループ（ほぼ視聴番組が決定しており、習慣化され、番組放送途中でチャンネル変更をほとんどしないグループＡと番組途中でよくチャンネルを変更しているグループＢ）によってしきい値が変化していることが分かった。

次に、しきい値を変化させない場合と変化させた場合のラフ集合理論の解析結果がどのように変化しているかを調査分析するために、視聴行動に特徴があった被験者３名について解析を行い、その結果を比較、考察をした。

具体的な、しきい値の設定であるが、しきい値を変化させない場合は表３のようにした。また、しきい値の操作は表４のようにしきい値を上下させ、特に、視聴者の番組視聴の習慣性に着目し、視聴習慣がある番組についてはしきい値を下げ番組を見る方向へ、無い場合はしきい値を上げ見ない方向へと変化させた（表５）。

習慣性がある番組はよく見る方向へ、習慣性が無い場合は見ていない方向へ結果が現れた。この結果は、番組の視聴時間の長さより視聴番組の習慣性に着目したことによって、ザッピングの多い被験者は視聴番組の視聴時間が短い傾向にあったが、視聴時間の短さに左右されず、しきい値の変化が結果に反映されたことを示している。

しきい値の変化はラフ集合理論の縮約結果に表れ、しきい値の操作によって、より精度の高い結果

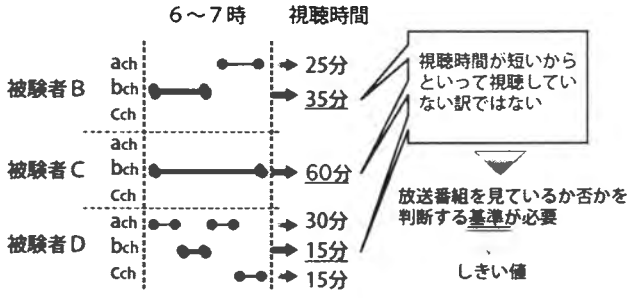


図４ 視聴時間のしきい値

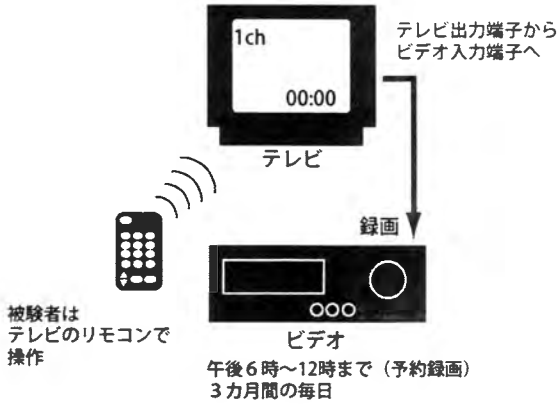


図５ 視聴履歴調査

表３ しきい値の基本設定

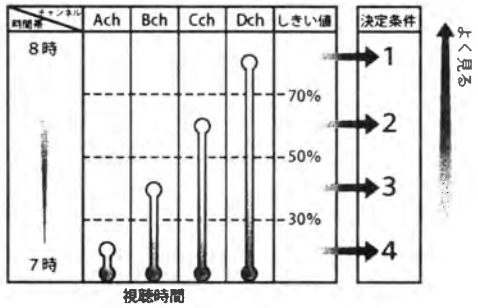


表４ しきい値の操作

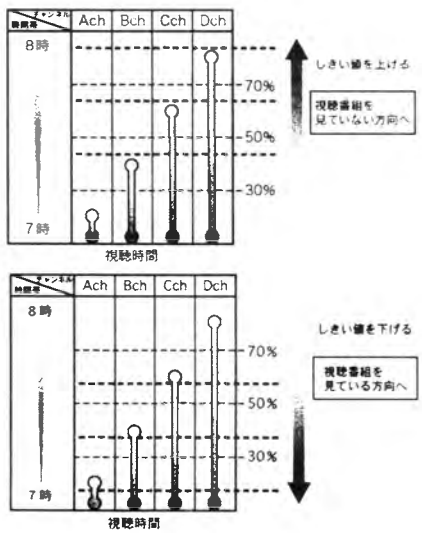


表5 しきい値の設定

視聴者グループ	視聴習慣	しきい値の設定
番組視聴に習慣性があるグループA	あり	基本設定値よりしきい値を下げる
	なし	基本設定値よりしきい値を上げる
番組視聴に習慣性が無く、ザッピングによって番組を選択しているグループB	あり	基本設定値よりしきい値を下げる
	なし	基本設定値（ただし視聴習慣が長期間現れなかった場合しきい値を上げる）

を得ることができるものと考えられる。

4.まとめ

本研究では、番組選択に必要な因子を抽出し、ラフ集合理論の縮約を視聴者がもつ番組選好のパターンと考え、視聴者の嗜好に合った推薦番組を抽出することができた。しかし、視聴者が毎回見ている番組の全てをラフ集合理論によって導きだすことができなかった点では、もっと精度を上げる必要がある。また、テレビ番組は時代や流行によって変化するものであり、これにより従属条件の値が変化する事が考えられ、番組内容についても多岐にわたっており、情報番組と娯楽番組の区切りが曖昧な番組も放送している。この様な放送番組の変化にどの様に対応するかが問題であり、より実践的な検討が必要であると考えられる。

参考文献・注記

[1] 上條昇、外薗博文：細分化・分極化・多様化の傾向を示す視聴者行動、郵政研究所月報、5月号、pp.53-81（1998）

[2] 池田 敏彰，高橋 靖，古屋 繁，村田 進一：番組選択行動における選択因子の抽出，デザイン学研究・第44回研究発表大会概要集，pp.109（1997）
池田 敏彰，高橋 靖，古屋 繁，村田 進一：ラフ集合理論における番組選択の決め手，デザイン学研究・第44回研究発表大会概要集，pp.185（1997）

[3] 中村昭、横森貴、小林聡、谷田則幸、米村崇、津本周作、田中博：ラフ集合 - その理論と応用 -、数理科学、7-12月号（1994）

[4] 杉山和雄、井上勝男：EXCELによる調査分析入門、海文堂出版、pp.79-91（1996）

連絡先

〒193-0895
東京都八王子市館町815-1
拓殖大学工学部工業デザイン学科
古屋　繁
電話：0426-65-8549
FAX：0426-65-1519
Email：sfuruya@id.takushoku-u.ac.jp

ラフ集合と恒等写像モデルによる最適解の比較研究

Study on Comparison between Condision Part of Dicision Rule Using Rough Set and Optimum Solution Using Identity Mapping Model

榎本　雄介
Yusuke Enomoto
和歌山大学大学院
Graduate School of
Wakayama University

井藤　孝一
Kouichi Itou
和歌山大学大学院
Graduate School of
Wakayama University

原田　利宣
Toshinobu Harada
和歌山大学
Wakayama University

Abstract: When a new product is planned, the relationship between the attributes (cause) of the planned product and a specific evaluation (result) is obtained by using data resulting from a survey. This is a problem that explores a cause from a result, and we call that an inverse problem. Therefore, in this study, we applied rough set theory and an inverse reasoning system with a five layer neural network as a method for solving this inverse problem. And we compared the optimum solutions obtained by exploring the entire range of solutions space with condition parts of decision rules that were obtained by using rough set theory. Moreover, we also compared the result of quantification method II with condition parts of decision rules.

1　はじめに

商品企画を行う際，アンケート調査などを通じて，企画対象の属性（原因）と評価（結果）の因果関係を知識として得る試みがなされてきた．これは「結果から原因を探る問題」であり，これを逆問題という．一般に，この逆問題を解くことは難しい．Neural Network and Genotic Algorithmなどの手法により，この逆問題を解いても，１つもしくは数個の最適解を得ることができる．しかし，１つもしくは数個の最適解を得られても，それがすべてなのか，もっとよい解が存在するのではという疑問が残る．一般的に，逆問題において，評価を満たす属性・属性値（アイテム・カテゴリー）の組み合わせは１つではなく，複数個存在する．つまり，この解空間の全体を把握した上で複数の最適解を求めて，はじめて逆問題を解いたと考えられる．

そこで，本研究ではこの逆問題を解く手法として「ラフ集合」と「恒等写像モデル（５層型ニューラルネットワーク）」を利用した逆推論システム（以下，恒等写像モデル）に着目した．これら２つは「多様解を得る」という共通の特徴がある．第一に，本研究では，オーディオ製品をケーススタディとし，被験者40人に対して，オーディオ製品に対する選好調査を実施した．第二に，その調査に基づいて，ラフ集合によって，各被験者の選好を満たす決定ルールの条件部（以下，ルール条件部）を，恒等写像モデルによって最適解を推論した．第三に，ラフ集合によって得られたC.I.の高いルール条件部と，恒等写像モデルによって解空間を全探索して得られた最適解の比較実験を行い，それぞれの特徴を考察した．また，最適解，ルール条件部と数量化理論第Ⅱ類の効用値算出結果の比較も併せて行った．

2　オーディオ製品のカテゴリー分類と選好調査

本研究では，実験に用いるオーディオ製品の価格，機能，ユニット数をユーザーに対する調査を通して，９アイテム29カテゴリーに分類した（表１）［注１］．また，アンケート調査において，市販されているオーディオメーカー９社の製品47機種の外形と機能を見せ，各オーディオ製品の選好を「購入したいと思う」，「どちらでもない」，「購入したいと思わない」の３段階で被験者40人に回答してもらった．

3　恒等写像モデルを利用した逆推論システム

3.1 恒等写像モデルとは

ニューラルネットワークのモデルは，多層パーセプトロン型やポップフィールド型など学習パタンとネットワークの形状によって，いくつかの種類に分類される．恒等写像モデルの特徴としては，中間層において対称になるようなネットワーク形状と，教師信号として入力パタンと出力パタンに同じものを用いることである［注２］．その利用方法として，まず，学習後に真ん中に位置する中間層で切り離す．次に，ある入力パタンを入力し，切り離した中間層における出力パタンを入力パタンの圧縮情報として取り出す．

さらに，その圧縮情報の中から最適解を導出す

表1　アイテム・カテゴリー一覧

アイテム	カテゴリー	ラフ集合用記号	恒等写像モデル用正規化データ
価格	0～30,000円	a1	0~0.012
	30,001～40,00円	a2	0.012~0.115
	40,001～50,000円	a3	0.115~0.218
	50,001～100,000円	a4	0.218~0.732
	100,001円～	a5	0.732~1
最大出力	0～30W	b1	0~0.174
	31～50W	b2	0.183~0.357
	51W～	b3	0.366~1
音に関する機能	1機能のみ	c1	0
	2機能	c2	0.33
	3機能	c3	0.67
	4機能	c4	1
MDLP	なし	d1	0
	あり	d2	1
MD倍速録音	1倍のみ	e1	0
	2倍	e2	0.33
	4倍	e3	1
MDチェンジャー	なし	f1	0
	あり	f2	1
CDチェンジャー	なし	g1	0
	3枚	g2	0.5
	5枚以上	g3	1
カセットデッキ	なし	h1	0
	あり	h2	1
本体構成ユニット数	1～2ユニット	i1	0~0.2
	3ユニット	i2	0.4
	4ユニット	i3	0.6
	5ユニット	i4	0.8
	6ユニット以上	i5	1

る情報を任意に選択し，その情報を入力パタンとして切り離した中間層（切り離した後の入力層）に再び入力して出力パタンを求める．

3.2 最適解の抽出

本研究で用いた恒等写像モデルを利用した逆推論システムの模式図を図1に示す．以下にその詳細を示す．

①オーディオ製品の機能に関する項目空間の恒等写像モデルの学習

オーディオ製品の機能に関する項目（以下，機能情報）空間の恒等写像モデルの学習を行う．本研究では，機能情報が9項目であるため，入力層と出力層のユニット数を9とし，第2層，中間層，第4層のユニット数を複数試みた結果，最も入出力誤差が少なかった（15,3,15）を採用した．また，中間層を3ユニットとしたのは，ここから出力される3つのパタンをそれぞれ，3次元空間（XYZ直交座標系）のX軸，Y軸，Z軸の値に見立てるためである．ここで，学習用の教師信号には，前述のサンプル（47機種）における，各アイテムの機能の値が最大のものを1，最小のものを0として正規化したものを用いた（表1）．

②機能情報と選好結果のニューラルネットワークの学習

学習された機能情報の恒等写像モデルを中間層のところで切り離す．次に，もう一度ネットワークに各サンプルの入力パタンを入力して，それぞれの中間層における出力パタンを求める．この出力パタンを圧縮情報と呼ぶ．

さらに，各サンプルにおける圧縮情報を入力パタンに，選好結果［購入したいと思う(0,0,1)，どちらでもない(0,1,0)，購入したいと思わない(1,0,0)］を出力パタンとする教師信号で，新たなニューラルネットワークを定義し学習を行う．このニューラルネットワークのことを知識ベースと呼ぶ．この知識ベースの作成は，各被験者毎に行った．このニューラルネットワークにおける学習では，入出力ユニットを3とし，中間層におけるユニット数は15～21の間で各被験者において最も誤差の低いものを用いた．

③誤差空間の定義

圧縮情報として，3ユニットの出力パタンを用いることにより，1辺が1の3次元空間と捉えることができる．この3次元空間を圧縮情報空間と呼ぶ．圧縮情報空間のどの位置において「購入したいと思う」という選好結果を満たす機能となるのか詳細に調べるため，この空間のX,Y,Z軸をn等分した．各座標値 $X_{ijk}, Y_{ijk}, Z_{ijk}\ (0 \le i \le 1, 0 \le j \le 1, 0 \le k \le 1)$ すべてに対して，知識ベースにその値を入力し，その時の出力パタンと目標となる選好結果の各ユニット値の差の二乗和 δ_{ijk} を誤差として求める．本研究では，nの値を10（Z=0.0,0.1,0.2…,1.0の11断面）とし誤差を求めた．ここで圧縮情報の各入力パタンを知識ベースに入力して得た出力パタンを $X_{out_{ijk}}$，$Y_{out_{ijk}}$，$Z_{out_{ijk}}$ とすると

$$\delta_{ijk} = (X_a - X_{out_{ijk}})^2 + (Y_a - Y_{out_{ijk}})^2 + (Z_a - Z_{out_{ijk}})^2$$

と定義される．

④誤差空間の視覚化

圧縮情報空間のそれぞれの座標値に，それぞれの座標における誤差 δ_{ijk} の情報を加えた4次元空間を誤差空間と定義した．実際には，人は4次元空間を認識できないため，この誤差空間は，圧縮情報空間をZ軸において，10等分して，それぞれの切り口を1枚の層として捉え（CTスキャン写真を撮るように），その切り口各々に対してX軸に x_{ijk}，Y軸に y_{ijk}，Z軸に δ_{ijk} をとった図として表した．ある被験者Aにおける，誤差空間の一例を図2に示す．本研究では，誤差が0.01以下の圧縮情報を最適解を導出する圧縮情報と見なした．

⑤最適解の探索

視覚化した誤差空間から最適解を導出する圧縮情報を探索する．その探索された圧縮情報を先に

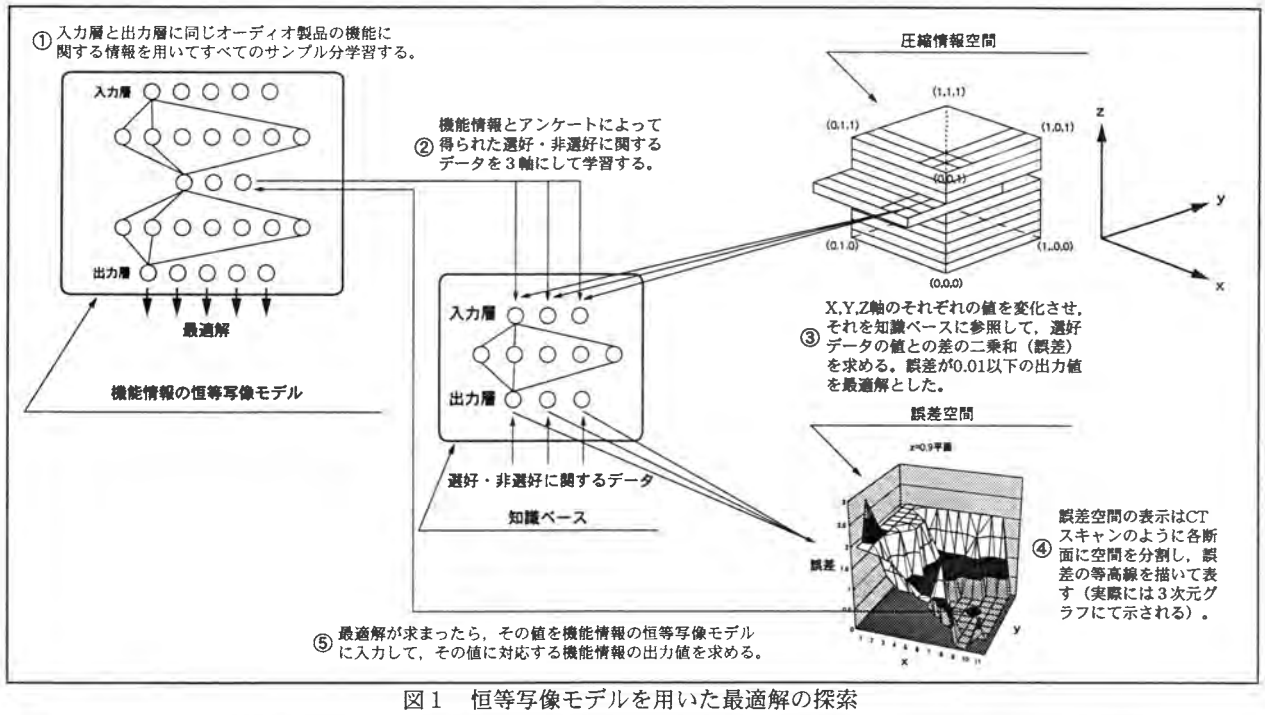


図１　恒等写像モデルを用いた最適解の探索

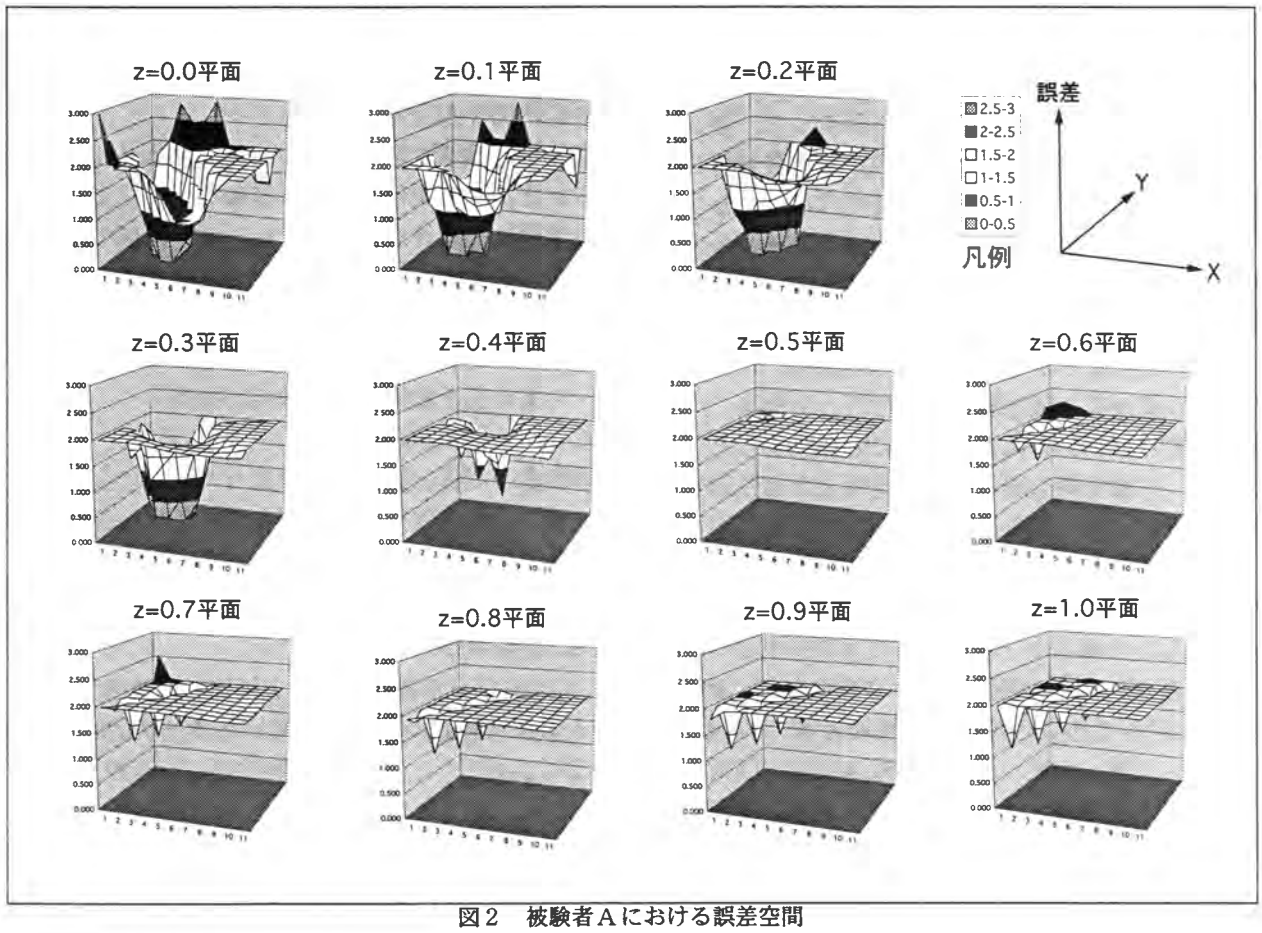


図２　被験者Ａにおける誤差空間

学習済みの機能情報の恒等写像モデルの中間層に入力し，出力パタンを求める．この出力パタンが最適解となる．

4　比較シミュレーション

4.1 ルール条件部の総数，最適解総数と選好サンプル数の比較

本研究は，アンケート調査による被験者 40 人の選好から，ラフ集合によってルール条件部（C.I. の高いものから最大 100 個）と，恒等写像モデルによって最適解（誤差が 0.01 以下のもの）を算出

表２　相関係数一覧

最適解総数ールール条件部総数	ルール条件部総数ー選好サンプル数	最適解総数ー選好サンプル数
0.709	0.773	0.859

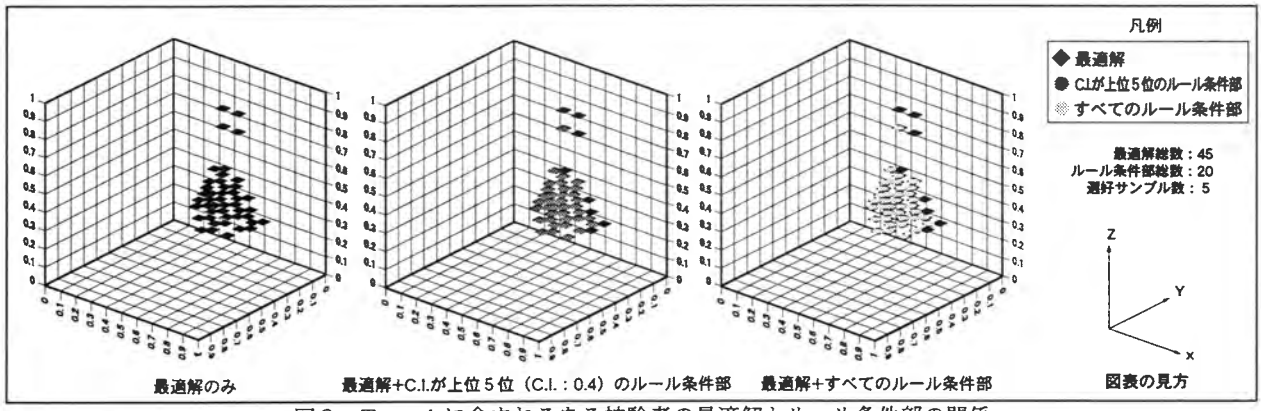


図３　Type Ａに含まれるある被験者の最適解とルール条件部の関係

した．その結果，ルール条件部の総数，最適解総数と選好サンプル数の間に強い相関関係が見られた（表２）．

4.2 ルール条件部と最適解における出力パタンの比較

ルール条件部と最適解を比較し，最適解の中にルール条件部がいかに含まれるかを調査した．まず，比較を行うために，連続量で表された最適解をラフ集合で用いたカテゴリーに当てはめなおした．本研究では，最適解の中に１つ以上ルール条件部が含まれていた場合，その最適解をルール条件部がカバーしていると考えた．ルール条件部のC.I.が上位５位までのものと最適解の比較，すべてのルール条件部と最適解の比較を行った結果，被験者の選好パタンを大きく３つに分類することができた．圧縮情報空間中に，最適解となる圧縮情報の位置と，ルール条件部を含んでいた最適解となる圧縮情報の位置をプロットしたものである．その一例を図３に示す．

type Ａ）C.I.の高さが上位５位までのルール条件部が，大半の最適解の中に含まれた（図３）．このような結果は被験者40人中４人に見られた．これらの被験者は，選好サンプル数，ルール条件部の総数，最適解総数が少なく，上位５位までのルール条件部のC.I.が比較的高いという特徴が多く見られた．つまり，選好課程において，その選好基準（機能に対する価値観）が，１つ，もしくは２つに絞られた被験者であることが推察された．

5　今後の予定

現在の研究では，ラフ集合によるルール条件部と恒等写像モデルによる最適解の比較を行ったが，シンポジウム発表までに数量化理論第Ⅱ類による効用値算出結果との比較を行う．

6　まとめ

本研究により，以下のことが確認された．

１）選好するサンプル数とルール条件部，最適解の間に関係が見受けられた．

２）75%の被験者において，ラフ集合によって得られたルール条件部と恒等写像モデルによる最適解に一致性が見られ，ルール条件部の組み合わせによって最適解が表されている可能性がうかがわれた．

３）選好するサンプルの数や選好基準により，ルール条件部と最適解の一致性が異なる．

ただし，今後の課題として，

被験者の回答と選好基準によって，どのようにルール条件部と最適解が変化するのか調べる必要がある．

注および参考文献

［１］榎本雄介，原田利宣，井上拓也，森典彦：多人数併合縮約システムを用いたオーディオ製品の選好分析，デザイン学研究，Vol.49，No.5，11-20，2003

［２］原田利宣，森典彦：恒等写像モデルを応用した多様解，デザイン学研究，Vol.41，No.1，51-58，1994

連絡先

〒640-8501

和歌山県和歌山市栄谷930番地

和歌山大学大学院システム工学研究科（原田研究室）

榎本　雄介

E-Mail：s035009@sys.wakayama-u.ac.jp

多人数間における併合順序の併合ルール条件部への影響

Influence of Annexation Order to Plural Annexation Condition Parts of Decision Rules

井藤　孝一
Kouichi Itou
和歌山大学大学院
Graduate School of
Wakayama University

榎本　雄介
Yusuke Enomoto
和歌山大学大学院
Graduate School of
Wakayama University

原田　利宣
Toshinobu Harada
和歌山大学
Wakayama University

Abstract: Mori proposed an algorithm annexing condition parts of decision rules in order to derive common the condition parts of decision rules of plural people. A system that annexes plural condition parts decision rules by using Mori s algorithm was developed by Inoue et al.. However, in existing researches, influence of annexation order to annexation condition parts of decision rules have not been discussed. In this research, we defined three kinds of annexation methods, and investigated how the annexation condition parts of decision rules derived would differ among these methods. As a result, it was observed that the annexation condition parts of decision rules were fairly influenced by the annexation order.

1　はじめに

森らによって多人数のルール条件部（Condition Part of Decision Rule［以下，ＤＲ］）を併合して，多人数に適応する併合ＤＲを算出する考え方が提案された［注１］．また，井上らによって森の考え方を応用して，多人数のＤＲを併合するシステムが提案された［注２］．しかし，従来の研究では，併合順序が併合ＤＲへ及ぼす影響については論じられていない．そこで，本研究では３つの併合方法を定義し，それらの併合ＤＲがどのように変化するのかを調べた．その結果，併合の順序によってＤＲにある程度影響を与えることが明らかとなった．

2　併合方法がＤＲへ及ぼす影響

2.1　ＤＲの併合

実際のデザインコンセプト立案においては，多くのユーザをできる限りカバーするＤＲの抽出が求められる．そこで，多人数の被験者から得られたＤＲから，各被験者の選好に関するＤＲ（選好ＤＲ）を求め，それらを併合するシステムを考える．これは，図１に示すように，被験者をＳ１，Ｓ２の２名とすると，被験者それぞれから得られた選好ＤＲを総当たりで併合していくというものである．このとき，ある被験者の選好ＤＲが他に被験者の非選好に関するＤＲ（非選好ＤＲ）を含んでいる可能性がある．この場合，その併合ＤＲは非選好ＤＲに当てはまる被験者をカバーしたものとは言えない．ここで，ある併合ＤＲがカバーできる被験者数の被験者総数に対する割合を，S.C.I.（Subject Covering Index）と定義した．このS.C.I.は，その値が高いほど多くの被験者をカバーしており，その併合ＤＲは信頼性の高いものと考えることができる．以上のアルゴリズムからなるシステムを多人数ＤＲ併合システムと呼ぶこととする．

2.2　従来の併合方法

従来のＤＲの併合に関して，井上らによって提案されたシステムを，被験者Ｓ１，Ｓ２，Ｓ３の３人と限定し，図２を用いて説明する．

１）Ｓ１，Ｓ２，Ｓ３の選好ＤＲを求める．
２）Ｓ１，Ｓ２の選好ＤＲを総当たりで併合する．併合の際に，同じアイテムの違うカテゴリを同時に満たすことはできないので，その場合の併合ＤＲは除く．
３）得られた併合ＤＲとＳ３の選好ＤＲを総当たりで併合する．ここで得られた併合ＤＲはＳ１，Ｓ２，Ｓ３の選好を満たす併合ＤＲである．
４）得られた併合ＤＲとＳ１，Ｓ２，Ｓ３の非選好ＤＲとの比較を行い，S.C.I.を算出する．

例えば"abde"はＳ１の非選好ＤＲを含んでいないので，Ｓ１をカバーしている．しかし，Ｓ２，Ｓ３の非選好ＤＲ"bd"，Ｓ３の非選好ＤＲ"be"を含んでいるので，Ｓ２，Ｓ３はカバーしていない．よって，併合ＤＲ"abde"は３人中１人をカバーしているのでS.C.I.は1/3となる（図3）．ここで，このシステムの問題点として，各被験者の選好ＤＲをすべて併合していくと，膨大な量の併合ＤＲが得られることが推察される．被験者１人あたり100個のＤＲを併合すると２人併合するだけで

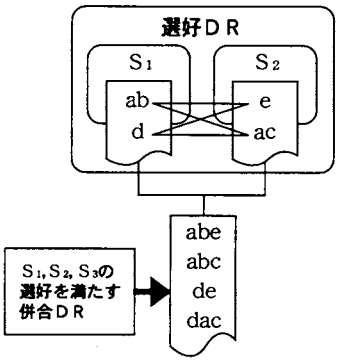


図1　DRの併合

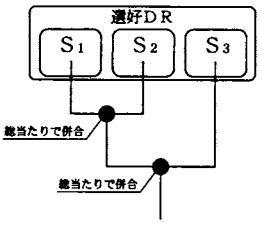


図2　従来の併合方法

10000個近くの併合DRを得ることとなる．被験者数をn人とした場合，併合DR数はn乗倍，すなわち指数関数的に増大することから，DR数の圧縮，厳選が必要となる．そこで，図4に示すDR数圧縮システムを考える．被験者を（S1，S2，S3，・・・，Sn）のn人としたとき，

1）各被験者の選好DRをC.Iの高いものから順に100個ずつ抽出する．
2）S1，S2の選好DRを総当たりで併合する．
3）得られた併合DRについてDR長（DRを構成するカテゴリ数）の短いものから順に100個抽出する．ただし，ここで100個としたのは，次章で述べる実験のサンプル数，カテゴリ数を考え，100個が妥当であると考えたからであり，この数は分析内容によって可変である．これより多くてもよいが，メモリや計算時間が多くなる．
4）抽出した100個の併合DRとS3の選好DRを総当たりで併合する．
5）3）～4）を被験者Snまで繰り返す．
6）最終的に得られた併合DRのS.C.I.を求める．

というものである．

2.3　新たな併合方法

前節におけるシステムでは，10,00個近くの併合DRから100個の併合DRを併合の度に選出することで，併合の順序によって，最終的に求まる併合DRが異なってくるのではないかという疑問が生じる．そこで，本節では，併合する順番による影響を調べるために，前節と異なる2つの併合方法を提案する．ここで，従来の併合方法を［併合方法T0］，新しい併合方法を［併合方法T1］，［併合方法T2］とする．

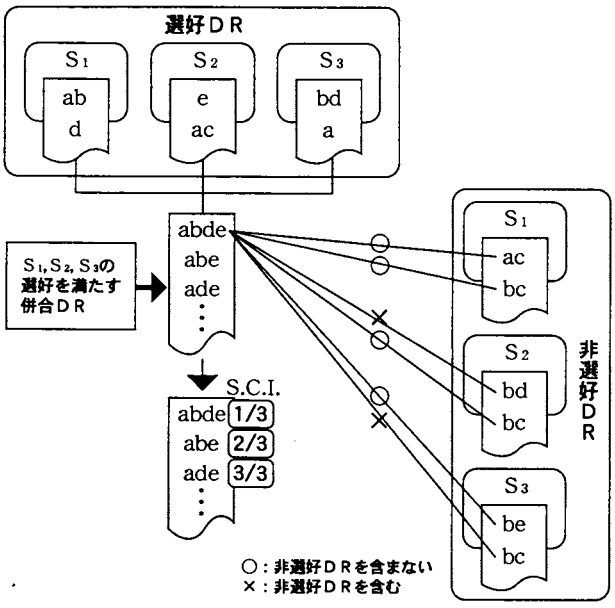


図3　S.C.I.算出

［併合方法T1］

1つ目の併合方法について被験者をS1，S2，S3，S4，S5，S6，S7，S8の8人と限定し，図5を用いて説明する．

1）S1とS2，S3とS4，S5とS6，S7とS8のように被験者2人で1つの組を作り，各組で併合DRを求める．
2）各組で得られた併合DRについてDR長の短いものから順に100個ずつ抽出する．
3）得られた併合DRの集合2つで1つの組を作り，各組で併合DRを求める．
4）2）～3）を併合DRの集合が1つになるまで繰り返す．
5）得られた併合DRとS1，S2，S3，S4，S5，S6，S7，S8の非選好DRとの比較を行い，S.C.I.を算出する．

ここで，被験者数が奇数の場合，2で割った際の余りの被験者の処理を考えなければならない．図6に示すように，S1から順に2人の組を作り，最後に余った被験者は次の段階でS1，S2の併合結果と併合させる．

［併合方法T2］

2つ目の併合方法について被験者をS1，S2，S3，S4，S5，S6，S7，S8，S9の9人と限定し，図7を用いて説明する．

1）S1とS2とS3，S4とS5とS6，S7とS8とS9のように被験者3人で1つの組を作り，各組で併合DRを求める．
2）各組で得られた併合DRについてDR長の短

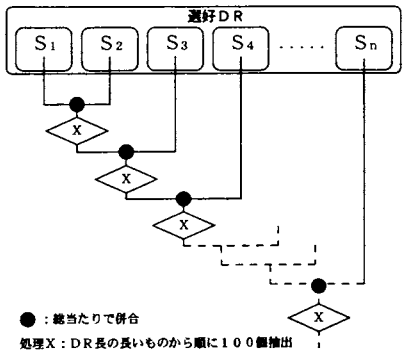


図4　DR圧縮システム

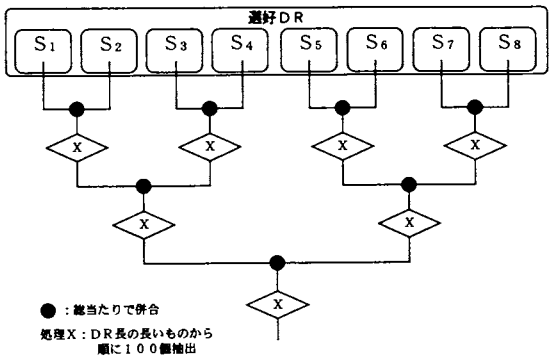


図5　併合方法T1（余り無し）

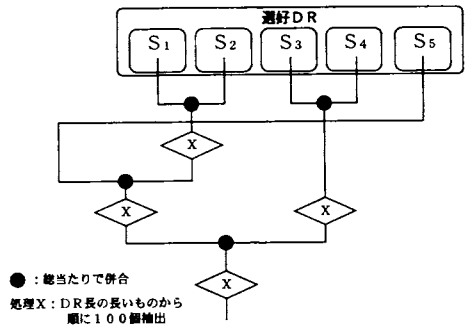


図6　併合方法T1（余り1）

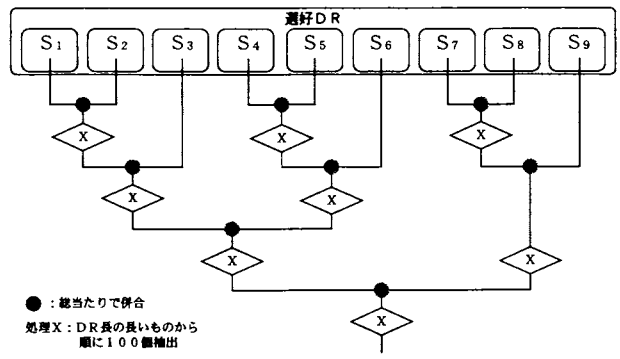


図7　併合方法T2（余り無し）

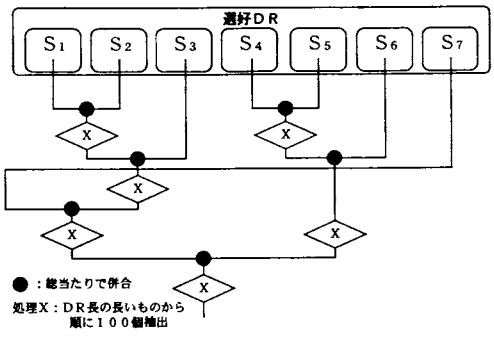


図8　併合方法T2（余り1）

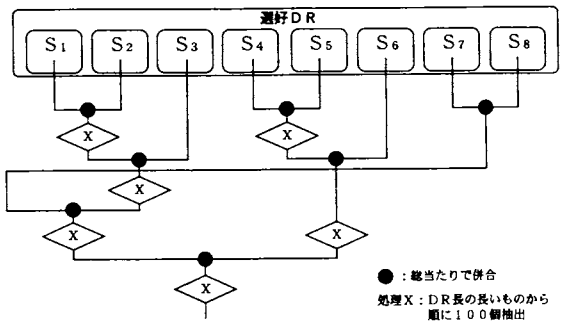


図9　併合方法T2（余り2）

いものから順に100個ずつ抽出する．

3）得られた併合DRの集合3つで1つの組を作り，各組で併合DRを求める．

4）2）～3）を併合DRの集まりが1つになるまで繰り返す．

5）得られた併合DRとS1，S2，S3，S4，S5，S6，S7，S8，S9の非選好DRとの比較を行い，S.C.I.を算出する．

ここで，被験者数を3で割った余りが1の場合，図8に示すように，S1から順に3人の組を作り，最後に余った被験者は次の段階でS1，S2，S3の併合結果と併合させる．また，被験者数を3で割った余りが2の場合，図9に示すように，S1から順に3人の組を作り，最後に余った被験者2人で併合を行う．この2人の被験者による併合結果を次の段階でS1，S2，S3の併合結果と併合させる．

3　3種の併合方法による併合DR算出とその比較

本章では前章までの3種類の併合方法により，実際にデータを用いて併合する順番による影響を調べた．以前，榎本らによってユーザのオーディオ製品の選好に影響を与えるDRを算出し，明確にすることを目的とした研究が行われた［注3］．この研究では，意識調査を行った結果を用いて，被験者41名を4つのクラスタに分類し，各クラスタにおける併合DRの算出を行っている．本研究ではこれら4つのクラスタにおける併合DRの算出を行い，それらの比較を行った．

1）各併合方法により各クラスタの併合DRを求める．

2）各クラスタについて，あるカテゴリが全併合

表1　20%一致率

	クラスタA(13人)	クラスタB(13人)	クラスタC(10人)	クラスタD(5人)	平均
T_0-T_1間	42.9%	54.5%	58.3%	69.2%	51.9%
T_0-T_2間	63.2%	54.5%	40.0%	76.9%	52.6%
T_1-T_2間	61.9%	57.1%	60.0%	61.5%	59.7%
平均	56.0%	55.4%	52.8%	69.2%	58.3%

表2　上位10個一致率

	クラスタA(13人)	クラスタB(13人)	クラスタC(10人)	クラスタD(5人)	平均
T_0-T_1間	40.0%	40.0%	70.0%	60.0%	50.0%
T_0-T_2間	50.0%	50.0%	60.0%	90.0%	53.3%
T_1-T_2間	60.0%	50.0%	70.0%	70.0%	60.0%
平均	50.0%	46.7%	66.7%	73.3%	59.2%

ＤＲに含まれる割合を各併合方法について算出する．

3）算出された割合が20%以上のカテゴリについて，２つの併合方法で同じカテゴリが抽出される割合（20%一致率）を算出する（表１）．

4）また，2）で算出された割合の上位10個のカテゴリについての一致率（上位10個一致率）を同様に算出する（表２）．

その結果，クラスタ別の平均を見てみると，20%一致率の結果については，他のクラスタと比べて，クラスタＤが高い一致率を示している．これは，クラスタＤが他のクラスタよりも人数が少なく，選好基準にずれが少ないためであると考えられる．上位10個一致率の結果について見てみると，全体的に20%一致率と同様の傾向がある．次に，併合方法別の平均を見てみると，20%一致率と上位10個一致率で，同じような結果が得られた．さらに，20%一致率と上位10個一致率の結果で分散分析を行ったところ，どちらとも有意差は得られなかった．このことから，３つの併合方法間で同じ程度の相違があると考えられる．また，一致率が５割強程度であるため，各併合方法による併合ＤＲの違いは無視できないものであると考えられる．

4　まとめ

本研究では以下のような成果があった．

1）従来の併合方法による併合ＤＲと新しい併合方法による併合ＤＲを比較することで，併合方法による結果の差がある程度あると推察された．

しかし，今後の課題には以下のようなものがあげられる．

1）今回は，カテゴリの一致率を算出することで，結果の差があると推定した．しかし，ラフ集合は本来カテゴリの組み合わせが重要あり，カテゴリの組み合わせの一致率を算出することで，さらに詳しく併合方法による結果の差を考察できると考えられる．

2）また，併合方法については他にも様々な方法が考えられる．そこで，様々な併合方法による実験を行う必要があると考えられる．

注および参考文献

[1] 森典彦：「ラフ集合と感性工学」，日本ファジィ学会誌，Vol.13，No.6，600-607，2001

[2] 井上拓也，原田利宣，榎本雄介，森典彦：デザインコンセプト立案へのラフ集合，デザイン学研究，Vol.49，No.3，11-18，2002

[3] 榎本雄介，原田利宣，井上拓也：多人数併合縮約システムを用いたオーディオ製品の選好分析，デザイン学研究，Vol.49，No.5，11-20，2003

連絡先

〒640-8501
和歌山市栄谷930番地
和歌山大学大学院システム工学研究科(原田研究室)
井藤孝一
E-MAIL：s045005@sys.wakayama-u.ac.jp

ラフ集合の決定ルールを用いた特徴把握の分析と、決定ルール併合の商品選好に対する適合性と有効性の観察

Analysis of Characteristics Grasping by use of Decision Rule in Rough Sets, and Investigation of Validity of Combining Decision Rule for Product Preference

熊丸　健一
Kenichi Kumamaru
東京工芸大学
Tokyo Polytechnic University

高梨　令
Rei Takanashi
東京工芸大学
Tokyo Polytechnic University

Abstract : The author's former research has been done under the following supposition. When characteristics grasping is exactly done, attribute sets as a characteristics is same as decision rule. The first purpose of this research is to verify the supposition that characteristics is same as decision rule by using sample. As a result, It was found out that characteristics grasping exactly done by all subjects is same as decision rule.

The second purpose is to verify validity of combined decision rule. As a result it was found out that combined decision rule between prefered products of one subjects is much prefered, and combined decision rule between prefered products of different subjects is not prefered, and moreover attribute besides combined decision rule is also not prefered if it is wrongly chosen.

1　はじめに

人はある商品を他の商品群と識別するとき、その商品が持つ属性の特徴を把握することで、認知を行っている。ある商品の特徴は商品群の中で、その商品だけがもつ属性の集合であるといえる。

これまでの研究では識別のための特徴把握にラフ集合理論の決定ルール計算が使えることに着目し、選好及び非選好の商品の特徴を求めてきた。

ただし、実際に決定ルールが特徴と同一のものであるといえるかを検証したわけではなく、あくまで特徴としての属性の集合は、特徴把握が的確に行われた場合は決定ルールと同一であるとの仮定をもとにしている。そこで本研究では、実際に人の特徴把握と決定ルールが同一であるかを確かめることを第一の目的とする。

またこれまでの研究で、複数の商品が互いに異なる観点から選好されている場合、それぞれの商品の決定ルールを併合し、それを含む新商品を作ればどの観点からも選好されることがほぼ推定できた。そこで本研究は決定ルールを併合することの有効性を検証することを第二の目的とする。

2　属性を固定したサンプルを用いた特徴把握実験

2.1　サンプルの作成と決定ルールの計算

より厳密にユーザーの特徴把握の構造を知るためには既存のクルマそのものではなく、属性以外の形態要素によって識別されないように他の属性を固定した人工的なサンプル（以下、人工サンプル）を作る必要がある。サンプルは既存のクルマ10台をベースとし、表1の13アイテム28カテゴリーを用いて各1台を他の9台と識別する決定ルールを求めた。

その上で、決定ルールの数（以下、ルール数）や決定ルールを構成する属性の数（以下、ルール長）の違いによるユーザーの特徴把握の違いを調べるために、最もルール数やルール長に変化のあるサンプルを人工サンプル10台のうち4台を選び、基準サンプルとした（図1）。

2.2　決定ルールの違いによる特徴把握の違い

基準サンプルを含む10台のサンプルを7名の被験者（以下、被験者とその番号をUで表す）に形態の特徴を述べてもらった。そしてそれらの特徴が各基準サンプルのどの決定ルールに該当するか調べた。

結果として、全ての被験者が決定ルールとかなり近い特徴把握をしていることが分かった。しかし、被験者の発言の中には決定ルールと比較すると冗長なもの（属性過剰）がいくつかあった（表2，3）。

被験者の特徴把握全体を見渡すと、被験者が特徴として挙げた属性の組み合わせのうち少なくとも一つが決定ルールからである確率は25/28であった。

また、被験者が行った特徴把握のうち決定ルールと同一のものと冗長であるが決定ルールを含んでいるものを加え、被験者が挙げた特徴把握全てとの割合を調べると、102/132であった。このことから考えて、特徴把握はそれが的確に行われた場合は決定ルールと同一であると推察される。

2.3　決定ルールの併合

実際に被験者が特徴把握に用いた決定ルールを併合し、その効果を探索する（以下、決定ルールを併合したものを単に併合ルールと呼ぶ）。併合は併合ルールによる4つのデザイン案がそれぞれ以下の基準を満たすように行った。

表１　人工サンプルの形態要素

	アイテム	カテゴリー（属性値）
A	ボディーと一体化したグリル開口	1開口あり/2グリル無し
B	ヘッドランプとグリル	1繋がっている/2繋がっていない/3グリル無し
C	ヘッドランプ形状	1犬目/2猫目/3それ以外
D	フッド～ウィンドウシールド～ルーフの流れ	1滑らか/2独立
E	ボディーシルエット	1モノフォルム/2モノフォルムでない
F	ウェッジシェイプ	1目立つ/2目立たない
G	ボディープロポーションに対する全高	1普通/2高い
H	ボディープロポーションに対するオーバーハング長	1普通/2短い
I	ボディープロポーションに対するトレッド幅	1普通/2広い
J	ボディーに対するブリスターの有無	1有/2無
K	断面	1無機的/2有機的
L	ボディー全体の面使い	1全体が単一/2上下分割
M	ボディープロポーションに対するタイヤ径	1小/2大

- smp1～10は人工サンプルの通し番号を示す
- （1）～（4）は特徴把握を行った基準サンプルを示す
- （1）はルール数が少なく、ルール長が短いサンプル車
- （2）はルール数が多く、ルール長が短いサンプル車
- （3）はルール数が少なく、ルール長が長いサンプル車
- （4）はルール数が多く、ルール長が長いサンプル車

図１　人工サンプル

表２　縮約と被験者の特徴把握の一例（smp2）

(2)縮約数…多、縮約長…短

	smp2	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7
縮約と一致	B1C2	●		●	●	●	●	●
	B1D1				●		●	
	B1F1			●	●			●
	B1G1	●		●		●	●	
	B1H1				●		●	
	B1I2				●			
	B1L2	●	●		●		●	
	B1M2	●						
	C2J1					●		●
	C2K1					●		●
	D1J1							
	D1K1						●	
	F1J1		●					●
	F1K1		●	●			●	●
	G1J1							
	G1K1		●					
	H1J1				●			
	H1K1				●			
	I2J1							
	I2K1							
	J1L2							●
	J1M2							
	K1L2		●		●			
	K1M2							

	smp2	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7
属性過剰	A1G1K1			●				
非縮約	A1F1							○
	B1E2				○			
	B1J1			○				
	B1K1			○				
	D1L2						○	
	E2K1						○	
	E2L2						○	
	G1M2			○				
	B1E2F1				○			
	C2E2J1					○		
属性不足								

- U1～U7は被験者番号を示す
- 属性過剰は被験者の特徴把握が決定ルールに対して冗長のものを示す
- 非縮約は被験者の特徴把握が決定ルールではなかったものを示す
- 属性不足は被験者の特徴把握が決定ルールに対して不足のものを示す

表３　被験者の特徴把握結果

	(1):smp2[24]	(2):smp5[2]	(3):smp6[12]	(4):smp9[5]
U1	4	3(2)	1	(3)
U2	5	2(5)	(2)	2(1)
U3	4(4)	(1)	1(1)	2(1)
U4	9(2)	5(1)	1(1)	2(3)
U5	5(1)	2(6)	4(2)	3(5)
U6	7(3)	5	(2)	1(1)
U7	7(1)	2(2)	3	1(2)
	5.86(2.2)	3.17(2.83)	2(1.6)	1.83(2.29)

●U1～U7は被験者番号を示す
●白字（）は特徴把握を行った対象のサンプルを示す
●白字smpは人工サンプル番号を示し、[]はルール数を示す
●表内の数字は被験者の特徴把握が決定ルールと一致した数を示す
●表内（数字）は被験者の特徴把握が決定ルールと一致しなかった数を示す

表４　各被験者の選好と非選好

	smp1	smp2	smp3	smp4	smp5	smp6	smp7	smp8	smp9	smp10
U1		NP1			NP2			P1		
U2	P2	P2		P1				NP2		NP1
U3		P3		NP1		P1	NP1		P2	NP2
U4			P3	P1			P2	NP2	NP1	
U5		P1		NP2			P2			NP1
U6				NP1			P1			NP2
U7		P2	NP2	NP1						P1

●Pは選好、NPは非選好を示す
●P及びNP以下に続く数字は選好及び非選好の度合いを示す
●選好：P1>P2>P3
●非選好：NP1>NP2>NP3

（１）一人の被験者に対し同一の選好サンプル車の特徴を含み、かつ非選好車の特徴を持たないデザイン案（CR1）
（２）一人の被験者に対し異なる選好サンプル車の特徴を含み、かつ非選好車の特徴を持たないデザイン案（CR2）
（３）複数（２名）の被験者に対し同一の選好サンプル車の特徴を含み、かつ非選好車の特徴を持たないデザイン案（CR3）
（４）複数（２名）の被験者に対し異なる選好サンプル車の特徴を含み、かつ非選好車の特徴を持たないデザイン案（CR4）

まず前記７名の被験者の、サンプル10台に対する選好を調べた（表４）。結果、好みが７名の中では比較的近い被験者と仮定して、U5とU6を併合の対象被験者とした。

また、2.2の特徴把握実験と同様にU5とU6の挙げた選好・非選好車の特徴を指摘してもらい、そのうち決定ルールであったものを併合の対象とした。その上で、併合は以下に示す被験者と決定ルールの組み合わせで行い、併せて各併合ルールの期待目標を示す。

(CR1)：U5（smp2）＋U5（smp2）
...smp2と同等かそれ以上の評価を得る
(CR2)：U5（smp2）＋U5（smp7）
...smp7と同等かそれ以上の評価を得る
(CR3)：U5（smp7）＋U6（smp7）
...smp7と同等かそれ以上の評価を得る
(CR4)：U5（smp2）＋U6（smp7）
...普通以上を期待できるが不明

結果として各併合ルールをCR1はB1C2G1J1K1、CR2はB1C2J1M1、CR3はB1C3G2I1、CR4はB1C2G2とした。さらに、対象被験者の全ての非選好となる決定ルールを含まないように自由属性を追加して全ての属性が埋まるように属性値を決定した（表５）。その結果、表５をもとに作成したデザイン案を図２に示す。

2.4　併合ルールに対する各被験者の評価

図２のデザイン案（以下併合デザイン）が実際に被験者の選好にかなっているかを調べるために、U5、U6に対してインタビュー調査を行った。また、先の特徴把握実験で用いたサンプルから各被験者の選好車と非選好車も同様に示し、併合デザインと併合対象となったサンプルの選好あるいは非選好する度合いを尋ねた。さらに併合対象となったサンプルを加えた選好・非選好の程度を横方向の順位尺度として図３に示す。

まず、U5から見るとCR1、CR2は共に選好するとの評価を得た。特にCR1はU5が見つけたsmp2の特徴である決定ルールを多く含み、smp2よりも良いと評価されたことから、併合ルール以外の属性である自由属性の選択がよかったと考えられる。一方、CR2はsmp2とsmp7の特徴を併せ持っている。U5はsmp2とsmp7を別々の観点をもとにそれぞれ異なる利用目的で選好していた。そのため双方の特徴が併合されたCR2をsmp2（あるいはsmp7）の個性が薄まったものと感じたようである。ただし、併合ルールの目標であるsmp2と同等の評価を

表５　併合縮約によるデザイン（CR1～CR4）の形態要素の内訳

デザイン	属性値の内訳	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
CR1	併合縮約属性		B1	C2				G1			J1	K1		
	自由属性（自由）	A1*			D1	E1	F1		H1	I2			L2*	M2*
CR2	併合縮約属性		B1	C2							J1			M1
	自由属性（自由）	A1*			D1	E2*	F1	G1	H1	I2*		K1	L2*	
CR3	併合縮約属性		B1	C3				G2		I1				
	自由属性（自由）	A1*			D2	E2	F2		H2		J1*	K1	L2*	M2*
CR4	併合縮約属性	A1	B1	C2				G2						
	自由属性（自由）				D1	E2	F2		H2	I1	J1	K1	L2*	M2*

図２　併合デザイン

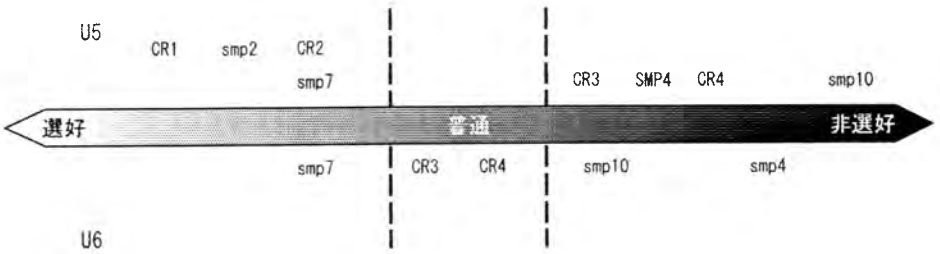


図３　人工サンプルに対する各被験者の選好の割合

得ることができた。

CR3は同一サンプルであるsmp7の特徴を併合したデザインであるが、他の被験者が見つけた特徴を併合しているためか、非選好との評価であった。CR3に限らず全ての併合デザインは選好の特徴である決定ルールを併合した属性と自由属性から成り、非選好となる決定ルールが含まれないように属性値が選ばれている。にもかかわらず、非選好となったのは自由属性の選び方にあると考えられる。例えば、CR3のK属性（ボディー全体の面使い）はK1（無機的）だが、K2（有機的）を選択しても非選好の決定ルールを持たないクルマになる。

このように、自由属性において、どの属性値を選んでも非選好となる決定ルールを含まない場合、属性値の選び方によって評価が左右されると考えられる。すなわち、形態に対してバランスのとれた自由属性選びはデザイナーの力量によるといえる。

さらにCR4は異なる被験者間の上に異なるサンプル間での併合であるためか、もともと非選好車として選択していたsmp4よりも嫌いであるとの評価であった。

次に、U6を見るとCR3、CR4共に選好とも非選好ともならず普通との評価であった。CR3は同一サンプル同士の併合であるが、他の被験者が把握した特徴を持つ決定ルールがU6にとってノイズとなり、選好にも非選好にもならず普通との評価になった考えられる。また、U5と同様に自由属性の選択の仕方がバランスの悪いものだったことが考えられる。

さらに、CR4はU6がもともと選好でも非選好でもないsmp2との併合であったためか、smp7ほど選好するには至らず、普通との評価であった。

以上の結果から、U5をターゲットとし、４種類の併合ルールごとの目標を達成できたサンプルは２種類であり、U6をターゲットとし、２種類の併合ルールごとの目標を達成できたサンプルは１種類であった。

３　結論

本研究では特徴としての属性の集合が、特徴把握が的確に行われた場合は決定ルールと同一であるとの仮定を厳密なサンプルを用いて検証した。

結果として、全ての被験者が決定ルールとかなり近い特徴把握をしていることが分かった。また、被験者の特徴把握全体を見渡すと、被験者が特徴として挙げた属性の組み合わせのほとんどが決定ルールからであった。また、異なる観点から選好された複数の商品の決定ルールを併合し、それを含む新商品がとれほど選好されるかを調べることで、決定ルールを併合することの有効性を検証した。結果として、同一被験者間での併合は選好された。しかし、異なる被験者間での併合や、自由属性の選び方によっては非選好になることが分かった。

これを商品企画の観点から考えると、同一の観点（あるいは近い観点）は近似した選好構造・価値観を持ったユーザーの集合と置き換えられ、その間での併合ならば、より選好される商品となるとの可能性が示された。

参考文献

[1]熊丸、粂田、高梨、森：ラフ集合の決定ルールを用いた特徴把握の分析と、決定ルール併合の商品選好に対する適合性と有効性の観察、デザイン学研究、155、79-86、2003

連絡先：〒164-8678
東京都中野区本町２－９－５
東京工芸大学　芸術学部　デザイン学科
熊丸　健一
電話：03-5371-2730
FAX：03-5371-2730
E-mail：kumamaru@dsn.t-kougei.ac.jp

局所回帰による順序尺度データのスムージングとヘアデザインの感性工学データ分析への応用

Smoothing of ordinal categorical data and its application to analysis of hair design Kansei evaluation data

石原茂和,　　*石原恵子,　　長町三生,　　西野達夫
Shigekazu Ishihara, Keiko Ishihara, Mitsuo Nagamachi and Tatsuo Nishino
広島国際大学　人間環境学部　感性情報学科, *言語コミュニケーション学科
College of Human and Environment, Hiroshima International University

Abstract: For long years, the linearity is assumed as a basis of mathematical analyses and modelings, those are used in social sciences. In Kansei engineering, we also have been used the linear model for exploring Kansei and product design relations. Although linear models are sophisticated and reliable, there may exist non linear relations and responses to design elements. This study focused on analysis of nonlinearity in subjects' Kansei evaluation. Color and length of the hair design were used for control variables. Subject's evaluation value on Kansei word (adjective) is a response variable. To avoid small noisy shift of evaluation value, we used smoothing technique. Non-parametric regression model LOESS, one of modern regression method was used. The result shows non-linearity and interactions of specific hair colors and lengths on different Kansei words.

1. はじめに

我々の感性工学では，semantic differential method (SD) を感性評価に多用している．SDデータを多変量解析により分析し，感性の構造分析や，感性とデザイン要素との関係を明らかにしている．

多変量解析の手法の大部分は線形モデルに基づいている．したがって，感性の評価値とデザイン要素との関係は線形の仮定において分析されてきた．我々の感性工学では，数量化理論１類のように，ダミー変数を導入し，質的（名義尺度）変数を表わすことによって非線形性があっても分析できるように対処してきた．感性評価値をyに置き，名義尺度であるデザイン要素のバリエーション(nバリエーション)をn-1個のダミー変数であらわすことによって，線形式であっても，感性とデザイン要素との非線形的な関係を分析することができた．そもそも形，素材など多くのデザイン要素は質的なバリエーションであり，このような対象方法は現実的であった．しかし，非線形的な関係をモデルとして直接的に表わす目的には最善ではない．

近年，我々は感性の非線形性について，直接表現できるモデル化をさまざま試みている．この論文では，感性評価における２つのデザイン要素間の線形・非線形的な関係を直接分析し，表わすことを目的としている．２つのデザイン要素は髪の毛の色と長さであり，感性ワードによって，感性ワードとの関係が当然異なるものと考えられる．

2. 感性評価実験

髪の長さは短いほうからショート，ショートボブ，セミロング,ロングの4種類とした．髪の色は黒から金髪までの9段階とした．この2変数の組み合わせで刺激は36種類である．

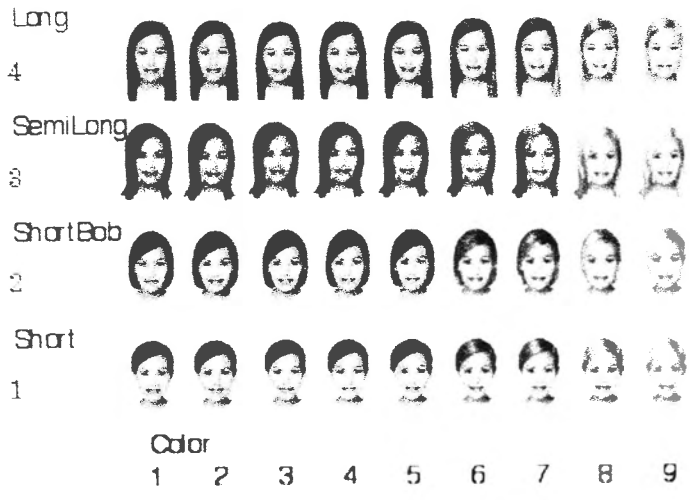


図 1. 刺激

評価用の刺激はヘアデザインのシミュレーションソフト (Cosmopolitan Virtual Makeover2, Broderbun

d, 1999) を用いて作成した．髪形はshortからlongまで，パーマやカットなどの影響が極力少なく，全体の形が最も変化しないものを選択した．髪の色は不自然な色になるのを防ぐために，実際のヘアカラーとして市販されているものから連続的な変化になるように選択した．

実験では刺激は色調整をしたディスプレイ(iMacDV, Apple) で提示した．評価には76ペアの感性ワードを用いた5段階SD尺度の質問紙を用いた．被験者は短大生（年齢19〜20歳）女性17名．

3. ノンパラメトリック回帰によるスムーシング

まず最初に，それぞれの感性ワードでの評価の頻度表を作成する．5段階のSD評価で4以上の評価を正の反応とした．表１は，感性ワード“魅力的な”の結果を示す．それぞれのセルには，4か5の評価値を与えた人数が入っている．色，長さの順序は図１と同じで，数字が大きいほど金髪，大きいほど長くなる．この表が分析の出発点となる．

図２は表１のプロットであり，濃いほど被験者数が多いことをしめしている．この図から，色4(茶色，マロングラッセの色と呼ばれる)が多くの被験者が魅力的と捉えていることがわかる．また長さで4，色で2,4,5,6に高い値が散発的に見られる．

この，表の値を濃度で図にする方法は分かりやすいが，一つの問題は中程度の値，6や8(名)が表のなかに散らばっていることである．このセルの存在が，より全体的な傾向を見にくくしている．もう１つの問題はこの表は分散分析の適用は難しいことである．変数が大すぎ，また交互作用はローカルで複雑すぎている．

これらの問題を解決するためには，２つの矛盾する要求を満たす必要がある．１つは全体の傾向をよりはっきりとさせること，もう１つはローカルな特徴をなるべく保持することである．これを達成するために，最近応用がひろがってきたノンパラメトリック回帰を用いたスムーシングの手法を試してみた．

表1. "魅力的な"の高評価者数

Length	1	2	3	4	5	6	7	8	9 Color
4	7	9	5	9	9	10	5	5	3
3	4	6	4	9	6	5	6	4	5
2	5	3	4	10	8	4	7	3	7
1	3	4	7	9	7	5	4	5	7

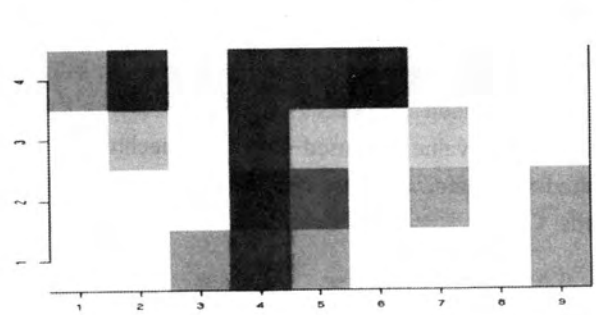


図2. 表１の2D plot（濃いほど数が大きい）

パラメトリックモデルとノンパラメトリックモデル

通常の単回帰はデータ全体での予測値からの誤差を最小にしようとする（竹澤, 2001から）．

$$(minimize)E = \sum_{i=1}^{n}(aX_i + b - Y_i)^2 \qquad (1)$$

Xi は予測変数（独立変数とも呼ばれる）の値，Yiは目的変数（従属変数とも呼ばれる）の値である．aは回帰係数でbは定数である．

古典的な回帰分析は１つの回帰式を存在するデータの全体に当てはめようとする．パラメーターの数を少なくしてフィットさせることがモデル化の目的であり，これはパラメトリック回帰と呼ばれる．

ノンパラメトリック回帰はこのようなパラメータを減らそうという意図はなく，ユーザーにとって使いよい，わかりやすい傾向が抽出できればよいという考え方である(竹澤, 2001)．しばしば，それはローカルな特徴に存在している．

ローカル回帰モデル

Local linear regression (LLR) モデルは，ノンパラメトリック回帰分析の手法の１つである．多くの場合，LLRは１つの回帰式をデータの１つに対応させてフィットさせようとする．したがって，Yの値それぞれが異なるaとbを持つ．これを“local fitting”と呼ぶ．

LLRでは，予測変数(X_j)に対して a_j と b_j ，Yの予測値 $\hat{Y}_j$ が求められるが，X_jだけでなく，X_jの近くに存在するn個のX ($n_local\ X$)も同時に用いる．その1つをX_i とすると，Y_i, a_j ,b_j はX_jにおけるエラーを最小化することによって求められる．

$$(minimize)E(X_j) = \sum_{i=1}^{n_local} w_{ij}(a_j X_i + b_j - Y_i)^2 \quad (2)$$

求められた a_j と b_j をハットをつけて書くと，X_j に対応する推定値 $\hat{Y}_j$ は次のように書ける．

$$\hat{Y}_j = \hat{a}_j X_j + \hat{b}_j \quad (3)$$

w_{ij} はローカル重みのパラメーターであり,どこまで離れたXまでを考慮にいれるかを決定している．これはカーネル関数と一般的に呼ばれているもので，単一のピークとなだらかな裾を持っている関数（Gaussianなど）がよく使われている．

図3はローカル回帰の例を示す．X_jとその近傍のXs（この場合前後1つづつ）に対応する1つの $\hat{Y}_j$ の推定値（星印）とその回帰式を示している．この線を見ると，Yの変動をスムーシングしていることがわかる．（この説明は竹澤，2001を改変したものである）

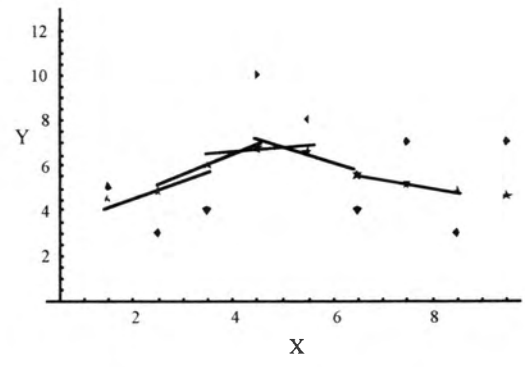


図3 局所線形回帰(点が測定値Y)

ここでは，LOESS (local regressionの略)をスムーシングの計算方法に用いた(Cleveland et al., 1992)．ノンパラメトリック回帰の多くの方法は，固定した大きさの近傍範囲を使用している．LOESSは，幅は固定せず，X_jの近傍k個を，考慮にいれる範囲Xsとしている．これは，スムースネスを自動的にチューニングすることを考えている．たとえば，漁獲高のサンプリング調査では，魚が良くとれるエリアは距離において密にサンプリングし，あまりとれないとあらかじめ分かっているところは粗にサンプリングする．このようにデータの粗密があることが普通なので，LOESSは固定範囲ではなく，k個近傍という考え方を採用している．計算方法から，最近傍局所1次式回帰とも呼ばれる(竹澤,2001)

LOESSはX_j.の近傍のデータについて，3乗の重みづけ式を用いている．

$$\left(1-\left(\frac{|X_i - X_j|}{\text{distance to furthest neighbor}}\right)^3\right)^3 \quad (4)$$

k /全体のデータ数を"span"と呼び，これが近傍サイズを調節するパラメーターである．

スムーシングの手法は間隔尺度のデータに用いられてきた．Simonoff (1998)は，LOESSが1次元，2次元データ（表形式）の順序尺度にも適用可能であることを示した．Simonoffは，測定されたデータが自然の順序に従って配列されている場合，あるセルの測定値は近くのセルに該当する確率についての情報も含んでいるからであるとしている．

この研究では，Simonoff (1998)のプログラムを参考にし，プログラムを作成した．LOESSの実装はProf. B.D. Ripley (Applied Statistics, Univ. of Oxford, UK).による．計算は Prof. Jan de Leeuw (UCLA)による "R- 1.6.2"のMac OS X版で行なった．

次に示すのが，表1，図1と同じ感性ワード"*魅力的な*" のデータをLOESSでスムーシングした結果である．Spanは0.25に設定した．幅の大きなピークが色3,4,5，長さ2に存在している．一方，長さ4では黒から茶色にいたるまで高い値のゾーンがあり，値の高い領域がぼんやりとT字型をしていることがわかる．このことから，長い髪(4)は広い色のレンジで魅力的であること，ショートからセミロングでは，茶色が魅力的であることがわかる．

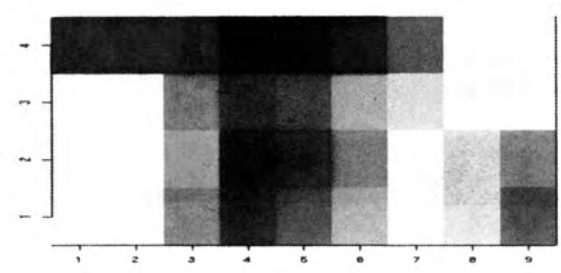


図4. スムーシングした."*魅力的な*"

4. 分析結果

感性の構造

感性工学では，多くの感性ワードでSD法による測定を行なった後，主成分分析（場合によって因子分析）を用いて，感性の構造の分析を行なう．

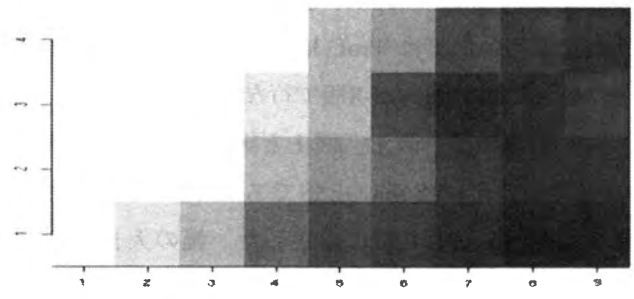
ここでは，主成分分析をおこなったのち，主成分に対してVARIMAX回転をおこなった．主要な主成分は４つ（固有値の減少の傾きが変わる点を見つける，いわゆるKnee methodで決定）．

第1主成分：*軽やかな，カジュアルな，派手な-重い，上品，落ち着いた，シックな*；軽重性とアピール性の軸
第2主成分：*涼しい，スリムな，ボーイッシュな-女性らしい，ゆるやかな*；女性らしさの軸
第3主成分：*美しい，魅力的，高級感のある-下品な，ヘビーな*；美的洗練性の軸
第4主成分：*直線的な，さらさらした-曲線的な，丸い，ふんわりした，無造作な*；髪形のデザインに直接関連する形を表す軸，髪形に特徴的

スムーシングしたグラフ

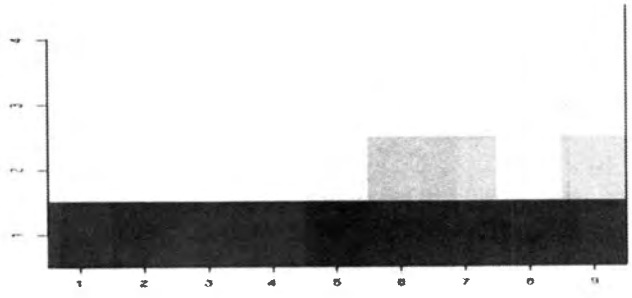
以下に，各主成分に代表的な感性ワードでの結果をいくつか記す．

軽やかな (PC1+)



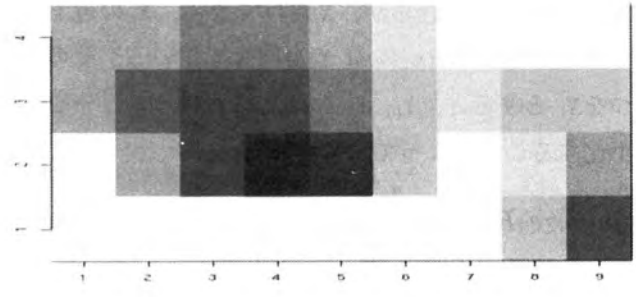
色が支配的で，明るくなるほど軽やかになる．長さは短いほうが若干軽やかである．

ボーイッシュな (PC2+)



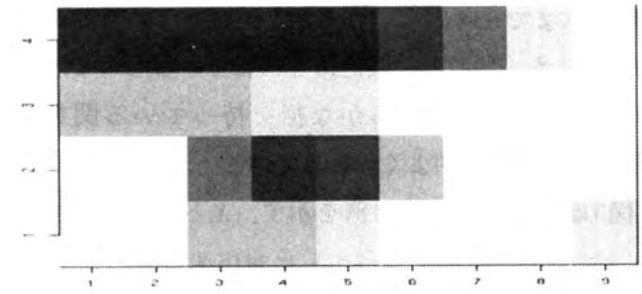
長さが支配的で，短くなるほどボーイッシュである

ゆるやかな (PC2-)



色と長さに局所的に交互作用があり，茶色でショートボブか，セミロングがゆるやかである．ブロンドでショートに中程度のピークがある．

美しい (PC3+)



急激なピークが色4とショートボブの組み合わせにみられる．これは，いわゆる好感度の高いヘアスタイルである．黒から茶色でロングも高い．

参考文献

竹澤邦夫，みんなのためのノンパラメトリック回帰，吉岡書店 (2001)

Cleveland, W.S., Grosse E., and Shyu W.M., 1992 Local regression models. Chapter 8 of *Statistical Models in S* (eds.) J.M. Chambers and T.J. Hastie, Wadsworth & Brooks/Cole.

Simonoff, J.S., 1998, Smoothing methods in statistics, Springer-Verlag. (竹澤・大森 訳, 平滑化とノンパラメトリック回帰への招待, 農林統計協会(1999))

連絡先
〒724-0695
広島県賀茂郡黒瀬町学園台555-36
広島国際大学　人間環境学部　感性情報学科
石原茂和
電話:0823-70-4890
fax: 0823-70-4852
E-mail: i-shige@he.hirokoku-u.ac.jp

感性工学におけるあいまいな感性データのラフ集合解析

Rough Set Analysis on *Kansei* Data with Ambiguity in *Kansei* Engineering

西野　達夫
Tatsuo Nishino
広島国際大学
Hiroshima International University

長町　三生
Mitsuo Nagamachi
広島国際大学
Hiroshima International University

Abstract: This paper proposed a VPRS based *kansei* analysis model, which can deal with the ambiguity often appeared in *kansei* data in *Kansei* Engineering. It was examined through rule extracting from *kansei* experimental data concerning the relationship between human kansei and basic kansei design elements.

1. はじめに

感性と基本的な設計要素の関係知識を獲得できれば、感性工学からの製品開発での共通の知識ベースとして有効に利用できる。基本的な設計要素とは、多くの製品に共通して現れる感性に敏感な要素のことである。形状、形態比、色彩、丸み、材質などである。

我々はこれまで個々の基本設計要素と感性の関係ルール獲得を行ってきたが、設計要素間の非線形な相互作用が厳しい実際条件となる場合も多い。この非線形な設計要素の相互作用知識は大抵、設計者の専門知識に埋没していて明示的な形で獲得するのは甚だ困難である。我々はこの側面から、感性と基本設計要素の非線形相互作用の解析とルール獲得のために、感性実験データにラフ集合論を適用することにより有効な感性ルールの獲得を試みてきた[1][2]。

一方で、感性評価データには、測定誤差、個人的なバラツキが含まれていて、感性クラスの決定に不確実さが伴うのが通常である。このような感性クラスの不確実なデータからの、感性クラスの不確実さを反映した解析とルール獲得法が要請される。つまり、設計要素の非線形性が想定されるとともに、感性クラスの不確実さを扱う感性データの解析とルールの獲得法が課題となる。ラフ集合論はユーザーに理解可能で明示的な非線形なルールの獲得を可能にするという利点はあるが、他方では標準的なラフ集合モデル[3]では感性データのようなtotallyにindefinableな概念を近似するには制約が強すぎる。

このような不確実な概念の扱いとしてZiarko[4]は可変精度ラフ集合モデル（Variable Precision Rough Set :VPRS）を示している。感性クラス所属の不確実さを考慮した解析とルールの獲得にこのモデルは有用である。しかし、VPRSモデルの感性工学へのより有効な適用については近似パラメータの設定法など検討すべき課題も多い。本研究では、VPRSモデルに依拠しながら、感性データに固有な近似法、重要属性の推定法、さらに不確実決定ルールの獲得法について提案し、基本設計要素の感性評価実験データに適用してその有効性を検討した。

2. VPRSモデル

VPRSモデルは、標準的なラフ集合モデルでは扱っていないデータに不確実性やノイズ含まれている場合を扱えるようにラフ集合モデルを拡張している。標準的なラフ集合モデルが決定論的もしくは部分的に決定論的なルールの獲得に制約されていたのに対して、VPRSモデルは実際的な場面では頻繁に起こる非決定論的データからのルール獲得に適している[4][5][6]。

ラフメンバーシップ関数を用いて、条件属性の任意の部分集合 Bに関する同値クラス$[x]_B$に対して、クラス Xの所属の信頼度として所属度を与える。

$$\mu_X^B(x) = \frac{|(X \cap [x]_B)|}{|[x]_B|}, \qquad \mu_x^B(x) \in [0,1]$$

$|\cdot|$は濃度である。近似空間 AS=(U,R,ℓ,u)を定義する。RはU上での同値関係であり同値クラスの集合をつくる。xを含む一つの同値クラスを$[x]_B$と表記する。(ℓ,u) は概念 Xの近似精度パラメータで、それぞれ同値クラスを Xと X^cのメンバーに入れるかどうかの下限界と上限界である。

u、ℓ $(0<\ell<u<1)$を用いて３つの近似領域を定義

する。

$$POS_u(X)= \bigcup\{[x]_B : \mu_X^B(x) \geq u\}$$

これは、u以上の信頼度で同値クラスをXへ分類することを保証する同値クラスの集合の和でXの(ℓ,u)-下近似である。

$$NEG_\ell(X)= \bigcup\{[x]_B : 1-\mu_X^B(x) \geq 1-l\}$$

1-ℓ以上の信頼度でX^cにxを分類する同値クラスの集合の和で、X^cの(ℓ,u)-下近似である。

$$BND_{\ell,u}(X)= \bigcup\{[x]_B : l<\mu_X^B(x)<u\}$$

u以上の信頼度でXにxを分類できないし、1-ℓ以上の信頼度でX^cにも分類できない同値クラスの集合の和で、(ℓ,u)-境界クラスである。

$$UPP_u(X)= POS_u(X)+BND_{\ell,u}(X)$$

これはℓ以上の信頼度でXにxを分類する同値クラスで、Xの(ℓ,u)-上近似である。

u=1, ℓ=0 の場合は、標準的なラフ集合のモデルとなる。一般に(ℓ,u)は不確実ルールの信頼度推定に用いられる。

3. 不確実な感性データへのVPRSモデルの適用

感性ワードXの生起率$p(X)$は、感性ワードにより異なることから、Xの生起率を基準とした近似パラメータを用いることにより、統一的な扱いが可能となる。Xが生じる確率の推定値$p^*(X)=|X|/|U|$に対する$\mu(x)$のリフト$Lift(x)$を定義する。

$$Lift(x)= \mu(x)/p^*(X).$$

1+εのリフトをもつ、u,ℓは次式で求められる。

$$u=(1+\varepsilon)p^*(X),\quad \ell=(1-\varepsilon)p^*(X)$$

リフトを基準とした近似パラメータの設定により、生起確率に対する獲得ルールのゲインとして異なる感性ワードの反応特性の比較を可能にする。

属性値の組み合わせ的増加による、決定ルール数の増加に対しては、近似精度を変更することにより、ルール獲得の対象となる同値クラスを制限して、ルール数を抑制することが可能になる。

属性の重要度評価は感性データ解析においては、感性ワードに対する重要要因の発見の側面から大切なタスクである。幾つかの可能な方法があるが、本研究では、近似精度の異なる近似空間からの縮約の頻度分布から属性の重要度を推定する方法を提案している。縮約とは決定表の情報を保存する条件属性の最小集合のことである。

(u,ℓ)-下近似の識別行列から、次の識別関数の主加法標準形の連言項を求める標準的なラフ集合での方法と同じ扱いが可能である[7]。

$$f(B)= \prod_{(x,y)\in U^2}\{\sum\delta(x,y):(x,y)\in U^2 and \delta(x,y)\neq\Phi\}$$

ここで、$\delta(x,y)$は同値クラスxとyを区別する属性でΣはブール演算の和である。

不確実な決定ルールの獲得についても$\delta(x,y)$を(属性、属性値)として、同値クラスの識別関数を構成して、その連言から主加法標準形の連言項を求めることで可能であり、獲得ルールの信頼度を近似精度により保証できる。

4. 基本設計要素の感性実験データの感性解析

4.1 感性評価実験

図1に示す4つの基本的な設計属性と属性値を持つ3Dグラフィック物体を対象としている。設計属性Bは形状(a1)、形態比(a2),カラー(a3)、ストライプ(a4)の4属性(n=4)である。それぞれの属性は次の属性値を持つことが可能である。

形状(a1)={球(I),円錐(J),円柱(K),角柱(L)}
形態比(a2)={1:1(M), 1:1.67(N),1:2(O),1:3(P)}
カラー(a3)={青(B)、緑(G)、赤(R)、黄(Y)}
ストライプ(a4)={縦(V),横(H),なし(U)}

属性値の組み合わせ総数4×4×4×3=192から

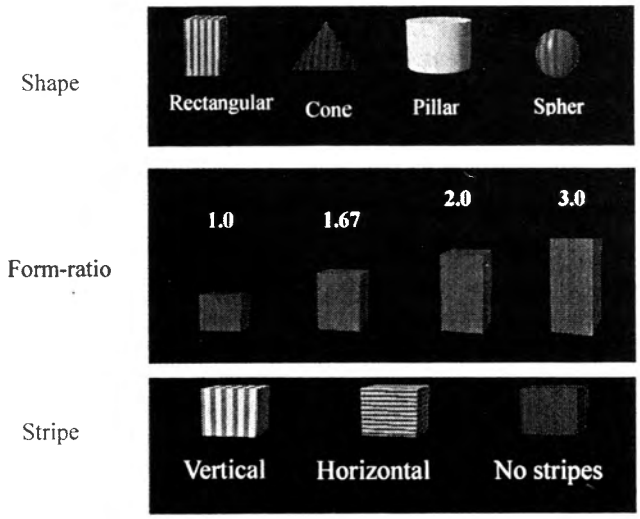


図1 基本設計属性

ランダムに40のサンプルを作成した。各サンプルに対して30人の被験者(男子15名,女子15名)に「美しい」「シンプルな」などの感性ワード10個についてyes, noの2群選択方式で回答を得た。この感性反応を決定属性dとして、値は、{yes, no}をとる。yesと反応したデータ集合をX^1, noに反応した集合X^0を感性ワードの否定の集合と

する。各感性ワードについて総計 1200 個の感性評価データの集合を得たことになる。

以下の解析例では感性ワード「美しい」、「シンプルな」「高級感」についての解析例を示す。

4.2 感性の(ℓ, u)- 近似

表1に「美しい」感性のラフメンバーシップ値 $\mu(x)$を含む同値クラスで整理した決定表を示す。$\mu(x)$はあるサンプル$[x]_B$に対するyes回答の頻度を示している。図2に各感性の反応特性を示す累積反応グラフを示している。これは同値クラスをその$\mu(x)$を降順に整理した累積反応率(y 軸)と同値クラスの数の累積（x軸）を示している[8]。各同値クラスの累積的ラフメンバーシップ値を示しており、100%点では$p^*(X)$を指す。このグラフから、「高級感」、「美しい」「シンプルな」の順に感性クラス所属の不確実性が高いことが勾配から読み取れる。

図2　感性の累積反応グラ

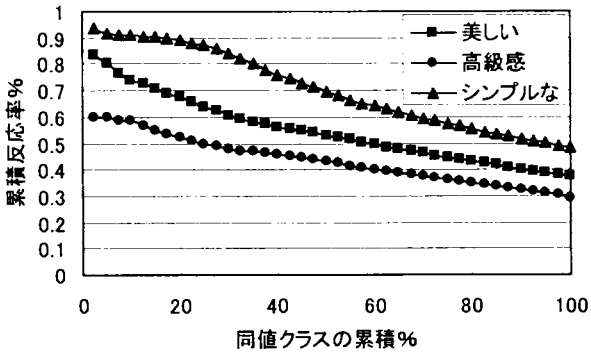


図2の累積グラフから、ここでは近似パラメータをε =0, 0.2、0.4, 0.5 に設定した。表1の class 列に「美しい」の近似を示している。示された数字は 1= *POS*「美しい」クラス、2= *NEG*「美しくない」クラス、3= *BND* 境界クラスを示している。他の感性ワードも同様に近似した。表2にεから求められた各感性ワードの(u,ℓ)を示す。εが小さいほど u とℓは近い値をとり、ε =0 では一致する。

表2　近似パラメータ (u, ℓ)

感性ワード	ε=0		ε=0.2		ε=0.4		ε=0.5	
	u	l	u	l	u	l	u	l
美しい	0.374	0.374	0.449	0.299	0.524	0.2245	0.561	0.187
シンプル	0.484	0.484	0.581	0.387	0.678	0.2905	0.726	0.242
高級感	0.296	0.296	0.355	0.237	0.414	0.1775	0.444	0.148

表3　分類精度 γ

感性ワード	ε=0	ε=0.2	ε=0.4	ε=0.5
美しい	1	0.75	0.425	0.375
シンプル	1	0.825	0.55	0.5
高級感	1	0.85	0.55	0.35

表1　「美しい」の (u, ℓ)-近似

[x]B	a1	a2	a3	a4	μ(x)	ε=0	ε=0.2	ε=0.4	ε=0.5
X1	I	N	B	H	0.667	1	1	1	1
X2	L	M	G	V	0.267	2	2	3	3
X3	J	O	Y	H	0.267	2	2	3	3
X4	J	P	B	V	0.433	1	3	3	3
X5	K	N	B	U	0.433	1	3	3	3
X6	I	N	G	U	0.833	1	1	1	1
X7	L	P	Y	H	0.067	2	2	2	2
X8	K	N	Y	U	0.433	1	3	3	3
X9	L	O	B	U	0.6	1	1	1	1
X10	K	O	B	V	0.367	2	3	3	3
X11	J	P	B	U	0.667	1	1	1	1
X12	K	O	R	V	0.4	1	3	3	3
X13	I	N	R	H	0.433	1	3	3	3
X14	K	M	R	U	0.3	2	2	3	3
X15	J	O	R	U	0.467	1	1	3	3
X16	L	O	R	V	0.233	2	2	3	3
X17	L	O	Y	V	0.267	2	2	3	3
X18	I	M	R	V	0.467	1	1	3	3
X19	I	P	Y	H	0.267	2	2	3	3
X20	I	P	B	V	0.3	2	3	3	3
X21	K	N	B	H	0.5	1	1	3	3
X22	L	O	G	H	0.133	2	2	2	2
X23	J	M	B	V	0.233	2	2	3	3
X24	I	P	Y	V	0.133	2	2	2	2
X25	L	N	G	V	0.133	2	2	2	2
X26	K	P	G	H	0.167	2	2	2	2
X27	I	O	G	U	0.7	1	1	1	1
X28	K	M	R	H	0.433	1	3	3	3
X29	I	O	R	U	0.767	1	1	1	1
X30	J	P	B	H	0.433	1	3	3	3
X31	J	N	Y	V	0.2	2	2	2	3
X32	L	M	R	U	0.567	1	1	1	1
X33	J	N	R	H	0.267	2	2	3	3
X34	L	P	R	V	0.167	2	2	2	2
X35	I	M	Y	V	0.367	2	3	3	3
X36	K	P	B	V	0.167	2	2	2	2
X37	K	P	B	V	0.433	1	1	3	3
X38	J	N	G	V	0.133	2	2	2	2
X39	L	P	R	U	0.6	1	1	1	1
X40	J	M	Y	V	0.267	2	2	3	3

次式から求めた分類精度γの値を表 3 に示す。これは、同値クラスの全体集合$|U|$に対する(ℓ,u)-下近似に属するオブジェクトの数の割合を示す。

$$\gamma_{u,l}(C,D) = (|POS_u(X)| + |NEG_l(X)|)/|U|$$

γの値はε =0 では 1.0 であり、全ての同値クラスが分析の対象に含まれるが、εを大きくとるほど$\mu(x)$の低い同値クラスは境界クラスとして扱われる。

4.3 属性の縮約と重要度評価

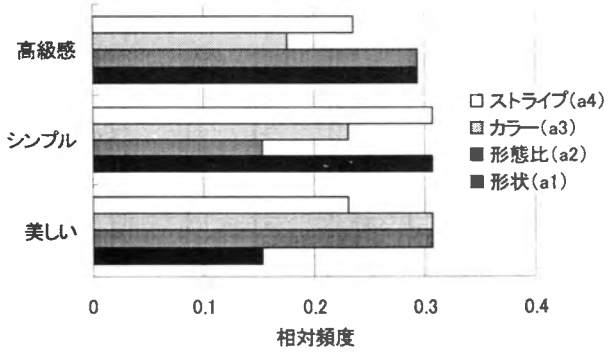
(ℓ,u)-上近似からの縮約も興味あるが、すでに標準ラフ集合論からは上近似の領域を扱うことになるので、ここでは比較的確実な(ℓ,u) -下近似からの縮約を求めた（表4）。

表4　縮約

感性ワード	ε=0	ε=0.2	ε=0.4	ε=0.5
美しい	{a1,a2,a3}	{a2,a3,a4}	{a1,a2,a3,a4}	{a1,a2,a3,a4}
シンプル	{a1,a2,a3}	{a3,a4}	{a1,a4}	{a1,a2,a4} {a1,a3,a4}
高級感	{a1,a2,a4} {a1,a2,a3}	{a1,a2,a3,a4}	{a1,a2,a4}	{a1,a2,a3,a4}

属性の相対的重要度はこれらの縮約中の属性出現頻度により推定可能である。図3は「美しい」形態比、カラーが、形状、ストライプよりも重要な要因であることを示している。「シンプル」は形状とストライプが重要属性である。「高級感」では、形状と形態比が重要な属性である。

図 2 縮約属性の相対頻度



4.4 非決定論的な感性ルールの獲得

獲得されるルールの信頼度保証限界、つまり近似精度を変えた場合、の感性ワード Xに関するルール数とルール中の最大被覆率 cov を比較した（表５）。ε を高めるにつれて、獲得されるルール数は減少し被覆率は高まることが、全ての感性ワードで見られる。また、ε =0.4, ε =0.5 ではルール数、最大被覆率も同じ値となり安定していることが分かる。また、クラス所属の不確実性の高い感性ワードほど ε の変化に敏感であることが分かる。

表５　獲得ルール数（最大被覆率）

感性ワード	ε=0	ε=0.2	ε=0.4	ε=0.5
美しい	26(0.21)	19(0.33)	12(0.38)	12(0.38)
シンプル	12(0.21)	10(0.23)	6(1.0)	6(1.0)
高級感	24(0.15)	24(0.18)	7(0.38)	6(0.50)

この結果から次のことが分かる。ε を大きくすると、ルール数は減少し、ルールが概念 Xを支持する被覆率 cov は高くなるが、逆に、ε を小さくして境界クラスを少なくして、多くの同値クラスを用いれば、多くのルール数が獲得されるが、ルールの信頼度は低下し低い被覆率となる。この ε を用いることにより、これまで感性工学領域で課題とされている決定ルールの爆発的増加を抑制することが可能と考えられる。

ε =0.5 で、上限界 u 以上の信頼度をもつ獲得されたルールの内、被覆率の比較的高い決定ルールを表６に示す。被覆率もこの種の多分にあいまいな領域からのルールとしては高い値を示している。

表６　獲得されたルール

	ルール条件部	被覆率cov	上限界u
美しい	(形状、角柱) and ストライプ(なし)	0.38	0.561
	(形状、球)　and ストライプ(なし)	0.38	
	(カラー、緑) and ストライプ(なし)	0.25	
	(形態比、1:3 and ストライプ(なし)	0.25	
	(形状、球)　and (形態比、1:2)	0.25	
シンプル	(ストライプ、なし)	1.00	0.726
	(形状、球)and(カラー、緑)	0.18	
	(形状、球)and(形態比、1:2)	0.18	
高級感	(形状、球)and(カラー、赤)	0.38	0.444
	(形態比、1:3) and(ストライプ、なし)	0.25	
	(形状、球)and (形態比、1:1)	0.25	

5. おわりに

クラス所属に曖昧性を含む感性データの解析と非決定論的な決定ルール獲得に対して、VPRS ベースの感性クラスの(ℓ,u)-近似と感性データ解析法を提案し、感性工学における基本設計要素の感性解析と不確実決定ルールの獲得に応用した。この結果から、この方法は感性クラスの決定に不確実性やノイズを含む感性データの解析と非決定論的なルールの信頼度評価に有効であること、さらにルールの膨大さに伴う煩雑さの解決にも有効であることを示した。

参考文献

[1] Nishino, T., Nagamachi, M: Rough Set Analysis on Kansei Evaluation of Color and Kansei Structure, QMOD (2001), 543-550

[2] Nishino, T.and Nagamachi, M: Extraction of Design Rules for Basic Product Designing Using Rough Set Analysis, IEA (2003)

[3] Pawlak, Z: Rough Set Elements, Rough Sets in Knowledge Discovery 1(1998) 10-30

[4] Ziarko, W: Variable precision rough set model, Journal of Computer and System Science **40**(1993) 39-59

[5] Ziarko, W: Rough Sets as a Methodology for Data Mining, 554-576, Rough Sets in Knowledge Discovery 1(1998)

[6] Ziarko, W: Rough Sets as a Methodology for Data Mining, 554-576, Rough Sets in Knowledge Discovery 1(1998)

[7]Stepaniuk, J: Knowledge Discovery by Application of Rough Sets Models, 137-233, Rough Sets Methods and Applications (2000)

[8] Kowalczyk, W: Rough Data Modelling: A New Technique for Analyzing Data, 400-421, Rough Sets in Knowledge Discovery 1(1998)

連絡先

〒724-0600
広島県賀茂郡黒瀬町学園台 555-36
広島国際大学　人間環境学部　感性情報学科
西野　達夫
電話:0823-70-4889
FAX:0823-70-4852
Email: t-nishi@he.hirokoku-u.ac.jp

直方体のデザインに関する感性工学的研究

A study of kansei engineering about design of a rectangular parallelepiped

土屋敏夫
Toshio Tsuchiya
下関市立大学
Shimonoseki City University

長町三生
Mitsuo Nagamachi
広島国際大学
Hiroshima International University

Abstract: In analyzing kansei of a physical design, it is important to examine a basic design of an object. By this report, I paid my attention to the ratio of a rectangular solid on the bank and analyzed a change of the ratio and relation with kansei. The analysis examined brightness and an effect of combinations on the bank using genetic algorithm.

1．はじめに

本研究はモノの基本的なデザイン、特に辺の比率と明度に着目し、それらの組み合わせが感性に与える影響を調べる。直方体の辺の比率に着目し、比率の変化と感性との関係を分析した。また、直方体の明度と辺の比率の組み合わせが感性に与える影響を分析した。分析方法は遺伝的アルゴリズム(GA)を用い、明度と辺の組み合わせの効果を調べた。

表１アイテム・カテゴリー

辺の比率	明度
1.00	W：白
1.33	LG：ライトグレー
1.67	DG：ダークグレー
2.00	B：黒
2.33	
2.67	
3.00	
3.33	
3.67	

2．感性評価実験

基本的デザインを分析するにあたり，まず感性評価実験を行い，評価データを収集した．本報告で用いる基本的デザインは縦横比が異なるモノクロの四角形を平面上に配置したものである（図１）．縦横比は９段階，明度は４段階のグレースケールを設定した（表１）．サンプル数は３６個で用いた感性ワードは１０個であった．被験者は３７人であった．

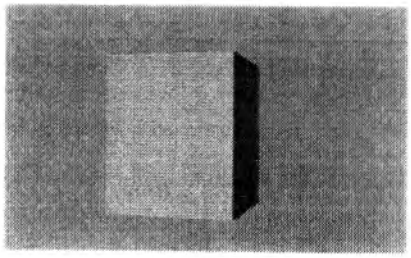


図１ 実験サンプル（比率：3.0，明度：DG）

3．遺伝的アルゴリズムによる分析

基本的デザインにおける辺の比率と感性評価値の関係は凹，凸型や複雑な変化をみせることがわかっている．このようなデータについては非線形モデルをあてはめる必要がある．たとえば多次元非線形の重回帰分析などがそれである．ただし，十分なデータを収集出来ない場合やデータの誤差が含まれる場合は，データ数や誤差精度に敏感な回帰モデルでは正しくデータの特徴を表すことができない場合がある．特に，明度との相互作用が含まれるため非線形性はさらに複雑になる．そこで，本報告では GA を用いて基本デザインの感性評価を試みる．

分析方法としては，SD 評価値と辺の比率の関係が部分的に直線関係にあるとみなし，決定木

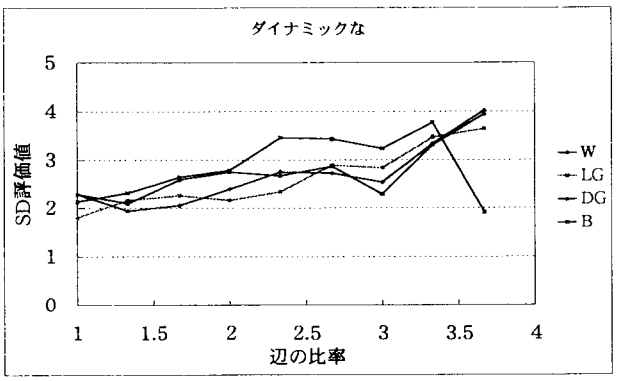


図2 比率，明度と評価値との関係

で分類したデータがなるべく少ない誤差で直線関係をもつようGAによる学習を行う．

GAを用いて決定木を作成し，線形関係の推定を行った結果の一つを図2に示す．縦軸は推定された評価値，横軸は辺の比率を表す．この結果から得られた基本デザインと感性との特徴的な関係をまとめてみた．

1.明度W（白）の推定値は比率1.0（正方形）で他の明度と値が極端に異なることが多い．すなわち白は形体比1付近で特異点を持つと考えられる．感性ワード：形がよい，美しい，高級感のある，上品な

2.明度LG（ライトグレー）の推定値は比率1.67で極端に低くなる．感性ワード：形がよい，美しい，高級感の有る，モダンな，上品な

3.明度DG（ダークグレー）の推定値は比率3.0でピーク（正方向もしくは負の方向の山）を持つ，また比率1.33にもピークがいくつかある．感性ワード：形がよい，かわいらしい，美しい，シンプルな，高級感のある，カジュアルな，上品な

4.明度B（黒）の推定値は比率3.67においてピークを持ち，他の明度と値が極端に異なることが多い．感性ワード：形がよい，美しい，シンプルな，ダイナミックな，上品な

4．考察

以上の結果から明度がSD評価値と辺の比率の関係に強く影響していると言える．すなわち明度と辺の比率との間には明確な組み合わせの効果がある．例えば白は正方形で他の明度と明らかに違う感性を持っている．また，明度B（黒）も辺の比率が最も大きい3.67で他の明度と明らかに異なる．2つのグレーにおいては1つないし2つのピークを持ち，そのピークが存在する辺の比率は明度によって異なる．

5．まとめ

今回行った実験では，基本デザインの辺の比率と明度の交互作用を抽出したが，その結果から明度の違いによって辺の比率のピーク値が異なるが明らかになった．図形の物理的な特徴が比例関係ではなくピークを持つということは、感性が単純に長さや大きさのみではなく、例えば黄金比のような特別な比率で変化することがわかった。非線形分析手法を用いることで，そのようなピークが明度によって変化することがわかった．

参考文献

[1] 土屋敏夫，他: 遺伝的アルゴリズムを用いたファジィ決定木の構造学習，ファジィ学会誌，Vol. 9, No. 6, pp. 900-907, 1997.

[2] Tsuchiya, T., Maeda, T., Matsubara, Y., Nagamachi, M., A Fuzzy Rule Induction Method using Genetic Algorithm, International Journal of Industrial Ergonomics, No. 18, pp.135-145, 1996.

連絡先：
〒751-8510
下関市大学町2-1-1
下関市立大学
土屋敏夫
Tel. 0832-54-8632　Fax. 0832-52-8099
E-mail: tsuchiya@shimonoseki-cu.ac.jp

言語変数データによる区間順序関係の導出

Rule Extraction from Information Systems with Interval Values

田中英夫
Hideo TANAKA
広島国際大学人間環境学部
Hiroshima International University

杉原 一臣
Kazutomi SUGIHARA
福井工業大学経営工学科
Fukui University of Technology

Abstract: In AHP(Analytic Hierarchy Process), the importance degree of alternatives is derived from human's subjective judgment. Since the judgment is not necessarily consistent, there exists the problem of adjusting the evaluations in AHP. Interval AHP is proposed as the method for reflecting uncertainty of human judgment on the obtained weights. In the conventional AHP, crisp values are given as pairwise comparisons of alternatives. It is easy to express the evaluations by linguistic data. In this paper, the method for deriving weights from linguistic data is proposed.

1 はじめに

AHP[1](Analytic Hierarchy Process) は人間の主観的な判断を利用して，重要度を算出する手法である．一般に意思決定者の下す判断は必ずしも一貫していないので，評価の整合性の問題が存在する．与えられた一対比較値の不整合性やあいまいさを区間ウェイトに反映する方法として，区間 AHP(Interval AHP)[2] が提案されている．従来の区間 AHP では，意思決定者が「代替案 X_i は代替案 X_j より～倍から～倍良い.」という形で一対比較評価を示し，その評価を区間データとして表現していた．しかし，言語データの方が人間にとってより容易に評価の判断を行うことができると考えられる．本論文では，一対比較評価を言語データによって表現し，区間 AHP を用いてその言語データから区間ウェイトを求める．さらに，その区間ウェイトから順序関係を導出する方法を述べる．

2 言語変数データを用いた区間ウェイトの算出

従来の区間 AHP では，一対比較評価に区間データを用いている．例えば，「代替案 X_i は代替案 X_j より 3 倍から 5 倍良い.」という評価を区間値 $[A_{ij}] = [3,5]$ と表現する．一対比較値の区間は

$$[A_{ij}] = [a_{ij}^L, a_{ij}^U] \tag{1}$$

と表し，A_{ij} と A_{ji} との逆数の関係については，区間の両端が次のような対応関係を持っているものと仮定している．

$$a_{ij}^L = 1/a_{ji}^U,\ a_{ij}^U = 1/a_{ji}^L \tag{2}$$

しかし実際には，具体的にその一対比較評価を「何倍良い」と表すより，「やや重要である」や「かなり重要」と表す方が，意思決定者はより容易に評価できる．ただし言語変数データにもあいまいさが含まれているので，言語変数データを取り扱う場合についても，区間値でウェイトを算出する方が望ましいと考えられる．そこで，意思決定者によって与えられた言語変数データから区間重ウェイトを導出する方法を以下に述べる．

まず言語表現に対応して，一対比較値を次のようなファジィ数で表現する．代替案 X_i と X_j の良い方から見た一対比較評価を以下のように表す．

同じ程度良い	$\leftrightarrow$	$(1, 0.5, 1)_{NT}$
やや良い	$\leftrightarrow$	$(3, 2)_T$
かなり良い	$\leftrightarrow$	$(5, 2)_T$
非常に良い	$\leftrightarrow$	$(7, 2)_T$
きわめて良い	$\leftrightarrow$	$(9, 2, 0)_{NT}$

ここで，$(a_{ij},\ c_{ij},\ d_{ij})_{NT}$ は非対称三角型ファジィ数であり，次のようなメンバシップ関数で表される．

$$\mu_{A_{ij}}(x) = \begin{cases} 1 - \frac{(a_{ij}-x)}{c_{ij}}, & \text{if } a_{ij} - c_{ij} \leq x \leq a_{ij} \\ 1 - \frac{(x-a_{ij})}{d_{ij}}, & \text{if } a_{ij} \leq x \leq a_{ij} + d_{ij} \\ 0, & otherwise \end{cases} \tag{3}$$

また，$(a_{ij},\ c_{ij})_T$ は対称三角型ファジィ数であり，そのメンバシップ関数は (3) 式の $c_{ij} = d_{ij}$ の場合と同じである．

次に，このファジィ数を区間データに変換する．ファジィ集合の h レベル集合は，以下のように定義される．

$$[A_{ij}]_h = \{x | \mu_{A_{ij}}(x) \geq h\},\ 0 < h \geq 1 \tag{4}$$

上式から，三角型ファジィ数の h レベル集合は次のような閉区間となる．

$$[A_{ij}]_h = \left[(a_{ij},\ c_{ij},\ d_{ij})_{NT}\right] \tag{5}$$

$$= [a_{ij} - (1-h)c_{ij}, a_{ij} + (1-h)d_{ij}]$$
$$= \left[(a_{ij}^L)^h, (a_{ij}^U)^h\right]$$

ただし，$[A_{ij}]_h$ と $[A_{ji}]_h$ の関係は，(2) 式の区間データについての逆数関係と同じであると仮定している．h レベル集合については，h の値を大きく取れば取るほど区間データの幅が広くなるので，言語変数データの可能性を大きく見積もっていると解釈できる．

以上の操作により得られた区間データ $\left[(a_{ij}^L)^h, (a_{ij}^U)^h\right]$ を，区間 AHP に適用し区間ウェイト $W_i = \left[\underline{w_i}, \overline{w_i}\right]$ を算出する．区間 AHP では，区間データを包含関係により上側と下側から分析する [2].「上近似モデル」と「下近似モデル」という 2 つの近似モデルから成り立っており，それぞれが「必然性」と「可能性」の概念に基づいた評価モデルになっている．包含関係と区間ウェイトに関する正規化の条件の下で，区間 AHP の上近似モデル <Upper> と下近似モデル <Lower> は，以下のように定式化される．

< Upper >

$$\min_{\overline{w_i}, \underline{w_i}} \quad J = \sum_i \left(\overline{w_i} - \underline{w_i}\right) \tag{6}$$

subject to (7)

$$\forall\, i,j\,(i \neq j) \qquad (a_{ij}^U)^h \underline{w_j} \leq \overline{w_i}$$
$$\forall\, i,j\,(i \neq j) \qquad \underline{w_i} \leq (a_{ij}^L)^h \overline{w_j}$$
$$\forall j \qquad \sum_{i \in \Omega - \{j\}} \overline{w_i} + \underline{w_j} \geq 1$$
$$\forall j \qquad \sum_{i \in \Omega - \{j\}} \underline{w_i} + \overline{w_j} \leq 1$$
$$\forall i \qquad \underline{w_i} \leq \overline{w_i},\ \underline{w_i} \geq 0$$

< Lower >

$$\max_{\overline{w_i}, \underline{w_i}} \quad J = \sum_i \left(\overline{w_i} - \underline{w_i}\right) \tag{8}$$

subject to (9)

$$\forall\, i,j\,(i \neq j) \qquad (a_{ij}^U)^h \underline{w_j} \geq \overline{w_i}$$
$$\forall\, i,j\,(i \neq j) \qquad \underline{w_i} \geq (a_{ij}^L)^h \overline{w_j}$$
$$\forall j \qquad \sum_{i \in \Omega - \{j\}} \overline{w_i} + \underline{w_j} \geq 1$$
$$\forall j \qquad \sum_{i \in \Omega - \{j\}} \underline{w_i} + \overline{w_j} \leq 1$$
$$\forall i \qquad \underline{w_i} \leq \overline{w_i},\ \underline{w_i} \geq 0$$

3 数値例

表 1 のような数値例を考える．4 つの代替案について，次のような一対比較評価が言語変数データによって与えられている．例えば，$*$ 印の値は「代替案 1 は代替案 3 よりやや良い」ということを意味する．与えられた一対比較評価を $h = 0.5$ として区間データに変化し，区間 AHP の上・下近似モデルに適用して得られた結果を表 2 に示す．

表 1：一対比較行列の例

	1	2	3	4
1		やや良 *	かなり良	非常に良
2				やや良
3		やや良		同程度良
4				

表 2：一対比較行列より得られた区間ウェイト (h=0.5)

代替案	下近似 W_i^L	上近似 W_i^U
X_1	[0.3846, 0.4945]	[0.1524, 0.3504]
X_2	[0.1978, 0.3077]	[0.1068, 0.3048]
X_3	0.1538	[0.0690, 0.2670]
X_4	0.1538	[0.0779, 0.2759]

区間ウェイトの大小関係を以下のように定義する．

$$W_i = \left[\underline{w_i}, \overline{w_i}\right] \succeq W_j = \left[\underline{w_j}, \overline{w_j}\right]$$
$$\Leftrightarrow\ \overline{w_i} \geq \overline{w_j},\ \underline{w_i} \geq \underline{w_j} \tag{10}$$

区間の大小関係を用いると，表 2 から次のような順序関係が得られる．

下近似：$X_1 \succeq X_2 \succeq X_3, X_4$

上近似：$X_1 \succeq X_2 \succeq X_4 \succeq X_3$

4 おわりに

本論文では，意思決定者の一対比較評価を言語変数データで表現し，そのデータから区間 AHP を用いて，区間ウェイトを算出する方法を提案した．本提案手法は，言語変数データにより意思決定者が容易に判断を下せ，また区間 AHP が線形計画問題として定式化されているので解が容易に得られることから，現実問題に応用しやすいことが特長である．

参考文献

[1] T.L. Saaty : *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, 1980

[2] 田中 英夫，杉原 一臣：ラフ近似による双対的数理モデル，日本ファジィ学会誌, Vol.13, Num.6, 44-51, 2001

問い合せ先 〒 724-0695 広島県黒瀬町学園台 555-36
広島国際大学人間環境学部感性情報学科
田中 英夫
電話:0823-70-4886 Fax:0823-70-4852
E-mail : h-tanaka@he.hirokoku-u.ac.jp

ファジィ推論を用いた発話者の感情判別
Automatic discrimination of speaker's feelings by using fuzzy inference

神酒 勤 † 田代 純一郎 †
Tsutomu Miki Junichiro Tashiro
† 九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻
Graduate School of Life Science and systems Engineering
Kyushu Institute of Technology

Abstract: Voice involve speaker's emotion. Human beings use it in communication naturally. If the automatic extraction of emotions from speech signal becomes true, the human friendly man-machine interface can be realized. In this paper, the emotion extraction from speech signals using fuzzy inference is described. Typical six emotions, such as "natural", "anger", "joy", "sadness", "surprise" and "hate", are treated. The results of the emotion extraction for speaker-independent voices are shown and the validity of the proposed system is discussed.

1 はじめに

IT革命といわれている現在、我々の生活の中にコンピュータが深く浸透してきている。ここで必要とされるのは、真に人にやさしいマンマシンインターフェースである。中でも音声は最も手軽な情報伝達手段であり、重要な位置を占める。人は、会話において相手の声から話の内容以外に多くの情報を得ている。特に音声に含まれる感情は、上手に対話するための重要な情報といえる。音声から感情情報が抽出できれば、人に優しいマンマシンインターフェースの実現に大きく寄与すると思われる。

これまでに、音声と感情に関わる研究には[1][2]のほか、ファジィ推論を用いた研究[3]等が報告されている。しかし、これらは多数のパラメータを必要としたり、基準音声を必要とすること、パラメータに発話長を用いていること等、話者や発話音声が限定される等の制約があり、不特定話者への適用が難しかった。また、音声は発話時の気分や健康状態にも大きく左右され、同一人物であっても、その特徴が変動するという特性がある。

本研究では、あいまいな情報の取り扱いに優れたファジィ理論を用いて、不特定話者への適用も視野に入れた音声からの発話者感情の判別を試みる。システム設計にあたり、ハードウェア実装を考慮し、判別率を低下させることなく、より少ないパラメータでの実現を試みた。

2 音声と感情

音の大きさは、空気の粗密の差によって決まる。空気の粗密の差が大きければ、鼓膜を大きく振動させるので、大きな音に聞こえる。空気の振動の速さが音の高さに対応するが、ある程度の値になった場合に人間の耳に音として聞こえるようになる。具体的には、1秒間に20回〜2万回(20Hz〜20kHz)程度の空気振動が音として知覚される。

音声の基本周期とは、有声音を発声する際に声門における周期的振動の周期をいう。基本周期は時間を単位とする量であり、その逆数である周波数を音声の基本周波数(ピッチ)という。

声の高さや大きさは感情表現に大きな影響を与えると考えられる。例えば、「怒り」は「平静」に比べ、声の高低の範囲が広く、声は大きくなる。また、「悲しみ」は「平静」に比べ、声の高低の範囲は狭く、声は小さくなる、という特徴がある。このような特徴をルール化し、ファジィ推論を行うことで、発話者の感情判別ができそうである。

3 ファジィ理論を用いた発話者の感情判別

3.1 音声の取得と感情判別

音声信号をマイクロフォンで録音する場合、サンプリング時の音量設定や、発話者のマイクからの距離等の録音条件による影響を回避するため、各音声波形の振幅の最大値が 1.0 となるように全音声を正規化する。採取した音声資料から特徴量を抽出するために、フレーム分割を行う。ここでは、フレーム長 23.2ms(1 フレームのサンプル数=1024)、フレームシフト 11.6ms で複数のフレームに分割する。音声信号はピッチ (基本周波数) を含む有ピッチ部とそれ以外に分けられる。音声中の感情表現の情報の多くは、有ピッチ部に含まれると仮定して、ここでは、有ピッチフレーム (ピッチの存在するフレーム) に対して特徴量の抽出を行う。有ピッチフレームの抽出の様子を図 1 に示す。本研究では、特徴量として、①短時間平均パワーの平均 (powave)、②短時間平均パワーの範囲 (powran)、③ピッチの最大値 (pitmax)、④ピッチの最小値 (pitmin) の 4 つを取り扱う。

本システムでは、音声情報から上記 4 つの特

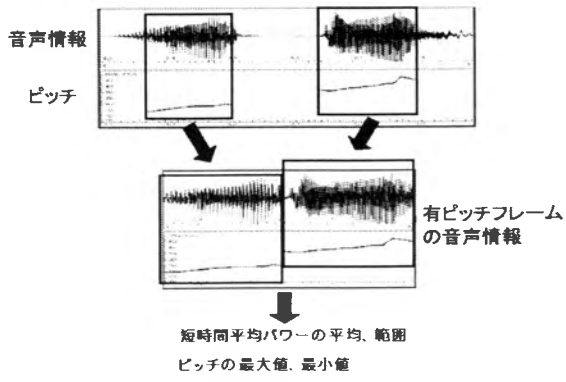


図 1: 有ピッチフレームの抽出

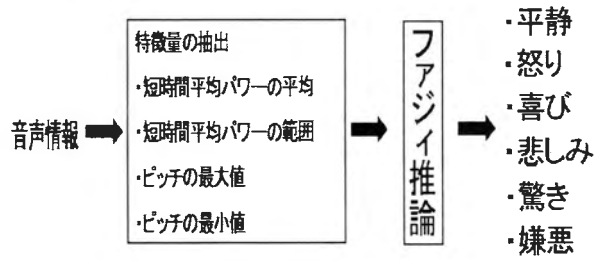


図 2: 感情判別システム

徴量を抽出し、音声に含まれた感情をファジィ推論によって 6 つの感情 (平静、怒り、喜び、悲しみ、驚き、嫌悪) のいずれかに判別する。図 2 にファジィ推論を用いた感情判別システムの処理の流れを示す。

3.2 音声資料

判別実験に用いる音声資料として、1) システム構築用データと 2) システム構築外データの 2 種類の音声資料を作成する。前者は、感情判別のためのファジィルール作成に用い、後者は、構築したシステムの汎用性の確認に用いる。

システム構築用音声資料は、発話者に「平静」、「怒り」、「喜び」、「悲しみ」、「驚き」、「嫌悪」の 6 感情をイメージして「おはよう」と発話してもらった音声資料を用いる。発話者は 22〜24 歳の男性 6 名で、アナウンスや演劇などの経験はない。発話する語句を「おはよう」としたのは、様々なシチュエーションで使用され、語句そのものに感情的意味がないからである。

また、システム構築外データとして、上記の 6 名が「平静」で「こんにちは」、「怒り」で「こら」、「喜び」で「やったー」、「悲しみ」で「ごめんなさい」、「驚き」で「マジで」、「嫌悪」で「もういい」と発話したものを使用する。これらの語句を選んだ理由は、それぞれ日常生活で実際にその感情を込めて発話している語句で、実験の際に感情を込めやすいであろうと考えたからである。

3.3 聴取実験による音声資料の絞り込み

システム構築用データは、音声にそれぞれの感情が適切に表現されていないと意味をなさないので、話者の意図した感情と聴取者に知覚さ

れた感情が一致するか聴取実験を行い、より感情が込められたデータに絞り込む。聴取実験の結果、36個の資料中、21個の音声資料が採用され、それを基にメンバーシップ関数を決定する。音声データの内訳は、「平静」5個、「怒り」3個、「喜び」2個、「悲しみ」4個、「驚き」4個、「嫌悪」3個である。

また、システム構築外データとして録音した36音声に対しては聴取実験を行っていない。感情を込めやすい日常使う語句を選んで発話したので、語句の持つ意味的な影響により感情が区別され、厳密な選別結果が得られないからである。

3.4 メンバーシップ関数とルールの決定

前述の4つの特徴量を用いて、音声に含まれる特徴を定性的にルール化する。

例えば「怒り」を表現した音声は、全体的に音圧が大きく、音圧差も大きい。また、全体的に高い声だが、「喜び」や「驚き」に比べると中程度の部分もある、という特徴を持つ。他の感情もそれぞれ特徴があり、これらをファジィルールで記述したものが表1である。

組み合わせとしては全24通りのルールが存在するが、ここでは7通りのルールしか使用せず、それ以外は”判別不能”とする。

メンバーシップ関数にはシグモイド関数を利用した。システム構築用データ21個を用いてチューニングをした後の、各特徴量別のメンバーシップ関数を図3に示す。ファジィ推論法にはmin-Max法を用いる。

4 判別実験

4.1 実験方法

音声工房[4]を用いて1.0秒分の音声を録音し、wav形式で保存する。まず、音声工房でピッチを抽出し、視察によって訂正した後、最大値と最小値を求める。Matlabで音声波形を正規化し、有ピッチフレームに対して短時間平均パワーの平均と範囲を求める。抽出した4つの特徴量からファジィ推論により感情判別を行う。

4.2 判別実験結果

実験1

表1: 感情判別用ファジィルール

	pow ave	pit max	pow ran	pit min
natural	L	L	L	MorH
anger	H	H	H	M
joy	L	H	H	H
sadness	L	L	L	L
surprise	H	H	L	H
hate	L	L	H	L

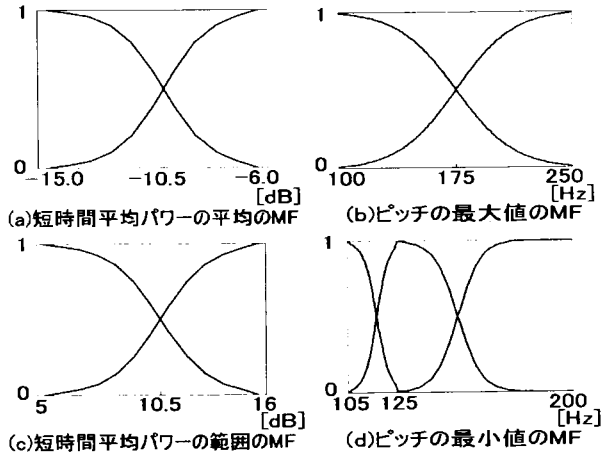


図3: 各特徴量のMF

システム構築用データ21個に対して判別実験を行った結果を表2に示す。平均判別率は90.5％（21個中19個正解）となった。従来手法[1]と比較してパラメータの数を大幅に削減（63個から4個へ削減）したにもかかわらず、同等の判別率を得ている。

実験2

システムの汎用性を評価するために、システム構築外データに対して判別実験を行った。その結果を表3に示す。ここで、「驚き」に対する「マジで」と発話した音声は各発話者のイメージしたシチュエーションに影響され、録音して聞いてみると「喜び」に聞こえ、判別結果も概ね「喜び」に判別されたので実験対象から除外した。結果として、平均判別率は63.3％（30個中19個正解）となった。

実験3

さらに汎用性評価のために、テレビ番組（ド

キュメントやバラエティ）から収録した実際の感情が含まれる音声（リアル感情音声）に対して判別実験を試みた。その結果を表3に示す。平均判別率は67.9％となった。システム構築外データと同様に、「怒り」「喜び」は判別率が高く、「平静」「嫌悪」は判別率が低くなった。その中で、「悲しみ」と「嫌悪」が混じった音声があり、結果は「悲しみ」に判定されたが、ファジィ推論の適合度は「悲しみ」と「嫌悪」が大きな値を示した。このことから、複数の感情が含まれる音声の判別が期待できる。

表 2: システム構築用データに対する判別結果

感情	判別率
平静	100%(5/5)
怒り	100%(3/3)
喜び	100%(2/2)
悲しみ	75%(3/4)
驚き	75%(3/4)
嫌悪	100%(3/3)
合計	90.5%(19/21)

表 3: システム構築外データに対する判別結果

感情（発話語）	判別率
平静（こんにちは）	67%(4/6)
怒り（こら）	83%(5/6)
喜び（やったー）	83%(5/6)
悲しみ（ごめんなさい）	33%(2/6)
驚き（マジで）	———
嫌悪（もういい）	50%(3/6)
合計	63.3%(19/30)

表 4: リアル感情音声に対する判別結果

感情	判別率
平静	20%(1/5)
怒り	83%(5/6)
喜び	100%(3/3)
悲しみ	75%(3/4)
驚き	100%(5/5)
嫌悪	40%(2/5)
合計	67.9%(19/28)

5 おわりに

本研究では、音声からの感情抽出を従来手法に比べ、判別率（90％以上）を低下させることなく、特徴パラメータを大幅に減らすことができた。さらに、同一発話者によるシステム構築外データに対しても判別率63.3％が実現できた。本システムでは平静音声の登録を必要とせず、また、発話長等の言葉を限定するパラメータを用いていないので、不特定話者や未知の言葉に対する感情判別が可能である。

また、男声と女声の差や声の極端な高低に対して、短時間平均パワーの平均、範囲はロバストに対応できるが、ピッチの最大値、最小値は大きく影響を受ける。従ってこれらを上手に判別するには、ピッチの高さに応じて、男声用と女声用のメンバーシップ関数を用意し、使い分ける必要がある。

今後は、未知の話者に対しても高い精度で判別できるように改良をするとともに、ハードウェア実装を行い、リアルタイムでの判別の実現を目指す。

参考文献

[1] 白澤敏行, 山村毅, 田中敏光, 大西昇：”音声に込められた感情の判別”, 信学技法、HIP96-38, pp.79-84(1997)

[2] 重永実：”感情の判別分析からみた感情音声の特性”, 電子情報通信学会論文誌 (A),Vol.J83-A,No.6, pp.726-735(2000)

[3] 森山剛, 小沢慎治：”ファジー制御を用いた音声における情緒性評価法”, 電子情報通信学会論文誌 (D-Ⅱ), Vol.J82-D-Ⅱ,No.10,pp.1710-1720(1999)

[4] 石井直樹著：“音声工房を用いた音声処理入門”, コロナ社 (2002)

連絡先：
〒 808-0196
北九州市若松区ひびきの 2-4
九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻
神酒 勤
Tel/Fax ：093-695-6125
Email : miki@brain.kyutech.ac.jp

ソフトコンピューティングによる
ラチスドームの感性最適設計システムの研究

A study on *Kansei* optimum design system of the lattice dome
by Soft-computing

堤　和敏*　　○伊藤　直樹*　　長澤　佐知子**
Tsutsumi Kazutoshi　Ito Naoki　Nagasawa Sachiko
*芝浦工業大学　　***三菱スペース・ソフトウエア（株）
* Shibaura Institute of Technology　　**MITSUBISHI SPACE SOFTWARE CO.,LTD.

The purpose of this research is to develop the Kansei optimum design system in consideration of "the beauty" of the structure bone. At first, "Beauty" is learned by the neural network, and fuzzy theory finds a degree of satisfaction of "the beauty" and "the cost". The Kansei optimum design system is developed by adding that degree of satisfaction to the evaluation function of the expansion GA.

1．研究目的

既存の『拡張遺伝的アルゴリズムを用いたラチスドームの最適設計』[1]では、遺伝的アルゴリズム（以下 GA とする）を拡張した拡張 GA を用い最適設計を行い、その有効性を検証した。　本研究の目的は既存の研究に、ニューラルネットワークで“美しさ”を学習し、“美しさ”と“コスト”の満足度をファジィ推論法により求める。　その満足度を拡張ＧＡの評価関数に加えることにより、構造骨組の“美しさ”を考慮した感性最適設計システムを構築することである。

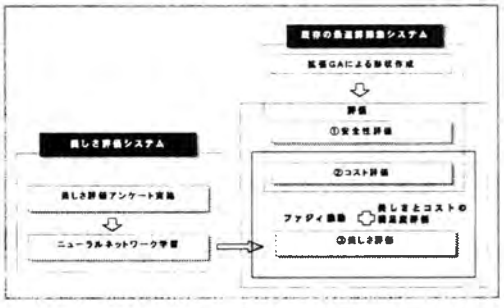


図１：本研究のシステムフロー図

2．最適解探索システム

最適解探索システムでは、ラチスドームを構成するライズ比・径比・部材長・管厚差レベル・管厚比の、膨大な数の組み合わせのなかから、最適な組み合わせを効率よく探索する。　図２に最適解探索システムの流れを、図３に実行画面を示す。

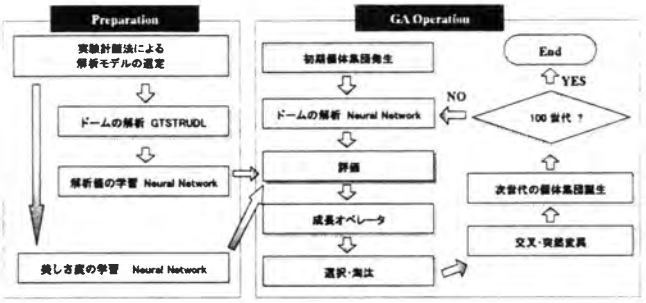


図２：最適解探索システムフロー

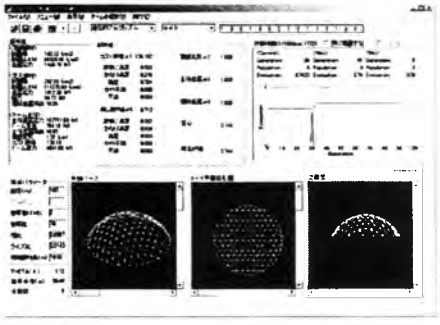


図３：最適解探索システム実行画面

既存の最適解探索システムでは、「評価」の際、

○　コスト（重量で評価）

○　安全性（変形評価・全体座屈評価・個材座屈評価）

を評価基準としている。　本研究では、新たに、

○　「美しさ」「コスト」を満足度で表現し
　評価基準に加える。

①　美しさ度と満足度のメンバーシップ関数

学習用美しさ評価システムで作成された重みファイルを用い、ニューラルネットワークで個体の美しさ度を推定する。推定された美しさ度に対して、図４に示すメンバーシップ関数で満足度を表現する。

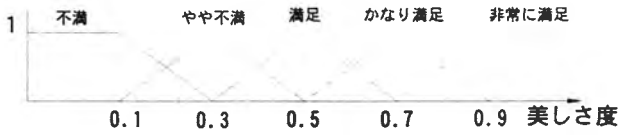


図４：美しさ評価

② コストと満足度のメンバーシップ関数

コストの満足度は、投影面積に対する鉄骨重量で評価する。

ユーザが入力した目標コスト（単位面積あたりの重量）を「満足」の度合い1.0として図５のように定義する。

図５：コスト評価

（目標コストを150kgf/㎡とした場合）

③ 美しさとコストの関係は、制御規則（表１）、メンバーシップ関数（図６）に従いファジィ推論法を用いて評価する。

表１：制御規則

		美しさの評価				
		S1	S2	S3	S4	S5
コストの評価	S1	E1	E2	E3	E4	E5
	S2	E3	E4	E5	E6	E7
	S3	E5	E6	E7	E8	E9
	S4	E7	E8E	E9	E10	E11
	S5	E9	E10	E11	E12	E13

S1	S2	S3	S4	S5
非常に満足	かなり満足	満足	やや不満	不満

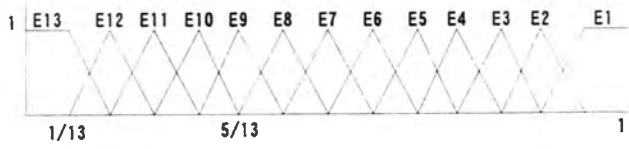


図６：美しさとコストの評価関数

安全性の評価関数（μ_2～μ_4）については既研究[1]のものをそのまま使用する。

④ 総合評価値と最適解の求め方

本研究では、ファジィ推論により求めたコストと美しさの満足度と安全性（変形・全体座屈・個材座屈）・の各評価値の積を総合評価値とし、拡張ＧＡにより、総合評価値の高い個体を探索する。

３．システムの実行と結果

美しさ度のアンケート結果より学習された重みファイルを用い、最適解探索システムを実行する。図７は美しさを考慮した拡張ＧＡにより得られた最適解の形状の一例である。図８は美しさを考慮しない既存システムの拡張ＧＡによる最適解の形状の一例である。 この２つを見比べると図７の方が美しいと感じるがいかがであろうか？

図７：美しさを評価

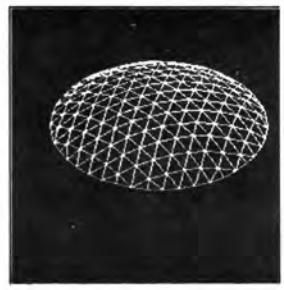


図８：美しさ評価せず

４．結論

ファジィ推論を用いることによって、コストと美しさの評価を合理的にシステムに加えることができた。ただし、コスト評価関数、美しさ評価関数、制御規則は主観的に決めたものであり、より客観性を増すためには、アンケート等を利用した幅広いデータの収集が必要である。

本システムでは、目標コストを入力することによりコストの評価値を簡単に変更することができる。コストの評価を甘くすれば美しさが強調され、コストの評価を厳しくすれば美しさは無視される。 評価関数のグラフ形状を変更することにより利用者の感性を反映した最適解探索が可能であり本システムは有効なツールとなるであろう。

■謝辞■

本研究は，日本学術振興会　平成14年度科学研究費補助金基盤研究(A)(1)「複雑系科学による人間・環境に適応する建築・都市・社会のシステムデザイン」（課題番号：14205087）の援助の下に行われた。また、神戸大学河村教授、谷助教授からは、本研究のベースとなる元神戸大学院生浅野文彦氏作成による「拡張遺伝的アルゴリズムを用いたラチスドームの最適設計」のプログラムをいただきました。感謝します。

【参考文献】

1）浅野文彦：拡張遺伝的アルゴリズムを用いたラチスドームの最適設計、日本建築学会技術報告書、1999年９月、PP229-233

【連絡先】

〒330-8570　埼玉県さいたま市見沼区深作３０７

芝浦工業大学環境システム学科　堤和敏

e-mail: tutumi@sic.shibaura-it.ac.jp

エージェントの感情伝達による集団的行動
A Collective Agent Behavior Based on Communication of Emotions

伝刀 洋輔* 谷口 典之* 星野 孝総** 亀井 且有**
Yosuke Dendo Noriyuki Taniguchi Yukinobu Hoshino Katsuari Kamei

立命館大学大学院理工学研究科*
Graduate School of Science and Engineering
Ritsumeikan University

立命館大学理工学部**
Computer Science
Ritsumeikan University

Abstract In recent years, we study and create a lot of robots that express feelings. Humans will live with these robots and these robots that express feelings will comprise society in the future. In this paper, we construct an environment where an agent expresses its feelings to convey its intentions to other agents. Then we examine the collective behavior by which agents express feelings to each other and the effects of the feelings between the agents.

1 はじめに

近年，感情を持つかのようなロボットに関して数多くの研究，開発が行われており [1]，主なものとして，介護ロボット，家事ロボット，ペット型ロボットなどが挙げられる [2]．これらは人に楽しみや安らぎなどの精神的効果を与え，心や生活を豊かにすることが期待されている．また感情を持たせることでロボットが自律的な行動を取ることができるならば工学的な応用も期待できる [3]．一方，機械との円滑なインタラクション，コミュニケーションを実現し，人間と機械の共生する社会を目指す上でも，ロボットに感情を持たせることは重要である．また，人や動物の行動・意思決定の過程に見られるように，曖昧性・多様性を含む高次の情報処理のためにもその導入は必要である [3]．将来，このように感情を持ったロボットが増加することで，人と感情を持ったロボットが共存するようになる．また，感情を持つロボット同士での社会が形成されていくことが考えられる．

そこで本研究では機械に感情を実装し，感情を持つ機械同士での相互作用や，エージェントによって構成される社会の挙動について検証を行う．

2 感情

感情は数多くの研究者により様々に定義されており，その性質ゆえに全てを明確に示すような定義は難しい．そこで多くの研究者の定義において共通する要素をあげる．それは，感情が生体にとって重要な事象に対する反応，あるいは生体の持つ利害関心とその達成状態の組み合わせから特異的に生み出されてくる反応である．[4]．

多くの研究者は特定の感情をそれ以上分割できない感情の最小単位として「基本情動」が存在するとしている．そしてその他のあらゆる感情は基本情動の合成，あるいは変種であるとしている．このような考え方を基本情動理論と呼び，多くの研究者が支持している．しかし，基本情動理論自体は支持されているものの，基本情動が何かという定義は研究者によって異なり，定義されていない．

一方，武者は人間の頭部に電極をつけ，その脳波を測定することで感情を分析する感性スペクトラム分析法という手法を用いて感情を測ることを試みている．これによると「怒り/ストレス」,「悲しみ/落ち込み」,「喜び/達成感」,「弛緩（リラックス）」を基本単位としており，その結果から，怒りと悲しみは生理的に別の状態であることが証明されている [5]．

また，人間や動物は自らの感情を意思・行動決定に利用しているが，同時に対象への意思伝達手段としても用

いている．動物が敵に対して怒りを表出することによって威嚇を行うなどといった行動がこれにあたる．相手との関係が複雑になる人間においてはパーソナルスペースと呼ばれる空間がある [6]．これは相手との社会的関係によって確保する空間で，その空間を侵されることで快や不快などといった感情や，時には混乱などといった状態を引き起こす．電車に乗った際，他人の隣には座らず，離れて座るといった行動がこれにあたる．

3 感情を表出するシステム

感情を表出するシステムは，主にペットロボットや介護ロボットなどに応用されており，特にペットロボットは 96 年にウィズ社とバンダイ社から電子ペットとして「たまごっち」が，98 年にはタイガーエレクトロニクス社から「ファービー」が，99 年にはソニーから「AIBO」が発売されるなど，数多く実用化されており，人に対して楽しみや安らぎといった，実際のペットと同様の精神的効果を与えている．これらのロボットでは人に対して感情を表現する手段として行動，動作，CG（液晶ディスプレイ）による表情，音声などの手段を用いている [7]．これらにおいて，感情は人間に対して自らの状態を伝え，人とロボットでの間におけるコミュニケーションの手段として使われている．また，感情はロボットの行動のための指針としても用いられている．

4 意思伝達に感情を用いる集団モデル

本研究では以下のようなモデルを構築し，感情を持つ機械同士での相互作用や，エージェントによって構成される集団の挙動について検証を行う．

モデルは肉食動物エージェント（CA），草食動物エージェント（HA），植物エージェント（PA），の 3 種類からなり，各エージェントは多数で群をなす．感情を表出するエージェントは HA のみで，感情を他の HA へ向けて表出する．本モデルの概略を図 1 に示す．この中で小さな円で表されているものが HA，破線で示される円は HA の視界を表す．四角で表されているものが CA，三角で表されているのが PA である．

HA は一定の視界範囲を持ち，視界内の情報を取得する．取得する情報は CA の位置，行動，PA の位置，HA の位置，行動，感情などである．HA のモデル概略を図 2 に示す．これらを入力として自身の行動（移動方向）と，表出する感情およびその強度を出力する．感情は (1) 式に基づいて視界内のエージェントに基づいて伝播する．

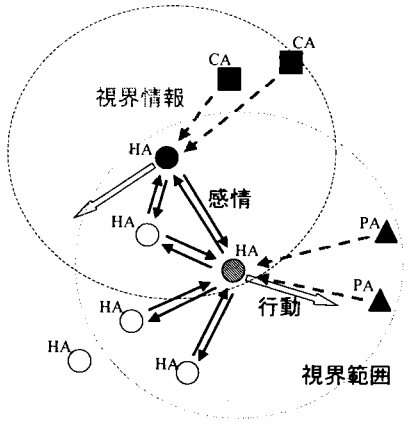


図 1 集団モデル概略

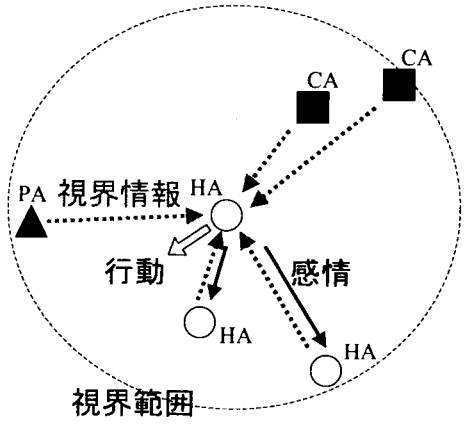


図 2 草食動物エージェント

$$emotion(Fear|Joy) = source(Fear|Joy) \times level \quad (1)$$

emotion は伝播先の感情強度，*source* は伝播元の感情強度，*level* は図 3 に示されるようなエージェント間の距離 *distance* に基づく感情伝播強度である．複数の対象から感情が伝播する場合，その最大値が伝播する．

このように，本研究では意思伝達の手段として感情を定義して，エージェントが置かれた状況から感情を表出し，それを他のエージェントに伝えることで自らの状態を伝える．出力される行動は，あらかじめ定められた表 1 のようなルールによって決められ，CA に一定距離

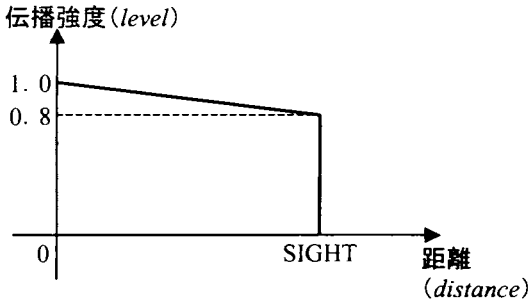


図 3 感情伝播強度

表1:行動生起ルール

視界内のエージェント	状態	出力行動	出力感情
肉食動物		Leave	Fear
植物		Close	Joy
草食動物	Fear	Leave	Fear
	Joy	Close	Joy

まで接近された場合は死滅する.

HA の移動速度はあらかじめ最大速度 speed が決められており，CA から遠ざかる場合，および PA に近づく場合は speed で移動し，仲間の HA に対して移動を行う場合，相手 HA の感情値 *emotion* に比例した速度 *emotion* × speed で移動を行う．複数の対象から移動の影響を受ける場合，そのベクトル和から移動先が決定される．以上の移動方法を図 4 に示す.

CA は HA と同様の視界範囲を持ち，視界内の情報

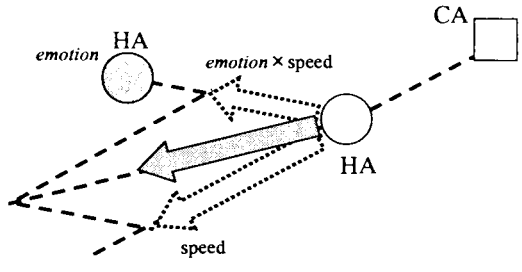


図 4 草食動物エージェントの移動

を取得する．取得する情報は，HA の位置，行動である．CA は感情を持たず，視界内に見つけた最も近い HA を追跡する．また，移動の速度は HA の 2 倍である．CA のモデルイメージを図 5 に示す.

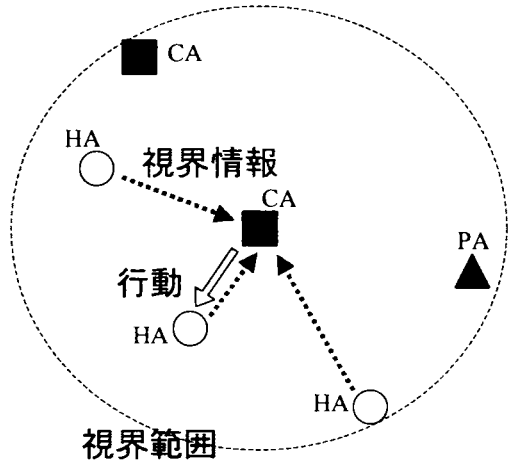


図 5 肉食動物エージェント

5 結果と考察

実験はフィールドを 1000 × 1000，エージェントの視界半径を 100，移動速度をそれぞれ 5/step，10/step とし，フィールドの左上 1/4 に HA を 20 体，それ以外の領域に CA を 8 体，右上 1/4 に PA を 10 体初期配置し，それぞれのエージェントの動きを観察した．その際，感情はその推移がわかるように [0,1] の感情強度を [0,256] の RGB による色に換算して表示する.

実験経過の一部拡大図を図 6，図 7 に示す．図中で白抜きの四角で表示されているのが CA，丸で表示されているのが HA，大きな円で表示されているのが CA の視界を表す．HA の視界距離は CA の視界距離と同じため，どちらかが視界内に入った場合はお互いが相手を確認でき，そうでない場合はお互いが相手を認識できない．図 6 のように，ある HA の視界内に CA が入ることで感情に変化が現れ，その感情変化が集団に伝播していく様子が色の濃淡で確認できた．その結果として以下の図 7 のような行動が見られた．図 7 はエージェントの行動した軌跡を表し，表示されている大きな円は軌跡の終端での CA の視界を表しており，HA1 が右の CA に補足されている．HA2，HA3 は HA1 の感情の影響で感情が変化し，CA を視界内に捕らえる前に避けるような動きを

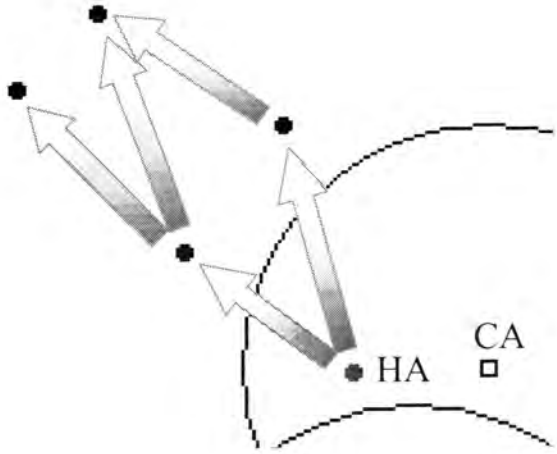


図 6 感情の伝播

取っている．多くのエージェントがこのような行動を取ることで生存期間を長くすることができた．

6 おわりに

今回，あらかじめ作成された非常に単純なルールによって，感情という要素から行動を決めるエージェント群を作成した．そして，その感情の伝播によって各 HA が情報を直接的に得なくても，視野範囲外の CA を回避するような行動を取っていることが確認できた．

今後はより複雑なルールの構造やその決定方法，エージェントの学習などについて検討する．同時に，野生動物の行動や人間の集団心理などへのシミュレーションとしての本モデルの適用について検討する．

参考文献

[1] 牛田博英，中嶋宏：感情を持つ人工システム-ソフトウェアシステムを中心に-；日本ファジィ学会誌，Vol.12, No.6, pp.762-769(2000)

[2] 柴田崇徳：感情を持つかのような人工システム-人工物を中心に-；日本ファジィ学会誌，Vol.12, No.6, pp.752-761(2000)

[3] 岡田直之：感情の工学的応用の動向と課題；日本ファジィ学会誌, Vol.12, No.6, pp.722-729(2000)

[4] 遠藤利彦：喜怒哀楽の起源 情動の進化論・文化論；岩波書店 (1996)

[5] 武者利光:「こころ」を測る；日経サイエンス, Vol. 26, No. 4, pp. 20–29 (1996)

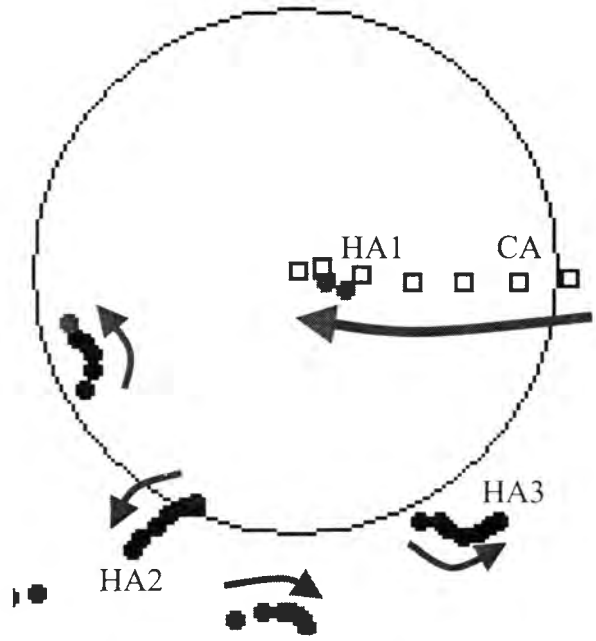


図 7 エージェントの行動軌跡

[6] 市川典義，佐竹宣夫：社会生活の心理学；福村出版 (1989)

[7] 牛田博英，平山裕司，中嶋宏:デジタルペット～心を持った機械たち～; 情報処理，Vol.41，No.2，pp127-136(2000)

[お問い合わせ]
傳刀洋輔
立命館大学大学院理工学研究科
滋賀県草津市野路東 1-1-1
TEL：077-561-2807
FAX：077-561-2807
Email：dendo@spice.cs.ritsumei.ac.jp

状況を考慮したファジィ評定について

A study on situation-dependent fuzzy rating

林 篤司
Atsushi Hayashi

筑波大学大学院 システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

鬼沢 武久
Takehisa Onisawa

筑波大学 機能工学系
Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

Abstract： Fuzzy sets expressing categories in fuzzy rating, which is a kind of psychological scaling, are dependent on situations. This paper assumes that a mapping exists between fuzzy sets expressing categories in some situation and those in another situation and that fuzzy sets expressing categories in some situation are obtained by fuzzy sets in another situation and the mapping between them.

The usefulness of the present method is confirmed by the experiments comparing fuzzy sets obtained by the presented method with those identified directly by fuzzy rating. The normalized distance is used to compare both fuzzy sets and the experiment result shows that the normalized distances between both fuzzy sets are enough small. Therefore, the presented method is feasible as psychological scaling.

1. はじめに

身長や体重などの物理量で表わすことができる属性を評価するとき、「彼は 170cm である」「彼は 65kg である」というように物理量を直接示すのではなく、「彼は背が高い」「彼はやや痩せている」といったように、言語表現を用いて評価を行なうことがある。このような評価を行なうとき、評価に用いる尺度には心理尺度[1]が用いられている。心理尺度を構成するための手法として心理尺度構成法[1]が提案されており、尺度構成に用いられるカテゴリが言語表現のように曖昧さを含むものについては、心理尺度構成法にファジィ理論をとりいれたファジィ評定[2]が有効とされている。

一方、例えば身長が 170cm の男性に対し、背の高さの程度を言語表現を用いて評価する場合、その男性が小学生である場合と、NBA 選手である場合とでは評価に用いる言語表現は必ずしも一致しない。これは、心理尺度が状況に依存するためである。状況依存を扱った研究はいくつかあり[3][4]、状況に依存したファジィ集合の構成手法についての研究[5][6][7]や、逆に、複数の状況における評価を元にファジィ集合を構成する研究[8]などが提案されている。これらの手法では状況に依存したファジィ集合は状況毎に個別に構成されている。しかし、意思決定や説明においてアナロジー[9]が用いられるように、ある状況における心理尺度は、他の状況における心理尺度から類推されたものと考えられる。

状況に依存したファジィ集合の構成について以前に行なった研究[10]では、状況を集合で定義し、状況間に写像が存在すると仮定している。しかし、アナロジーでは対象や事例の間に対応関係を考えているように、評価を行なう対象の間に写像が存在すると仮定する方が妥当であると考えられる。そこで、本論文では異なる状況のもとで用いられる同じカテゴリに対応したファジィ集合間に写像が存在すると仮定する。また、写像を用いて得られるファジィ集合の心理尺度としての有効性を、ファジィ評定を用いて直接求めたファジィ集合と、写像を用いて得られるファジィ集合を比較することで検証する。

2. 定義と仮定

状況に依存したファジィ評定を行なう場合について以下の定義と仮定を行なう。なお、ここでは「身長」や「体重」などを属性と呼び、「170cm」や「65kg」のように属性を物理量で表わしたものを属性値と呼ぶことにする。また、属性 A の属性値に対してファジィ評定を行なうものとする。

定義1：評価対象

状況 S においてファジィ評定を行なう対象となる属性値の集合を R_S とし、これを評価対象とする。なお、本論文では属性値が物理量で表わされる属性、および評価対象が閉区間で表わされる状況のみを扱うものとする。

定義2：カテゴリ

$c_i \quad (i=1,2,\cdots,n)$ を、属性 A の属性値に対してファジィ評定を行なうときに用いるカテゴリとする。また、状況 S におけるカテゴリ c_i をファジィ集合 $\tilde{C}_i^S$ $(i=1,2,\cdots,n)$ で表し、式(1)で定義する。

$$\mu_{\tilde{C}_i^S} : R_S \rightarrow [0,1] \tag{1}$$

仮定：異なる状況間のカテゴリを表わすファジィ集合の関係

状況 S および T における評価対象をそれぞれ R_S, R_T とする。このとき、写像 $f_{R_S \rightarrow R_T} : R_S \rightarrow R_T$ が

存在し、$f_{R_S \to R_T} : R_S \to R_T$ による $\tilde{C}_i^{R_S}$ $(i=1,2,\cdots,n)$ の像 $f_{R_S \to R_T}(\tilde{C}_i^{R_S})$ が $\tilde{C}_i^{R_T}$ に等しいものとする。なお、$f_{R_S \to R_T}(\tilde{C}_i^{R_S})$ は拡張原理[11]より式(2)で表わされる。

$$\mu_{f_{R_S \to R_T}(\tilde{C}_i^{R_S})}(t) = \begin{cases} \bigvee_{s \in f^{-1}_{R_S \to R_T}(t)} \mu_{\tilde{C}_i^{R_S}}(s), & t \in f_{R_S \to R_T}(R_S) \\ 0, & t \notin f_{R_S \to R_T}(R_S) \end{cases} \quad (2)$$

$(i=1,2,\cdots,n)$

ただし $f^{-1}_{R_S \to R_T}(t) = \{s \mid t = f_{R_S \to R_T}(s), t \in f_{R_S \to R_T}(R_S)\}$ で定義する。また、$f_{R_S \to R_T}(R_S)$ は R_S の $f_{R_S \to R_T}$ による像とする。

以上の定義と仮定により、ある状況におけるカテゴリを表わすファジィ集合を、異なる状況における同じカテゴリを表わすファジィ集合と、評価対象間の写像を用いることで得ることができる。以下に、属性「身長」の属性値に対して状況に依存したファジィ評定を行なう例を示す。「NBA 選手について会話をしている」という状況から考えられる評価対象を R_S、「小学生について会話をしている」という状況から考えられる評価対象を R_T とする。このとき R_S, R_T は例えばそれぞれ「NBA 選手として考えられる身長の範囲」、「小学生として考えられる身長の範囲」となる。属性「身長」の属性値に対するファジィ評定で用いるカテゴリを c_i $(i=1,2,\cdots,n)$ とし、状況 S でのカテゴリ c_i を表わすファジィ集合 $\tilde{C}_i^{R_S}$ $(i=1,2,\cdots,n)$ が既に求められているとする。このとき、状況 T でのカテゴリ c_i $(i=1,2,\cdots,n)$ を表わすファジィ集合 $\tilde{C}_i^{R_T}$ を、R_S から R_T への写像 $f_{R_S \to R_T}$ による $\tilde{C}_i^{R_S}$ の像として得ることができる。

定義の概念図を図1に示す。

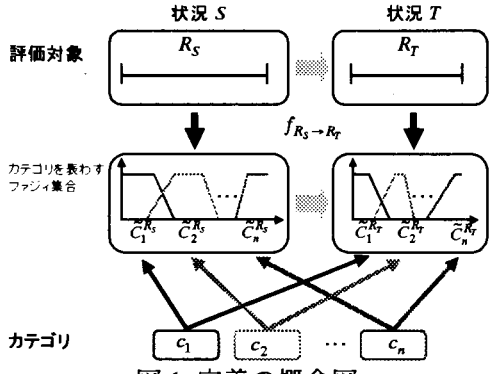


図1 定義の概念図

3．実験

2 章で行なった定義と仮定をもとに、写像を用いて得られるファジィ集合の心理尺度としての有効性を検証するために、実験を行なう。実験では、写像を用いて得られるファジィ集合を、ファジィ評定によって直接求めたファジィ集合と比較する。実験の被験者は 10 名（男性 8：女性 2）で、筑波大学の大学生または大学院生である。

3．1 ファジィ評定

実験では、被験者に表1に示す6つの状況を示し、被験者は各状況を想定した上でファジィ評定を行なう。また、状況 1,2,3 では属性「気温」の属性値に対してファジィ評定を、状況 4,5,6 では属性「身長」の属性値に対してファジィ評定を行なうものとする。

表1 ファジィ評定の際に示す状況

状況 1	夏に屋外にいる
状況 2	冬に屋外にいる
状況 3	1 年を通じた気候の話をしている
状況 4	小学 1 年生について会話をしている
状況 5	小学 6 年生について会話をしている
状況 6	小学生全般について会話をしている

被験者はファジィ評定を行なう前に評価に用いるカテゴリとなる言語表現を 5 つ選択する。表 2 と表 3 に被験者が選択した言語表現を示す。

被験者によって選択した言語表現は異なるが、実験を通じて同じ属性に対する評価には同じ言語表現を用いる。例えば被験者 3 には、属性「気温」の属性値に対するファジィ評定に用いるカテゴリとして「とても寒い」「少し寒い」「平均的」「少し暑い」「とても暑い」を示す。以後、属性「気温」の属性値に対するファジィ評定に用いるカテゴリを $C_1 \sim C_5$、属性「身長」の属性値に対するファジィ評定に用いるカテゴリを $H_1 \sim H_5$ とする。

表2 属性「気温」の属性値に対するファジィ評定に用いる言語表現

被験者	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
1	非常に寒い	少し寒い	丁度いい	少し暑い	非常に暑い
2	寒い	少し寒い	平均的	少し暑い	暑い
3	とても寒い	少し寒い	平均的	少し暑い	とても暑い
4	非常に寒い	少し寒い	平均的	少し暑い	非常に暑い
5	とても寒い	少し寒い	どちらでもない	少し暑い	とても暑い
6	とても寒い	少し寒い	どちらでもない	少し暑い	とても暑い
7	とても寒い	少し寒い	平均的	少し暑い	とても暑い
8	とても寒い	少し寒い	平均的	少し暑い	とても暑い
9	とても寒い	少し寒い	どちらでもない	少し暑い	とても暑い
10	とても寒い	少し寒い	平均的	少し暑い	とても暑い

表3 属性「身長」の属性値に対するファジィ評定に用いる言語表現

被験者	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
1	とても背が低い	やや背が低い	平均的	やや背が高い	とても背が高い
2	背が低い	少し背が低い	平均的	少し背が高い	背が高い
3	非常に背が低い	やや背が低い	平均的	やや背が高い	非常に背が高い
4	非常に背が低い	少し背が低い	平均的	少し背が高い	非常に背が高い
5	とても背が低い	やや背が低い	普通	やや背が高い	とても背が高い
6	とても背が低い	少し背が低い	どちらでもない	少し背が高い	とても背が高い
7	とても背が低い	少し背が低い	平均的	少し背が高い	とても背が高い
8	とても背が低い	少し背が低い	平均的	少し背が高い	とても背が高い
9	とても背が低い	少し背が低い	平均的	少し背が高い	とても背が高い
10	とても背が低い	少し背が低い	平均的	少し背が高い	とても背が高い

カテゴリを表わすファジィ集合の同定には BASE 法[12]を用いる。BASE 法では、求めるファジィ集合を台形ファジィ集合と仮定し、評価対象内の要素について、「一致する」「一致しない」「どちらでもない」の３値評価を行なうことで、ファジィ集合の１レベル集合および台集合を同定する。このため、被験者に状況を示す際に、その状況で考えられる評価対象の上限と下限を尋ねている。

３．２ 評価対象間の写像の同定

評価対象間の写像として次の４つの関数を仮定する。写像としてこれらの関数を仮定するのは、異なる評価対象間の写像は比較的単純に表されると考えられるためである。なお、本論文では同一の属性の属性値に対してファジィ評定を行なった場合について仮定を行なっている。このため、例えば状況 1 で考えられる評価対象と状況 4 で考えられる評価対象との間の写像のように、異なる属性の属性値についてファジィ評定を行なったときの評価対象間の写像については扱わないものとする。よって、状況 1,2,3 および状況 4,5,6 で考えられる評価対象について、被験者ごとにそれぞれ 6 通りずつ写像を同定する。

$$f(x)=a_1x+a_0 \tag{3}$$

$$f(x)=b_2x^2+b_1x+b_0 \tag{4}$$

$$f(x)=c_2\log(x+c_1)+c_0 \tag{5}$$

$$f(x)=d_2e^{d_1x}+d_0 \tag{6}$$

関数(3)から関数(6)のパラメータ値(a_j、b_j、c_j、d_j、$i=0,1$、$j=0,1,2$)は、ファジィ評定によって求められたファジィ集合の１レベル集合と台集合のデータから、最小２乗法[13]を用いて同定する。なお、写像の同定には、状況 1,2,3 で考えられる評価対象間の写像についてはカテゴリ C_1,C_4,C_5 を表わすファジィ集合のデータを用い、状況 4,5,6 で考えられる評価対象間の写像についてはカテゴリ H_1,H_4,H_5 を表わすファジィ集合のデータを用いる。

３．３ ファジィ集合の比較

写像を用いて得られるファジィ集合と、ファジィ評定を用いて求めたファジィ集合との比較の指標として規格化距離[14]を用いる。ファジィ集合 $\tilde{A}$ と $\tilde{B}$ との間の規格化距離 $\delta(\tilde{A},\tilde{B})$ を式(7)で定義する。

$$\delta(\tilde{A},\tilde{B})=\frac{1}{2(\beta_2-\beta_1)}\int_0^1(|a_1(\alpha)-b_1(\alpha)|+|a_2(\alpha)-b_2(\alpha)|)d\alpha \tag{7}$$

ただし $\tilde{A}_\alpha=[a_1(\alpha),a_2(\alpha)]$, $\tilde{B}_\alpha=[b_1(\alpha),b_2(\alpha)]$ は $\tilde{A}$ と $\tilde{B}$ の α-カット集合を意味する

規格化距離の概念図を図 2 に示す。なお、規格化距離は 0 から 1 の値をとり、この値が小さいほどファジィ集合 $\tilde{A}$ とファジィ集合 $\tilde{B}$ は類似しており、$\tilde{A}=\tilde{B}$ のとき規格化距離は 0 となる。また、本実験では β_1 と β_2 は状況ごとに尋ねた評価対象の上限(下限)と写像を用いて得られた評価対象の上限(下限)の内、小さいもの(大きいもの)を用いている。

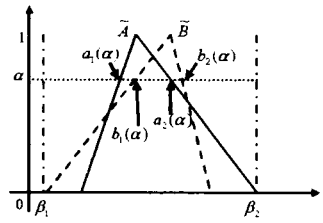


図 2 規格化距離の概念図

比較に用いるファジィ集合は、評価対象間の写像の同定に用いていないもので、状況 1,2,3 ではカテゴリ C_2,C_3 を表わすファジィ集合、状況 4,5,6 ではカテゴリ H_2,H_3 を表わすファジィ集合である。

３．４ 結果と考察

まず、3.2 節で仮定した写像の内、評価対象間の写像としてどの写像を仮定するのが最も有効であるかを検証する。3.2 節で求めた写像を用い、属性「気温」の属性値に対するファジィ評定ではカテゴリ C_1,C_4,C_5 を表わすファジィ集合について、属性「身長」の属性値に対するファジィ評定ではカテゴリ H_1,H_4,H_5 を表わすファジィ集合について、すべての被験者に対し、写像を用いて得られるファジィ集合とファジィ評定を用いて求めたファジィ集合との間の規格化距離を求める。これを平均したものを表 4 に示す。

表 4 仮定した写像による規格化距離の平均の違い

(a)属性「気温」

写像	C_1	C_4	C_5
a_1x+a_0	0.049	0.034	0.032
$b_2x^2+b_1x+b_0$	0.024	0.027	0.024
$c_2\log(x+c_1)+c_0$	0.153	0.076	0.105
$d_2e^{d_1x}+d_0$	0.101	0.152	0.298

(b)属性「身長」

写像	H_1	H_4	H_5
a_1x+a_0	0.033	0.041	0.041
$b_2x^2+b_1x+b_0$	0.030	0.032	0.027
$c_2\log(x+c_1)+c_0$	0.037	0.043	0.043
$d_2e^{d_1x}+d_0$	0.033	0.047	0.049

表 4 より、関数(4)を評価対象間の写像と仮定した場合に規格化距離の平均が最も小さく、評価対象間の写像として有効であることが分かる。そこで、関数(4)を評価対象間の写像と仮定した場合に得られるファジィ集合の心理尺度としての有効性について検証を行なう。

カテゴリ C_2,C_3 およびカテゴリ H_2,H_3 を表わすファジィ集合に対する規格化距離の平均を、比較を行った状況ごとに分けて表したものを表 5 に示す。また、この結果を気温または身長の差として表したものを表 6 に示す。

表 5 状況ごとの規格化距離の平均

(a) 属性「気温」

状況	C_2	C_3
1	0.057	0.056
2	0.051	0.043
3	0.060	0.053

(b)属性「身長」

状況	H_2	H_3
4	0.047	0.058
5	0.039	0.053
6	0.047	0.049

表6 気温（身長）の差に変換した値

(a) 属性「気温」 (℃)

状況	C_2	C_3
1	1.2	1.2
2	1.3	1.1
3	2.5	2.3

(b) 属性「身長」 (cm)

状況	H_2	H_3
4	2.1	2.6
5	1.6	2.2
6	3.6	3.7

写像を用いて得られるファジィ集合が心理尺度として有効かどうか検証するために、ファジィ評定を用いて求めたカテゴリ C_2, C_3, H_2, H_3 を表わすファジィ集合について、被験者ごとのファジィ集合の幅の平均を取り、表6の値をこれと比較する。表6の値が、ファジィ集合の幅の平均より小さければ、写像を用いて得られるファジィ集合の、ファジィ評定を用いて求めたファジィ集合との差はカテゴリの持つ曖昧さと同程度以下であり、心理尺度として有効であると考えられる。ファジィ集合の幅の平均を表7に示す。なお、ファジィ集合の幅とは図3に示すものとする。

表7 ファジィ評定を用いて求めた
ファジィ集合の幅の平均

(a) 言語表現 C_2 (℃)

状況	A-B	C-D
1	2.0	1.9
2	2.2	2.5
3	3.6	3.2

(b) 言語表現 C_3 (℃)

状況	A-B	C-D
1	1.9	2.1
2	2.1	2.6
3	3.5	3.4

(c) 言語表現 H_2 (cm)

状況	A-B	C-D
4	3.6	4.4
5	3.6	4.8
6	6.6	7.3

(d)言語表現 H_3 (cm)

状況	A-B	C-D
4	4.9	4.7
5	3.7	3.6
6	8.6	7.4

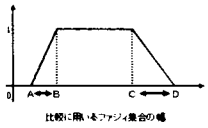


図3 ファジィ集合の幅

表6と表7を比較すると、すべての状況において、表6の値は、A-B 間および C-D 間のファジィ集合の幅の平均よりも小さい。このことから、写像を用いて得られるファジィ集合は、心理尺度として有効であるといえる。

4. まとめ

本論文では状況に依存したファジィ評定として、異なる状況において同じカテゴリを表わすファジィ集合間に写像が存在すると仮定し、この仮定をもとにファジィ集合を求める手法を提案した。また、写像を用いて得られるファジィ集合の心理尺度としての有効性を検証するために実験を行った。実験では、写像を用いて得られるファジィ集合と、ファジィ評定を用いて直接求めたファジィ集合を規格化距離を用いて比較した。その結果、写像を用いて得られるファジィ集合は、心理尺度として有効であることを確認した。

本論文で行なった定義を応用するためには、どのような状況に対してどのような写像を用いるのが最も有効であるか、といった手法の最適化や、どのような状況に対してまで定義が用いることができるか検証することが今後の課題となる。

参考文献

[1] 西里 静彦:応用心理尺度構成法, 誠信書房 (1975).

[2] 吉川 歩:ファジィ評定とメンバーシップ関数同定法, 日本ファジィ学会誌, Vol.10, No.2, pp.184-192 (1998)

[3] John Barwise, John Perry(土屋 俊他 訳):状況と態度, 産業図書株式会社 (1992).

[4] 竹村 和久: 状況依存的意思決定の定性的モデル-心的モノサシ理論による説明-, 認知科学, Vol.5, No.4 ,pp.17-34 (1998).

[5] 高木 友博, 山口 亨, 菅野 道夫:概念ファジィ集合とその連想記憶による実現, 第7回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 ,pp.359-362 (1991).

[6] Alf.C.Zimmer: A model for the interpretation of verbal predictions, International Journal of Man-Machine Studies, Vol.20, pp.121-134 (1984).

[7] Haruhiko Takeuchi : A Technique on Adjusting the System's Knowledge of Linguistic Hedges to Human Naïve Thinking, Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, pp.118-123 (2001).

[8] V. H. Huynh, Y. Nakamori, T. B. Ho, G. Resconi: A Context Model for Constructing Membership Functions of Fuzzy Concepts Based on Modal Logic, Second International Symposium on Foundations of Information and Knowledge Systems, pp.93-104 (2002)

[9] Holyoak Keith J. and Thagard P. (鈴木 宏明, 河原 哲雄 監訳): アナロジーの力 認知科学の新しい探究, 新曜社 (1998).

[10] Atsushi Hayashi, Takehisa Onisawa: A study on situation-dependent fuzzy sets, Proceeding of 1st International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (2002).

[11] 本多 中二, 大里 有生:ファジィ工学入門, 海文堂 (1989).

[12] 吉川 歩,藤本 大助,西村 武: 2種のメンバシップ関数同定法の客観的・主観的比較—ファジィグラフ評定尺度図法と境界漸近推定法について—,第11回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp.405-408 (1995).

[13] 河口 至商 : 多変量解析入門 I, 森北出版株式会社 (1973).

[14] Arnold Kaufmann, Madan M.Gupta(田中 英夫, 松岡 浩 訳) : ファジィ数理と応用,オーム社 (1992).

[問い合わせ先]
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学機能工学系 鬼沢研究室
林 篤司

Tel: 029-853-6188 Fax: 029-853-5207
E-mail: atsushi@fhuman.esys.tsukuba.ac.jp

言葉の関連性を考慮したなぞかけ生成

Generation of NAZOKAKE Considering Relation Among Words

前田　実香
Mika MAEDA
筑波大学大学院システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

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

Abstract: This paper aims at generating NAZOKAKE, Japanese wordplays, considering relations among words. The present NAZOKAKE generating system has database which consists of a set of words, its pronunciation, related words, and their relation degrees, where degrees are set considering some rules. When ODAI, which is theme of NAZOKAKE, is inputted to the present system, some NAZOKAKE words are chosen from database based on relation degrees among words and their pronunciation. NAZOKAKE generated by the present system is evaluated by some subjects in experiments. Experimental results show that understandable and unexpected NAZOKAKE is generated.

1　はじめに

人工知能の研究分野の一つに人間の知的行動の一つであるユーモアに関する研究がある。ユーモアの構造と原因を解析し、人に笑いをもたらすようなシステムを構築することは、人間の思考や行動を理解する上で大きな意義がある。また専門家以外の人々がコンピュータに触れる機会が増えている今日、より親しみの持てるシステムを構築することに役立つと考えられている[1]。

人に笑いをもたらすシステムの例として[2][3]がある。これらの研究では、人間が理解できそれなりにおもしろいと思える駄洒落ができている。しかし駄洒落の候補の決定方法は音韻の類似性や文法的な規則によるもののみで、「おもしろいかどうか」という基準では判断されていない。また出力される駄洒落はあらかじめ登録されたデータから検索して生成されたものに限られている。

そこで本研究では、「おもしろい」と感じる言葉の関係を考え、それを利用して言葉遊びの一つであるなぞかけを生成すること、またデータは追加・修正のできる動的なものとして捉えることによって、より「おもしろい」と思えるようななぞかけが生成できるシステムの構築を目指す。

2　なぞかけについて

なぞかけは「AとかけてBととく。そのこころはC（C'）」という形式の文を考える言葉遊びの一つであり、A、B、C、C'の４つの言葉を用いる。この４つの言葉の関係は図１のようになっている。

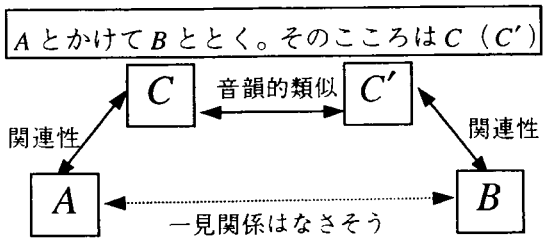


図１　なぞかけに使われる言葉の構造

人間がなぞかけを作るときの一つの方法として、以下のようなものがある[4]。Aという言葉をお題になぞかけを作るときは、まずから言葉Aに関連する言葉Cを思い浮かべ、その言葉Cと音韻的に似た言葉C'を探す。見つけた言葉C'からさらに関連する言葉Bを探し出し、「AとかけてBととく。そのこころはC（C'）」というようになぞかけとして表現する。

このような言葉の関連とそれを考慮した生成の方法をなぞかけ生成システムとして実装する。

3　システムの構造

3.1　システムの概要

前章の言葉の関連性を用いてなぞかけを生成するシステムを考える。図２にシステムの構成図を示す。

お題となる言葉が入力されると、言葉の関連性のデータベースを検索、参照しながらお題についてのなぞかけが一つ、または複数出力される。

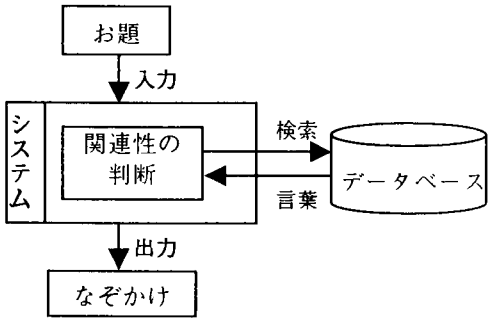


図2　システムの構成図

3.2　データの形式

なぞかけに用いる言葉（図1のA、B、C、C'）のデータは、その語の読みを表わす文字列、任意個数の関連する言葉（以下関連語と呼ぶ）とその関連度から構成される。例えば、「雪」という言葉に対する関連語は図3に示すように、「溶ける」「降る」といった述語となる動詞や「だるま」といった関連する名詞、「ちらちら」といった擬態語などがある。

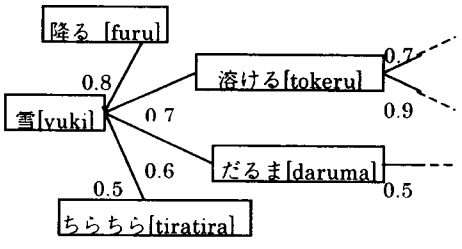


図3　データのイメージ図

3.3　関連度の設定

データとなる言葉の間には、関連の強さを表わす関連度がついている。関連度の値は、主述関係や上位語形容表現といった関係と、辞書[5]の例文中での出現頻度などからあらかじめ定めた以下の規則に従って、0.0～1.0の値を与えている。データの数は220語である。

I. 関連度は0.0から1.0までの値とする。
II. 主語と動詞の関係に分類される言葉同士の関連度は0.7とし、さらに
 i. [5]の辞書中の一方の言葉の説明文中に他方の言葉があれば、登場するたびに関連度を最大1.0まで0.1ずつ増やす。
 ii. 慣用表現にある言葉の関係であれば、関連度を最小0.0まで0.1ずつ減らす。
III. 関連する名詞同士の関係に分類される言葉同士の関連度は0.5とし、さらに
 i. [5]の辞書中の一方の言葉の説明文中に他方の言葉があれば、登場するたびに関連度を最大1.0まで0.1ずつ増やす。
 ii. 慣用表現にある言葉の関係であれば、関連度を最小0.0まで0.1ずつ減らす。
IV. 二つの言葉がつながることによって一方がもう一方を限定する名詞、言い換え、擬音語・擬態語に分類される関係をもつ言葉同士の関連度は0.5とする。
V. 形容表現に分類される関係を持つ言葉同士の関連度は0.8とする。

例えば、「川」と「流れる」は主語と動詞となる関係であり、また国語辞典[5]で「川」を調べると例文中に「流れる」という言葉があるため、規則II-iによって関連度は0.7から0.1上げた0.8に設定する。

以上のようにして設定された関連度をデータベースに登録する。

3.4　出力方法

なぞかけは以下のアルゴリズムによって生成される。まず入力された「お題」を言葉Aとし、Aをデータベースの中から検索する。Aが見つからなかった場合は、後で述べるデータの追加を行う。Aが見つかった場合、次に「こころ」の部分となる言葉Cを決めることになる。データベースからAの関連語を検索し、見つかった関連語を言葉Cとする。さらに「こころ」の部分の音韻的に類似した言葉を探す。先ほど見つけたCの読みを調べ、音韻的に類似した言葉C'をデータのなかから再び検索する。最後に「Bととく」のBに入る言葉を決めるため、C'の関連語を検索し、見つかったら言葉Bとする。この手順で$A \rightarrow C \rightarrow C' \rightarrow B$がすべて見つかった場合は「$A$とかけて$B$ととく。そのこころは$C$（$C'$）」というなぞかけの形で出力する。$C$、$C'$、$B$が見つからなかった場合は生成失敗として終了する。

3.5　関連度

AからC、C'からBを決定するとき、選ぶ言葉の選択方法について述べる。

AとC、C'とBはそれぞれ関連をもつ言葉の組である。なぞかけを生成するにあたって、CとC'は「こころ」にあたる部分であり、なぞかけのおもしろさを引き起こす落ちの部分と言える。AとC、C'とBの関連度が大きい場合、「こころ」の部分が容易に想像できてしまうので意外性がなくなりおもしろくない。逆に関連度が小さすぎる、つまり関連性が薄すぎる言葉の場合は「こころ」の部分を読んでもピンとこない、もしくは意味がわからなくなってしまい、なぞかけにはならない。そこで解の候補を関連度の値によって絞ることにする。

3.6　音韻の類似判断

CからC'を検索するときは音韻の類似性によっている。音韻の類似性の判断は、データの言葉の音韻を表す文字列を比較することによって行う。二つの文字列を比較し、文字の違いが1文字以内であるものを選ぶ。1文字違う場合は[2]で用いている音素類似度を利用する（表1）。二つの音素間の類似性の判断は人間が作った

なぞかけで用いられている言葉を参考に、表 1 で 0.6 を閾値とし、0.6 以上であれば「類似している」、0.6 未満であれば「類似していない」とみなす。

表 1　音素類似度の表

比較対象音素	音素類似度
b, d, g	0.9
p, t, k	0.9
m, n, N	0.9
h, s	0.8
a, o, u	0.7
e, i	0.7
s, z	0.6
b, p	0.6
d, t	0.6
g, k	0.6
上記以外の母音間	0.5
上記以外の子音間	0.1
1音素の脱落・挿入	0.1

（N は撥音の「ん」を表す）

3.7　データの追加・削除

データは固定的なものではなく、追加・削除などの変更が可能である。もし入力した言葉 A がデータ上になかった場合は、その言葉をデータに追加することができる。

追加時には、追加したい言葉 A とそれに関連する任意個の言葉 $C_1 \sim C_n$ をセットにして追加する。そのときに関連度の重みも自由に設定することができる。関連する言葉 $C_i\ (i=1 \sim n)$ がデータ上にあれば、その言葉を介することによって新しい言葉が付け足され、データを増やすことができる。

また付け足したい言葉がデータ上にあるかどうかの検索や、データを削除することもできる。

4　アンケートによる被験者実験

4.1　実験の内容

3 章で述べたシステムによって得られたなぞかけを被験者によって評価する実験を行う。実験は出力に用いる関連度の範囲決定の予備実験とシステム評価の実験の 2 段階に分けて行う。

まず、出力として採用する関連度の範囲を定めるための予備実験を行う。予備実験では、20 代の被験者 4 名に対してシステムが出力したなぞかけを以下の 4 つの点についてそれぞれ 5 段階の評価をしてもらう。

A)意外性があるかどうか
　5 大変ある
　4 少しある
　3 普通
　2 あまりない
　1 全然ない

B)内容が理解、納得できるものであるか
　5 できる
　4 少しできる
　3 ふつう
　2 あまりできない
　1 できない

C)「こころ」がすぐに思いつくかどうか（時間的に）
　5 すぐ思いついた
　4 わりとすぐ思いついた
　3 ふつう
　2 少し考えた
　1 しばらく考えた

D)総合的にみておもしろいかどうか
　5 おもしろい
　4 少しおもしろい
　3 ふつう
　2 あまりおもしろくない
　1 おもしろくない

関連度の範囲を変えたときに出力されるなぞかけの個数と、総合的におもしろい評価されたなぞかけの割合から範囲を決める。

関連度の範囲の目安を求めるため、人間の作ったなぞかけ［6］47 個に使われている言葉の関係 94 個について、3.4 で述べた規則に従って関連度を設定する。それらの関連度の平均値 $\overline{v}$ を求めると $\overline{v}=0.55$ となる。

設定した範囲によって出力されるなぞかけの数が増えたり減ったりする。先ほど求めた目安の平均値 $\overline{v}$ を中心に上下 0.15 ずつの点を最低・最高値とした $[\overline{v}-0.15, \overline{v}+0.15]=[0.4,0,7]$、また平均値 $\overline{v}$ を中心に上下 0.05 ずつの点を最低・最高値とした $[\overline{v}-0.05, \overline{v}+0.05]=[0.5,0.6]$、その中間の範囲の [0.4,0.6] の 3 つを考える。

関連度を [0.4,0.7]、[0.4,0.6]、[0.5,0.6] に定めたときに出力されたなぞかけの数と、それに対して「おもしろい」から「おもしろくない」と評価されたなぞかけの割合を表 2 に示す。

表 2　全なぞかけに対する評価の割合

評価＼関連度の範囲	0.4～0.7	0.4～0.6	0.5～0.6
おもしろい	7.9%	11.0%	25.0%
少しおもしろい	20.3%	20.9%	25.0%
ふつう	35.3%	32.6%	41.7%
あまりおもしろくない	28.0%	23.3%	8.3%
おもしろくない	8.4%	11.6%	0.0%
出力されたなぞかけの数	107 個	42 個	6 個

おもしろいと評価された割合でみると、[0.5,0.6] がよくなっている。しかし、この範囲で出力されたなぞかけは 6 個と非常に少ないため、評価実験に採用する範囲としては不適当である。[0.4,0.7] と [0.4,0.6] の場合を比較すると、評価の割合ではほぼ同程度である。しかし出力されたなぞかけの数は、[0.4,0.6] の場合が 42 個に対して、[0.4,0.7] の場合が 107 個である。また、範囲の上限を 0.7 から 0.6 に狭めることで出力されなく

なったなぞかけの例をみてみると、「服とかけてはさみととく。その心は着る（切る）」がある。これは意外性が低く、時間的にもすぐ思いつきやすいという評価がされている。被験者の負担を考えると出力されるなぞかけの数はあまり多くなく、かつ意外性の高いなぞかけが生成されるほうが望ましいという点からも関連度の範囲は$[0.4,0.6]$を採用することにする。

次になぞかけの評価実験を行う。関連度の範囲を予備実験で求めた$[0.4,0.6]$に設定し、データのうち名詞175語をお題として入力する。お題を名詞に限ったのは、人間が作るなぞかけのお題は通常名詞なので、違和感がないようにするためである。また、出力されたなぞかけのうち「AとかけてBととく」「BとかけてAととく」のように単純にAとBが入れ替わっただけのものを片方にまとめると、42個になる。これを20代の被験者6名に提示し、先ほどの4つの項目について5段階で評価してもらう。

また、この評価の他に特に「おもしろい」「つまらない」と思うものがあれば印をつけ、理由を書いてもらう。

4.2 アンケート結果とその考察

アンケートによってシステムが出力した42個×被験者6人に評価されたのべ252個のなぞかけについて各評価が与えられたなぞかけの個数を表3、それらの平均値を表4に示す。

表3 各評価が与えられたなぞかけの個数

評価＼項目	A	B	C	D
5	58	98	93	27
4	47	51	29	45
3	76	36	43	58
2	31	28	43	63
1	40	39	44	59

表4 各項目ごとの評価の平均値

	A	B	C	D
平均値	3.2	3.6	3.3	2.7

アンケートによる結果からなぞかけ生成システムの性能を検証する。

項目Aの意外性は平均で3.2であり、平均としては普通よりやや良い。全252個のなぞかけ中、評価が4以上の割合は42%、3以上の割合は72%で、意外性のあるなぞかけが生成されているといえる。

項目Bの理解・納得できるかについては、全被験者の平均が3.6であり、評価が4以上の割合も59%になっている。このことから理解・納得できるなぞかけが生成されているといえる。

項目Cのすぐに思いつくかどうかについては、平均は3.3であり、すぐに「こころ」が浮かんでしまうものでもないということがわかる。

最後に項目Dの総合的な評価については、これは被験者による個人差が大きい。全体の平均は2.7でほぼ標準レベルのものが生成されたといえる。しかし中には「特におもしろい」と印がついたものもあり、それなりにおもしろいなぞかけが生成されているといえる。

4.3 出力結果の例

システムによって出力されたなぞかけのうち、被験者の評価が高かったものの例をあげる。

- 「中国」とかけて「宴会」ととく。そのこころは「漢字（幹事）」
- 「おみくじ」とかけて「僧」ととく。そのこころは「凶（経）」

5 おわりに

本研究では人間がなぞかけを考えるときの手順の一つにそったアルゴリズムによって、ある程度人間が意味を理解し、納得できるなぞかけが出力できることが確認された。言葉同士の関連度を考慮することによって意外性があり、時間的にすぐには思いつかないようなぞかけを出力することができた。おもしろさの点については、言葉の関連性がおもしろさに影響する要因の一つであることを示すことができた。

今後はよりおもしろく、また人間が作るような表現豊かなぞかけを出力するために、関連性以外の要因も考える必要があると思われる。

参考文献

[1] G. Ritchie：Prospects for Computational Humor Pp. 283-291 in Proceedings of 7th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN-98), Takamatsu, Japan.(1998).

[2] 滝澤 修、キム ビンステッド：日本語駄洒落なぞなぞ生成システム“ＢＯＫＥ”, 人工知能学会誌, Vol.13, No.6, pp.920-927(1992)

[3] 横川 壽彦：調音類似に基づく駄洒落候補の自動生成, 第10回インテリジェント・システム・シンポジウム公演論文集, pp.253-256(2003)

[4] なぞかけ, http://www6.plala.or.jp/motsu/etc/nazo.html

[5] 「現代国語例解辞典第二版」、小学館、1994

[6] なぞかけ問答、http://www.town.akasaka.okayama.jp/nazokake/

連絡先：
〒305-8573
茨城県つくば市天王台1-1-1 筑波大学鬼沢研究室
前田 実香
Tel:029-853-6188
Fax:029-853-5207
E-mail:mika@fhuman.esys.tsukuba.ac.jp

進化ロボットにおけるファジィクラスタリングを用いたモデル化誤差の自律的補償

A Study on Compensation of Modeling Errors of Evolutionary Robot Using Fuzzy C-Means Clustering.

北畠 真
KITABATAKE Shin
三重大学
Mie University

古橋 武
FURUHASHI Takeshi
三重大学
Mie University

Abstract: The authors have studied a framework for optimization of robot structure and behavior with a compensation of modeling errors of evolutionary robot. Compensation of modeling errors is one of the major topics in the field of evolutionary robotics. In this framework, evolution strategy is employed to estimate likely modeling errors in the simulation environment. Discrepancies between the behavior in the simulation and that in the experiment are used for the estimation. Fuzzy C-Means is used to cluster numerous error-candidates. The authors' method drastically decreases the amount of trial and error using actual experimental setup by this clustering method. Simulations and experiments are done to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

1. はじめに

近年，自らの行動と構造を進化させる進化ロボティクスに関する研究が盛んになりつつある[1][2][3][4]．おかれた環境や与えられたタスクに応じてロボットが自らの構造や行動のパラメータを進化させることで，より柔軟な行動の獲得が出来ると期待されている．しかし，構造を進化的に取得するためには実験環境内で膨大な試行錯誤を行わなければならず，多大な時間と労力を必要とする．さらに多数回の実験によってロボットが消耗することも考えられる．そのためコンピュータ上に実験環境をモデル化し，それを用いたシミュレーションによって構造を獲得することが盛んに試みられている．ここで問題になるのがコンピュータ上にモデル化された仮想的な実験環境（仮想環境と呼ぶ）にはモデル化誤差が含まれることである．このためロボットが実際の実験環境（実環境と呼ぶ）において仮想環境と同じ動作をすることは困難であることが多い．これに対して近藤ら[5]はモデル化誤差にロバストな行動を実現するために，学習方法を進化の対象とすることを提案している．山本ら[6]は評価値を推論することで，実機での試行回数を減らすことを試みている．川瀬[7]らはモデル化誤差をシミュレーション環境において推論し，補償することを試みている．

本稿では，モデル化誤差を自律的に補償し，構造・行動を最適化する進化ロボットの枠組みを示す．本手法では，シミュレーション環境において構造・行動の最適化を行い，これと実機実験における行動の誤差から，シミュレーション環境においてモデル化誤差推定と構造・行動の再最適化を行う．モデル化誤差推定には進化戦略[8]を用いる．その際，推定された複数のモデル化誤差候補に対してクラスタリングを行い，各クラスタ中心が表す誤差値を誤差候補の代表値とみなすことで，誤差候補選択作業の自動化を図る．シミュレーションと，実環境での実験による検証を通して本手法の可能性を示す．

2. 本手法

実環境をモデル化して仮想環境を構築するにあたって，単純な環境ならば精度の良いモデル化が可能である．しかし多くの場合，実環境は複雑なためにモデル化誤差が生じてしまう．

ここでモデル化誤差を表すパラメータ X，環境とロボットのモデル f，動作結果 P の関係は以下のように表現できる．

$$P = f(X)$$

もし実環境の結果が仮想環境と異なるならば，動作結果 P を用いてパラメータ X を推定するという逆問題[$X=f^{-1}(P)$]を解かなければならない．f は非線形関数なので，この問題は進化的計算のような探索アルゴリズムを用いて解くことが有効となる．

ロボットは以下のような手順でモデル化誤差の自律的補償を行う．

(1) ロボットにシミュレーション環境を搭載する．与えられたタスクに対して，ロボットは自らの構造・行動パラメータを用いてシミュレーション環境上で試行錯誤を行い，最適と思われる構造・行動のパラメータを獲得する．

(2) 得られた構造・行動パラメータをロボットに搭載し，実環境で行動する．このとき，モデル化誤差があれば実環境における行動は最適なものからずれてしまう．

(3) 仮想環境においてモデル化誤差の推定を行う．仮想環境にて，実環境と同様の動作結果を与えるモデル化誤差を探索する．

(4) モデル化誤差を考慮して仮想環境の修正を行い，シミュレーションにてタスク達成に最適な構造・行動パラメータの再探索を行う．

(5) 実環境と仮想環境での動作結果にずれがあれば(3)へ戻る．

修正された仮想環境は実環境に近いものになったと考えられる．修正された仮想環境における最適解は，実環境においても有効となる．

3. モデル化誤差の自律的補償

3.1 実験環境と問題設定

本稿では図1に示すような簡単な楕円形のライントレース問題に対してモデル化誤差の補償実験を行った．この床材は紙で，ロボットはLEGO社のMINDSTORMSを用いた．網掛け部は進入禁止領域であり，ここを走行した場合はリタイアとみなす．ロボットの形状を図2に示す．仮想環境はパーソナルコンピュータ上に実現した．ロボットは1ステップの実行に約30msecを要した．ロボットは前部に取り付けられた2つのライトセンサでラインを判断し，右センサが反応すれば右に旋回，左センサが反応すれば左に旋回を行う設定とした．今回使用したライトセンサは床面の明暗を2値的に判別するものであった．仮想環境上で設定したロボットの可変な構造・行動パラメータとその選択可能範囲は以下の通りである．

R_{LD}:	ライトセンサの幅	2~20 [cm]
R_{LC}:	ライトセンサの中心位置	0~10 [cm]
R_L:	ロボットの縦の長さ	10~20 [cm]
R_D:	旋回角度	8.2~81.8 [°]

ただしR_{LC}，R_Dは右を正とする．これらのパラメータの最適値は，図1のライン上の規定周回（本稿では1周）の所要時間が最短の値を与えるものであるとした．

実環境でのロボットの行動と仮想環境での行動とのずれを評価する指標を以下のように定義した．

$$G = w_1 T + w_2 N + w_3 H + w_4 \sum_n L_n \qquad (1)$$

T: 両環境での走行時間の差 [msec]
N: 両環境での旋回回数の差
H: 両環境での旋回履歴の差
n: 両環境での旋回回数の少ない方
L_n: 両環境でのn回目の旋回開始時間の差 [msec]
w: 重み係数

ただし，旋回履歴とは左右どちらのセンサが反応したかを一定回数分だけ記録したもので，記録方法は変数の最上位ビットから順に右旋回なら1，左旋回なら0を当てはめていく．本実験ではスタートから32回分の旋回履歴を記録した．よって，Hは2^0~2^{31}までの値をとり得る．この旋回履歴は，初期段階での旋回方向のずれをより重視している．重みはw_1=1，w_2=100000，w_3=1，w_4=10とした．両環境での動作結果が類似しているほどGの値は小さくなる．

モデル化誤差の候補として仮想環境上に以下の変数（誤差変数）を仮定した．ただし右の数字は各誤差変数の選択可能範囲である．

E_1:	前進速度	-5~5 [cm/sec]
E_2:	旋回角速度	-10~10 [°/sec]
E_3:	前進時の旋回角速度	-3~3 [°/sec]
E_4:	初期状態での方向	-3~3 [°]

実環境での走行実験は常に条件を同じに設定することが困難であった．そこで，一度だけ走行を行ったものをビデオに録画し，それを実環境での行動結果と見なした．

本実験ではモデル化誤差推定に用いた実環境の情報は動作結果のみであるため，式(1)の評価値が良くなる誤差値の組は何種類も存在した．よって何度か誤差推定を行い，得られた誤差値の候補群に対してファジィC平均法（FCM）を用いてクラスタリングを行い，各クラスタ中心を誤差値の代表値とみなした．

本実験で用いた進化戦略は(μ,λ)-ESであり，各パラメータは，誤差推定においては世代数100，個体数500，最適な構造・行動パラメータ探索においては世代数100，個体数300とした．クラスタリングを行う際のクラスタ数は6とした．

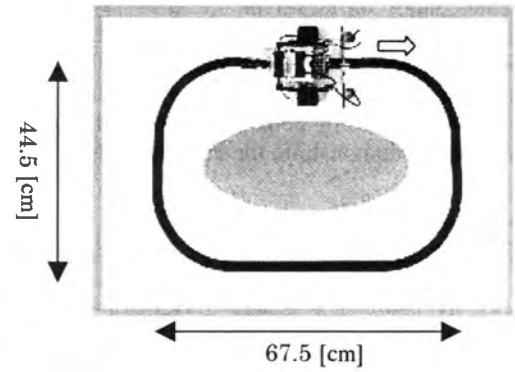


図1　ライントレース問題

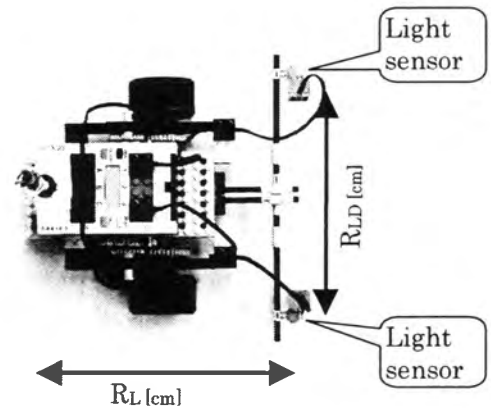


図2　ロボットの形状

3.2 シミュレーション実験

本手法の有効性を調べるためにまずシミュレーションのみにおいて実験を行った．3.2節での実環境とは，シミュレーション環境に意図的に誤差を付加した仮想的な実環境を指すものとする．意図的に付加した誤差のパターンを表1に示す．本実験では7種類の仮想的な実環境に対して実験を行った．

3.2.1 最適解の発見

仮想環境において，最適な行動ができる行動・構造パラメータを探索した．得られた値を表2に示す．選択した構造・行動パラメータを用いて各実環境で走行させたときの走行結果の比較を表3に示す．モデル化誤差の影響で，両環境における行動には大きな差があった．

表 1　意図的に付加した誤差値

	E_1	E_2	E_3	E_4
実環境 1	1.0	-3.0	2.5	0.0
実環境 2	3.0	0.0	0.0	0.0
実環境 3	3.0	3.0	-2.5	0.0
実環境 4	0.0	0.0	-1.0	0.0
実環境 5	0.0	0.0	1.0	-2.0
実環境 6	1.5	0.0	-1.0	0.0
実環境 7	0.0	0.0	0.0	0.0

表 2　仮想環境で得られた
ロボットの最適な構造･行動パラメータ

ライトセンサの幅(R_{LD}) [cm]	15.0
ライトセンサの中心位置(R_{LC})[°/sec]	0.0
ロボットの縦の長さ(R_L) [cm]	20.0
旋回角度(R_D) [°]	56.6

表 3　表 2 の値を用いた実環境と
仮想環境での結果比較

	走行時間[sec]	旋回回数[回]
仮想環境	**23.4**	**6**
実環境 1	29.9	18
実環境 2	19.0	6
実環境 3	24.5	14
実環境 4	25.7	9
実環境 5	34.4	22
実環境 6	24.5	11
実環境 7	23.4	6

表 4　修正済み仮想環境と実環境での動作結果

	走行時間 [sec]	旋回回数 [回]	G
仮想環境 1	20.8	4	−
実環境 1	20.8	4	1650
仮想環境 2	19.0	6	−
実環境 2	19.0	6	33
仮想環境 3	18.9	6	−
実環境 3	19.2	6	4653
仮想環境 4	23.5	6	−
実環境 4	23.6	6	2046
仮想環境 5	22.7	4	−
実環境 5	23.1	4	3366
仮想環境 6	21.2	6	−
実環境 6	21.1	6	1419
仮想環境 7	23.2	6	−
実環境 7	28.6	14	158943254

3.2.2　モデル化誤差の推定と最適解の再探索

3.2.1 で得られた実環境での動作結果を用いて仮想環境でモデル化誤差を推定した．具体的には仮想環境において E_1〜E_4 に任意の値を与え，実環境での動作結果の再現を試みた．このとき(1)式の値が小さい，つまり両環境の動作結果が類似していれば，そのときモデル化誤差として E_1〜E_4 に与えた値は正しい推定値であったと期待される．

進化戦略を用いて，表 3 で得られた実環境での動作結果からモデル化誤差の推定をそれぞれ500回行い，得られたモデル化誤差の候補群に対して FCM を用いてクラスタリングを行った．ただしクラスタリングの際には誤差変数 4 種類に加え(1)式の値も含めた，5 次元のデータ群に対して FCM を適用した．これはより正確であろう誤差値を推定でき，また評価値の軸を見ることで各クラスタの優劣を判断する目安になると考えたからである．

表 5　仮想環境で推定された誤差値

	E_1	E_2	E_3	E_4	G
実環境 1	0.98	-2.80	2.33	0.48	1299
実環境 2	3.05	-1.44	0.45	-0.53	33
実環境 3	3.25	3.10	-1.76	-1.31	125015
実環境 4	0.08	-0.43	-0.58	-0.14	620
実環境 5	0.01	-0.43	0.86	-1.07	13118
実環境 6	1.44	0.56	-1.24	-0.24	42128
実環境 7	0.07	-1.55	0.41	-0.58	398

次に，各クラスタ中心が示す誤差値を用いて仮想環境を修正し，ロボットの最適な構造･行動パラメータを再探索した．各実環境に対する誤差値候補 6 個のうち，得られた行動・構造パラメータを用いて実環境で走行した結果と，修正した仮想環境での動作が最も類似していた（ (1)式の値が小さかった）ものを表 4 に示す．また，そのとき選ばれていた誤差値を表 5 に示す．

表 4 より，実環境 7 を除くいずれの実環境においても仮想環境での動作とほぼ同じ動作が得られていることが分かる．表 1，表 5 より，最終的に推定されたモデル化誤差値は，意図的に付加した誤差値と比較的類似していることが分かる．

今回の問題設定では，各誤差変数間には強い相関があると考えられる．例えば，前進速度が多少遅くても旋回角速度を速くすれば結果的に走行時間は変わらない等である．実環境 7 の誤差が付加されていない状況での探索においては，多数のローカルミニマムが得られ，誤差 0 を推定できなかった．他の誤差の状況では良い推定値が得られはしたが，同様のローカルミニマムに陥る可能性は存在する．この現象を回避する手段として，実環境での複数の動作結果を用いて誤差値を推定する等の方法が考えられるが今後の課題とする．

3.3　実機実験

次に実機実験を行った．仮想環境において得られた最適な行動ができる行動･構造パラメータは表 2 と同じである．そのときの仮想環境での走行軌跡を図 3a に，実環境での走行軌跡を図 3b に示す．修正前の仮想環境での動作と実環境での動作には大きな差があった．

次に両環境間のモデル化誤差を推定した．生成した 500 個の誤差値候補に対して FCM を適用したときの各クラスタ中心が示す誤差値を表 6 の左部に示す．その誤差値を用いて修正された仮想環境におけるロボットの最適な構造･行動パラメータを表 6 の中部に，その時の実環境と仮想環境の動作結果を右部に示す．両環境での動作結果が最も類似していた場合の動作軌跡を図 4 に示す．これはクラスタ 2 のモデル化誤差推定によるパラメータ最適化後の結果である．表 6，図 4 から，モデル化誤差補償後の最適行動は実機においてほぼ実現されていることが分かる．以上のことから本手法は実環境における準最適な構造･行動パラメータを探索できた．

表 6　実環境におけるモデル化誤差推定

	クラスタ中心が示す誤差値					最適な構造·行動パラメータ				仮想環境での動作結果		実環境での動作結果	
	E_1	E_2	E_3	E_4	G	R_{LD}	R_{LC}	R_L	R_D	走行時間	旋回回数	走行時間	旋回回数
クラスタ1	1.36	-5.15	0.1	-0.12	10460	15.1	0.1	20.0	58.4	21.4	6	21.8	6
クラスタ2	1.37	-7.64	0.79	-0.93	101231	14.6	0.0	20.0	57.6	21.4	6	21.7	6
クラスタ3	1.74	-3.92	-0.23	0.78	72610	15.0	0.0	19.8	58.8	20.8	6	21.7	6
クラスタ4	1.43	-4.0	-0.25	1.03	48140	15.1	0.0	20.0	59.2	21.3	6	21.8	6
クラスタ5	1.44	-4.86	0.0	0.49	31990	14.9	0.1	20.0	57.7	21.2	6	21.7	6
クラスタ6	1.40	-4.05	-0.23	0.83	18629	11.4	0.0	19.8	45.4	21.5	8	22.1	8

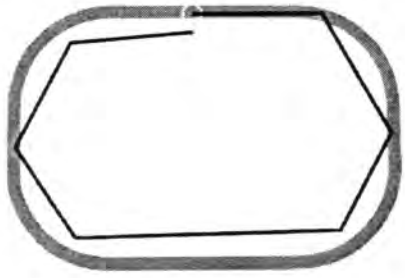


図 3a　仮想環境で最適と判断された走行軌跡

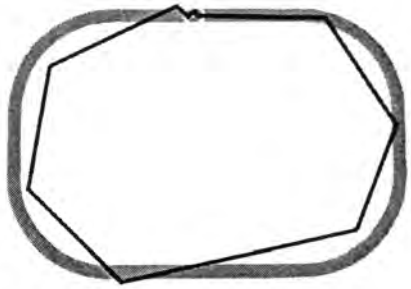


図 3b　実環境での走行軌跡

図 4　再探索したパラメータを用いた実環境での走行軌跡

4. まとめと今後の課題

進化ロボティクスにはモデル化誤差の問題があった．本稿では FCM により，仮想環境下でのモデル化誤差候補群のクラスタリングを行い，候補群の適切な絞り込みの可能性についてシミュレーションおよび実験により検討した．

本手法を用いれば実環境での実験回数が低減できるだけでなく，動作環境が変わっても人間が手を加えることなくロボットが最適なパラメータを自律的に獲得し，適切に行動できるようになることが期待される．

今後の課題としては，進化戦略の適切な世代数や個体数，FCM のクラスタ数に関する考察，より正確なモデル化誤差値を推定するためにクラスタ周辺を再探索する場合の探索範囲の決定則に関する考察等が挙げられる．

参考文献

[1] Floreano, D. and Mondada, F. (1994) Automatic Creation of an Autonomous Agent: Genetic Evolution of a Neural Network Driven Robot. In D. Cliff, P.Husbands, J.-A. Meyer, and S. Wilson (Eds.), From Animals to Animats III, Cambridge, MA: MIT Press, 421-430.

[2] Floreano, D. and Urzelai, J.:Evolutionary Robotics The Next Generation, In T.Gomi(ed), Evolutionary Robotics III, Ontario(Canada):AAI Books, 2000.

[3] H.H.Lund, et al.:Evolving Robot Morphology, Proc. of IEEE Fourth Int'l Conf. On Evolutionary Computation, IEEE Press, NJ, 1997.

[4] R.Beer, J.Chiel, and L.Sterling: "An artificial insect", American Scientist, 79, pp.444-452(1989)

[5] 近藤敏之，石黒章夫，内川嘉樹，Peter Eggenberger：「進化ロボティクスにおける制御器の頑健性の実現：動的再編成機能を有する神経回路モデルの提案」，計測自動制御学会論文集，Vol.35，No.11，pp.1407-1414(1999)

[6] 山本，橋山，大熊：評価値推論を用いた実環境での行動の進化的取得，第 9 回東海ファジィ研究会 in 日間賀島，pp.1-1－1-4 (2000)

[7] 川瀬，山元，古橋，他：進化ロボットにおけるモデル化誤差の補償と構造変革に関する一提案，第10回東海ファジィ研究会発表発表論文集，pp.3-1 – 3-4 (2001)

[8] 島内，他編：アルゴリズム辞典，共立出版(1994)

お問合せ先

〒514-8507　三重県津市上浜町 1515
三重大学大学院 工学研究科
情報工学専攻 パターン情報処理研究室
北畠 真
TEL：059-231-9746
E-Mail：shin@pa.info.mie-u.ac.jp

予測に基づくセンサリネットワークを用いた知能ロボットの知覚システム

Perceptual System for An Intelligent Robot Using Prediction-Based Sensory Network

○橋本 節雄
○Setsuo HASHIMOTO
神戸大学大学院
Graduate School of Science and Technology, Kobe University

小島 史男
Fumio KOJIMA
神戸大学大学院
Graduate School of Science and Technology, Kobe University

久保田 直行
Naoyuki KUBOTA
福井大学
Fukui University

Abstract: This paper deals with a perceptual system for an intelligent robot. Sensing information is translated into perceptual information by the perceptual matrix composed of weight values. The perceptual matrix is updated by a sensory network (SN) that predicts sensing information to construct relationship among sensors. The effectiveness of the proposed method is demonstrated by computer simulations for a breakdown of range sensors.

1 はじめに

近年，センサ技術や計算機技術の向上によって様々なロボットが開発されている．現在議論されている知能ロボットにおいては，未知環境下での動作や，動的な環境の変化への対応，環境との相互作用による学習が必要であるとされ，行動に基づくロボティクスや進化的ロボティクスに関する議論が近年盛んに行われている[1-2]．行動に基づくロボティクスにおいては，センサ情報を直接用いた反射行動を行っており，進化的ロボティクスにおいては，制御器をセンサからモータへの写像として扱い，これをニューラルネットワーク等で表現している．従来はロボットを制御しやすい情報，ロボットの学習しやすい情報が得られるように，人間の試行錯誤に基づいてロボットの知覚に関する設計が行われていた.センサから得られる情報は，ロボットの動作と，ロボットが直面する環境によって決定されるだけでなく，ロボットのセンサにはノイズや故障が発生することが考えられ，不完全，不確実な要素も含まれる．故障を含む系に対する研究においては，制御対象のモデル化を行うことによって，故障箇所の検知を行うものが多いが，未知環境下において動作するロボットのモデル化を事前に行うことは困難である[3]．センサ単独での故障検知は困難であり，耐故障性を高めるために1つの制御量を複数のセンサを用いて計測を行う冗長センサ系を用いる研究も行われているが，どのセンサを選択するかという問題も考えられる[4]．以上のことから，ロボットの行う知覚は，ある相互作用可能な身体を持つロボットが環境に直面することによってはじめて決定され，未知環境，動的な環境において動作するロボットにおいては，ロボットの知覚に関して事前に設計を行うことは本来困難である．動的未知な環境において動作するロボットを対象として考える場合，ロボットは，冗長なセンサ情報から自らの行為に関連するセンサを選択したり，センサ情報から必要な情報の抽出を行うための，環境に適応可能な知覚システムを持つ必要がある[5]．そこで本研究では，冗長なセンサ情報から必要な情報を抽出することを目的として，予測に基づくセンサリネットワークを提案する．

ロボットのシステム構成を図1に示す．ロボットは知覚システムと行為システムから構成される．知覚システムはセンサ情報の相互関係から知覚情報を抽出し，行為システムにおいては，知覚システムから得られた知覚情報を用いて行為出力を決定し，環境に対して働きかける．センサリネットワークにおいては，ニューラルネットワーク（Neural Network; NN）を用いたセンサ情報の予測に基づいて相互関係を構成し，知覚行列の更新を行う．行為システムにおいてはファジィコントローラを用いてロボットの行為出力を生成し，ロボットは動作を行う．以下，知能ロボットの知覚システムと行為システムの構成法について示し，ロボットに装備された測距センサが故障する問題を考え，計算機実験を通して，提案手法の有効性について検証を行う．

2 知能ロボットの知覚システム

2.1 センサリネットワークによる環境知覚

障害物が点在する環境中を動作する移動ロボットのナビゲーション問題を考える（図2）．障害物の配置と座標に関する情報をロボットは保持しておらず，環境はロボットにとって未知である．移動ロボットに対して与えるタスクとしては，スタート地

点からゴール地点まで，障害物に衝突することなく移動することであり，これを1シナリオとする．ロボットはその周囲に8個の測距センサを持ち，各時間ステップtにおいて，センサレンジの範囲内で，自らの周囲の障害物までの距離情報（$x_n(t)$, n=1,...,8）を得ることができる．ロボットの行為出力は，操舵角（$y_1(t)$）と移動速度（$y_2(t)$）である．

図3に示すように，ロボットに装備された8つの測距センサについて，近傍の3つのセンサを単位とした相互関係を用いてセンサリネットワーク（Sensory Network; SN）を構成する．SNは，センサ間での刺激，抑制の関係から環境の知覚を行うものである（図4）[6]．センサ情報$\mathbf{x}=(x_1(t),x_2(t),...,x_8(t))^{\mathrm{T}}$は知覚情報$\mathbf{p}=(p_1(t),p_2(t),...,p_4(t))^{\mathrm{T}}$へと知覚行列Tによって以下のように変換される．

$$\mathbf{p}=\mathrm{T}\mathbf{x}, \tag{1}$$

$$\mathbf{T}=\begin{pmatrix} 0 & \omega_{1,2} & \omega_{1,3} & \omega_{1,4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_{2,4} & \omega_{2,5} & \omega_{2,6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_{3,6} & \omega_{3,7} & \omega_{3,8} \\ \omega_{4,1} & \omega_{4,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_{4,8} \end{pmatrix}$$

但し，$\omega_{m,n}$はm番目(m=1,2,...,4)のSNにおけるn番目のセンサへの重みを表しており，以下の条件を満たすものとする．

$$\sum_n \omega_{m,n}=1.0, \quad 0.0<\omega_{m,n}<1.0 \tag{2}$$

この知覚行列により，同一のSNに属する近傍のセンサ情報を重み付け平均することによりセンサ情報を縮約し，知覚情報を抽出している．あるセンサ情報の時系列変化にロボットの行為と関連する構造が含まれる場合，そのセンサは有効な情報を検知するものとして，重み付けは大きくすべきである．構造が見られない場合は，ノイズやセンサの故障が考えられ，またセンサ情報に変化が見られない場合は，注意を払うべきセンサではないと考えられ，これらの場合においては，そのセンサへの重み付けは小さくするべきである．SNにおいて，知覚と行為の間に成立している有用な構造を抽出し，これを知覚行列に反映させる．次に，有用な構造をどのようにして抽出するかについて述べる．

2.2 予測のためのニューラルネットワーク

図3に示したセンサ情報と知覚情報の関係は，図4のように示すことができる．SNにおいて，相互関係を構築するため，NNを適用する．NNは，相互に結び付けられたセンサ間で互いにセンサ情報の予測を行う．以下，図5はに示すように，センサi, j, k ($1\leqq i,j,k\leqq 8$)が構成するm番目のSNについて考える．

NNの構成を図6に示す．センサiについて考えると，NNの入力は，過去3ステップのセンサ情報$x_i(t\text{-}1)$, $x_i(t\text{-}2)$, $x_i(t\text{-}3)$と，ロボットの行為出力$y_1(t\text{-}1)$, $y_2(t\text{-}1)$であり，NNの出力は，他のセンサj, kのセンサ情報の予測値$x'_{i,j}(t)$, $x'_{i,k}(t)$である．センサが故障する問題を考える場合，単独のセンサの変化のみでは故障の検出は困難であり，近傍のセンサとの相互関係が重要となる．そのため，NNの出力には自らのセンサ情報ではなく他のセンサ情報の予測値を用いている．NNは，実際に計測されたセンサ情報を教師値として，逆誤差伝播法を用いて結合強度の学習を行う．センサj, kについても同様である．それぞれのSNに

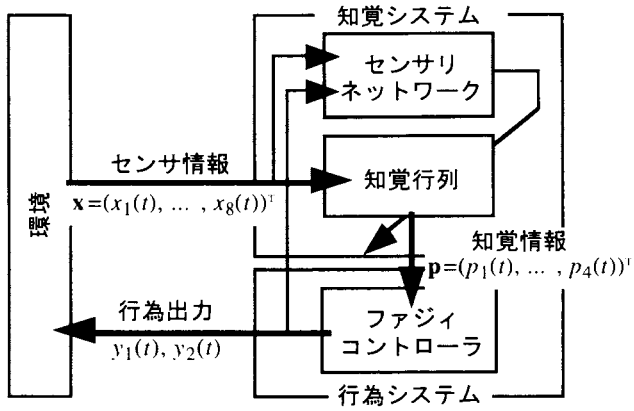


図1　ロボットのシステム構成

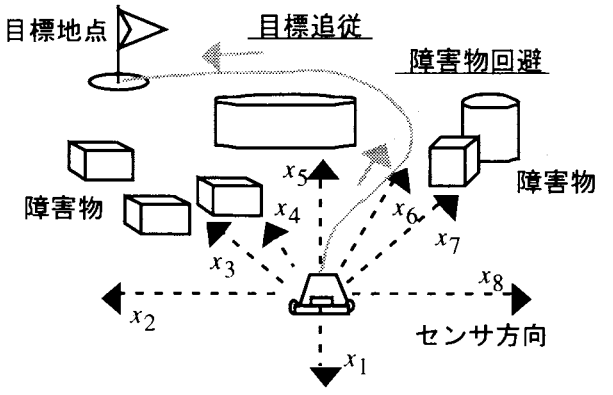


図2　未知環境下における障害物回避と目標追従

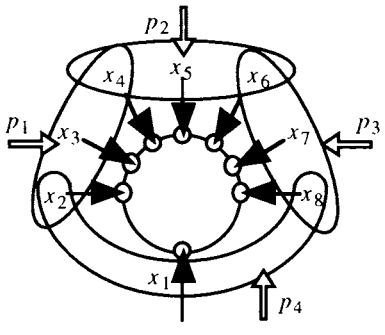


図3　センサ情報（$x_n(t)$）と知覚情報（$p_m(t)$）

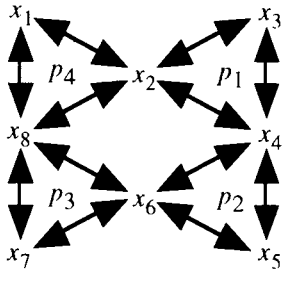


図4　センサリネットワークの構成

おいて3つのセンサは互いにNNを用いて予測を行うので，4つのSNで合計12個のNNが予測に用いられる．センサ情報と行為出力を用いて近傍のセンサ情報の変化のパターンを学習することにより，NNは環境との相互作用を通して知覚と行為の間にある構造を学習することになる．

2.3 予測に基づくセンサリネットワーク

SNは，時系列センサ情報と行為出力からNNによって予測される他のセンサ情報の構造を学習することにより，センサ相互の関係を抽出する．

センサに異常がない場合，知覚と行為の関係性を学習することにより，予測誤差は小さいものとなる．即ち，予測誤差を用いることによって，センサに発生する異常を検知することができる．以下の式(3)のような，センサiから予測を行ったセンサjのセンサ情報に関する予測誤差を考える．

$$e_{i,j}(t)=\left|x'_{i,j}(t)-x_j(t)\right| \tag{3}$$

式(3)に示す予測誤差が大きい場合，センサi自身が故障したことによる誤差の発生と，他のセンサであるセンサjが故障したことによる誤差の発生の二通りが考えられ，式(2)だけでは判断できない．そこで，知覚行列における重みの更新量の計算を，それぞれの原因を想定して，以下のように行う．

$$\Delta\omega_{m,i(i\to j)}(t)=-\alpha\cdot e_{i,j}(t) \tag{4}$$

$$\Delta\omega_{m,j(i)}(t)=-\beta\cdot e_{i,j}(t) \tag{5}$$

αはNNの入力になっているセンサ自身の故障の疑いに対して，βはNNの出力である相手のセンサが故障している疑いに対して，それぞれ与えられる係数である．$0<\beta<\alpha<1$の場合，常に自分自身を疑い続けることとなり，センサ情報を一様に信頼しないことになるため，制御が困難になることが考えられる．従って，これらの係数は，$0<\alpha<\beta<1$となるように与えることが妥当であると考えられる．時系列センサ情報に変化が見られないセンサに対して重み付けを低くし，変化の存在するセンサに注意を払うことを実現するため，センサ情報の差分を用い，

$$C_i(t)=\sum_{\tau=0}^{\tau_{max}}\gamma^{\tau}\left|x_i(t-\tau)-x_i(t-\tau-1)\right| \tag{6}$$

のように，過去$\tau_{max}(>0)$ステップまで遡ったセンサ情報の変化の度合いに応じて更新量が計算される．但し，γは減衰係数である$(0<\gamma<1)$．以上の計算により，センサiに対する重みの更新は，

$$\begin{aligned}\omega'_{m,i}(t+1)=&\omega_{m,i}(t)+\Delta\omega_{m,i(i\to j)}(t)+\Delta\omega_{m,i(i\to k)}(t)\\&+\Delta\omega_{m,i(j)}(t)+\Delta\omega_{m,i(k)}(t)+\delta\cdot C_i(t)\end{aligned} \tag{7}$$

のように計算される．$C_i(t)$はセンサ情報の差分和であり，センサの故障により不規則な変化が生じることも考えられるため，式(7)において，$0<\delta<\alpha<\beta<1$となるように与えることが妥当であると考えられる．

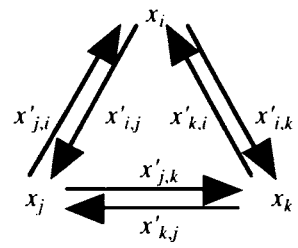


図5 予測に基づくセンサリネットワーク

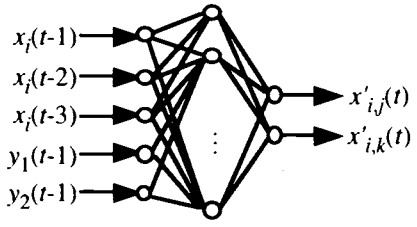


図6 ニューラルネットワークの構成

SN内においてそれぞれの重みは，式(2)の条件を満たすため，式(8)のように正規化され，最終的な重み更新が行われる．

$$\omega_{m,i}(t+1)=\frac{\omega'_{m,i}(t+1)}{\omega'_{m,i}(t+1)+\omega'_{m,j}(t+1)+\omega'_{m,k}(t+1)} \tag{8}$$

3 知能ロボットの行為システム

行為システムにおいては，知覚システムによって得られた知覚情報を基に，簡略化ファジィ推論[7]を用いたファジィコントローラによってロボットの行為出力を決定し，環境に対して働きかける．

総ルール数をR，メンバーシップ関数を$A_{r,m}$とし，各ルールの出力の推論値を$s_{r,o}$ $(r=1,2,...,R;\ o=1,2)$ とすると，r番目のファジィルールは，以下のif-then形式で表される．

if $p_1(t)$ is $A_{r,1}$ and $p_2(t)$ is $A_{r,2}$ $\cdots$ and $p_4(t)$ is $A_{r,4}$
then $y_1(t)$ is $s_{r,1}$ and $y_2(t)$ is $s_{r,2}$

メンバーシップには，以下のように表される三角型を用いる．

$$A_{r,m}(p_m(t))=\begin{cases}\left(1-\dfrac{\left|p_m(t)-a_{r,m}\right|}{b_{r,m}}\right) & if\left|p_m(t)-a_{r,m}\right|\le b_{r,m}\\ 0 & otherwise\end{cases} \tag{9}$$

但し，$a_{r,m}$，$b_{r,m}$は，それぞれメンバーシップ関数の中央の値と幅である．前件部の適合度μ_rは，以下のように表される．

$$\mu_r=\prod_{m=1}^{4}A_{r,m}(p_m(t)) \tag{10}$$

簡略化ファジィ推論によって得られる行為出力は，

$$y_o=\frac{\sum_{r=1}^{R}\mu_r s_{r,o}}{\sum_{r=1}^{R}\mu_r} \tag{11}$$

として求まる．

4 計算機実験

図7に示すように，環境内に複数の目標地点を設け，ある目標地点から他の目標地点をランダムに選択して障害物回避を行いながら目標追従を行う．実験は30シナリオ行い，11シナリオ目においてセンサが故障するものとする．但し，何シナリオ目においてセンサが故障するかについての情報はロボットには与えていない．また，センサが故障した場合には，ランダムな値がセンサ情報として得られるものと考える．各パラメータ設定を表1に示す．

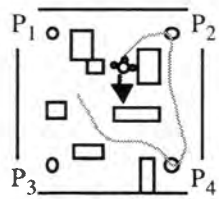
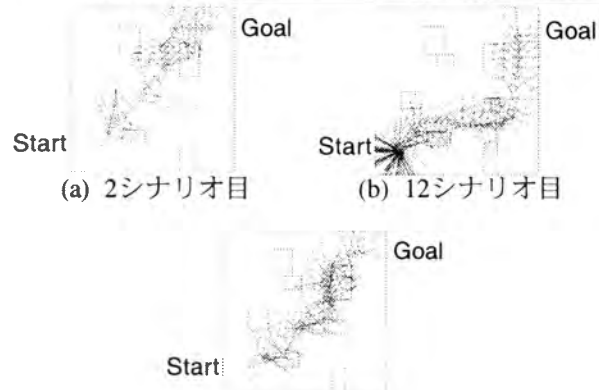


図7 実験環境

表1 パラメータ設定

NN		SN	
入力層	5	α	2.0×10^{-4}
中間層	10	β	3.0×10^{-3}
出力層	2	γ	0.9
		δ	1.0×10^{-7}
		τ_{max}	10

4番目のセンサが故障したものとして実験を行った結果得られた，環境内での動作を図8に示す．故障発生直後の様子は図8(b)に示す通りであり，比較のため，故障発生時と同じスタート地点とゴール地点が選択された故障前と故障後のシナリオをそれぞれ図8(a)と(c)に示す．図9は，故障した4番目のセンサを含む1番目のセンサリネットワークにおけるそれぞれのセンサに対する重みの，移動時間に対する履歴を表したものである．故障前の2シナリオ目では障害物回避行動が正常に行われていることが分る．故障直後においては，比較的大きな重み付けがなされている4番目のセンサに対してランダムな値がセンサ情報として用いられるため，スタート地点において旋回する行動が見られる．故障したセンサに対しては大きな予測誤差が発生するため，SNにおける相互関係に基づいて知覚行列が更新された結果，故障が発生したセンサに対する重み付けが小さくなることにより，スタート地点付近における旋回行動から逸脱して目標地点までの障害物回避行動が行われている．また，故障発生から数ステップ経過した16シナリオ目においては，大きな旋回なしに障害物回避行動が行われている．



(a) 2シナリオ目　(b) 12シナリオ目

(c) 16シナリオ目

図8 環境内での動作の軌跡

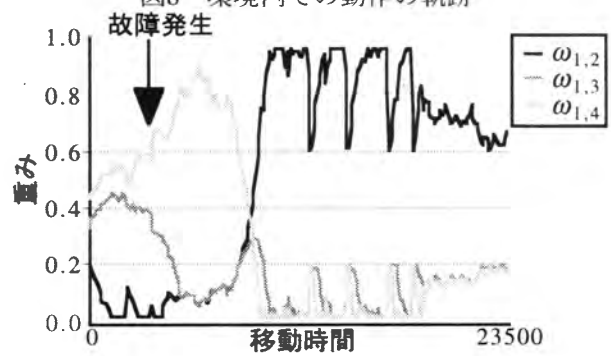


図9 重みの変化の履歴

5 まとめ

センサ情報の予測に基づいたSNを用い，環境内での動作を実現する知覚システムを構成することを試み，ロボットに装備された測距センサが故障する問題に応用し，その有効性を示した．知覚行列が更新されることで新たな行為をとる契機が生じ，その行為によって新たなセンサ情報を得ることで知覚行列の更なる更新が行われ，知覚情報の試行錯誤的探索が行われる．このことにより，単に行為のために知覚を行うのではなく，故障が発生する前の知覚と行為の関係性を実現するような，知覚を行うための行為が，提案手法によって行われている．このように，行為のための準備を行うことが知覚システムの役割であり，その実現に予測に基づく相互関係は重要な役割を果たすと考えられる．今後は様々なパターンの故障への適用が必要であると考えられる．

参考文献

[1] R.A.Brooks: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-2-1, pp.14-23 (1986)

[2] S.Nolfi and D.Floreano: Evolutionary Robotics, The MIT Press (2001)

[3] R.Isermann : Process fault detection based on modeling and estimation methods - a survey, *Automatica*, Vol.20, pp.387-404 (1984)

[4] 陶山：耐センサ故障性を有する制御系構築のための新しい枠組み，電子情報通信学会論文誌（A），Vol.J82-A，No.4，pp.530-538 (1999)

[5] 橋本，小島，久保田：知覚に基づくロボティクスのための遺伝的プログラミングを用いた知覚システム，知能と情報，第15巻，第2号，pp.190-198 (2003)

[6] T.Fukuda and N.Kubota: An Intelligent Robotic System Based on A Fuzzy Approach, Proceedings of The IEEE, Vol.87, No.9, pp.1448 - 1470 (1999)

[7] 市橋，渡辺：簡略化ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習制御，日本ファジィ学会誌，Vol.2, No. 3, pp. 429-437 (1990)

連絡先：
〒657-8501
神戸市灘区六甲台町1-1
神戸大学大学院　自然科学研究科
システム機能科学専攻　小島研究室
橋本　節雄
TEL&FAX： 078-803-6489
E-mail： setsuo@buna.fan.scitec.kobe-u.ac.jp

マルチエージェントログのファジィ圧縮
Fuzzy compression of multi agent behavior data

西野順二
NISHINO Junji

電気通信大学 システム工学科
The University of Electro-Communications

Abstract : This paper shows a memory cost analysis on a data compression system for multi agent games using fuzzy predictor subsystem. A multi agent game log is a very large size time series vector, which has a strong self correlation because of the agents intelligent architecture and behavior. As a result, in order to apply a fuzzy system for predicting series and compression procedure, relative memory cost were calculated and shown.

1 はじめに

サッカーに代表される、多人数のゲームやスポーツは主にビデオ撮影による映像で記録されている。この場合、スポーツ工学の研究などの目的での観測でない限り、ボールやスター選手などの注目点周辺のみが記録され、プレイヤ単位での詳細な行動の情報は保存されないことが多い。

本稿では、これらの試合全体をエージェント単位に詳細に記述する方法とその記録・再生をするシステムの開発 [3, 2] に関連して、ファジィ予測器を用いた情報圧縮について検討する。

PDA など図 1 に示すような携帯情報端末の進歩に伴い、音声や動画をこうした機器により利用するスタイルが増えている。処理速度や記憶容量に制限のあるこうした環境下では、データの圧縮が必要不可欠である。いっぽうで多人数ゲームの全体を眺めたりボール周辺だけを眺めたりと観賞時にユーザが自由に視点を変更できるシステムがあれば、より臨場感のある再生に効果的である。計算機的には各プレイヤやボールの位置情報を時間経過にともなって保存すれば良いもののその容量は莫大である。

ここでは、行動分析など学術目的に必要とされる可逆符号化ではなく、人による観賞を目的としてそれに応じた非可逆的で高効率な圧縮の可能性を検討する。

2 ファジィ予測器による情報圧縮

知的マルチエージェントゲームでは、個々のエージェントの行動は互いの行動に強い相関を持つ。これは各エージェントが持つ知的なアルゴリズムによって誘導された協調行動によるものである。その関係は、各アルゴリズムの構成による特性と、全体としての相互作用による複雑系としての特性を合わせもち、事前に特定することのできない非線形性を持つ。

情報の圧縮においては、ある適当な大きさで、部分情報から全体を復元する推定・生成器が構成できれば、その生成器を表現するだけで圧縮が行なわれたことになる。ここでは、図 2 に示すファジィ予測器の構成とその圧縮情報としてのサイズについて検討する。

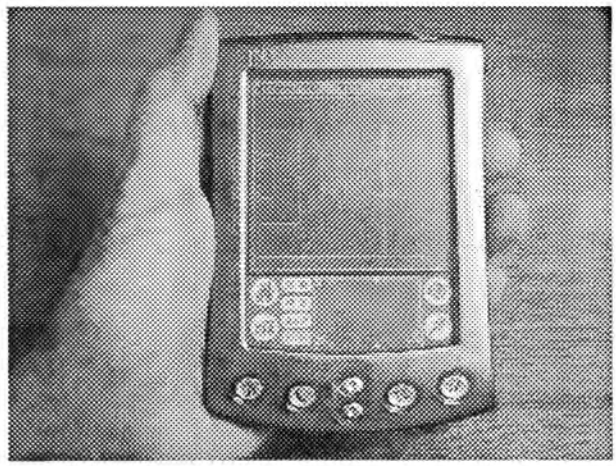


図 1: 携帯型サッカープレイヤ

2.1 サッカー試合情報のモデル化

サッカーの試合内容を再現する情報を、ここではプレイヤとボールの動きに限って記録するものとする。

プレイヤは試合開始 $t = 0$ から終了時刻 $t = T$ までの間一連の移動を行なうので、プレイヤ i の行動全体は、時間 t をパラメータとする平面座標の関数 $P_i(t) = (x_i(t), y_i(t))$ で表される。22 人のプレイヤとボールも含め 23 点で、これを x,y 軸に分けて t に対する 46 次元のベクトル関数 $P(t)$ として与えられる。一般に $P(t)$ は連続な関数となるが、実際上は、適当な Δ t でサンプリングし、センサシステムによる量子化が行なわれる。ここでも $P(t)$ は離散化された時系列データとして扱う。

バーチャルサッカーの例として、RoboCup サッカー [1] を取り上げる。競技場は 105.0m × 68.0m であり、試合時間は 0.1 秒単位の 600 秒間で、6000 ステップとなる。実際的なエージェントの物理的能力の制約から 0.1 秒では、0.1 メートル程度しか動くことができない。このため 0.1m 刻みで約 100m、すなわち $log_2(105/0.1) \approx 10$ bit の解像度となる。

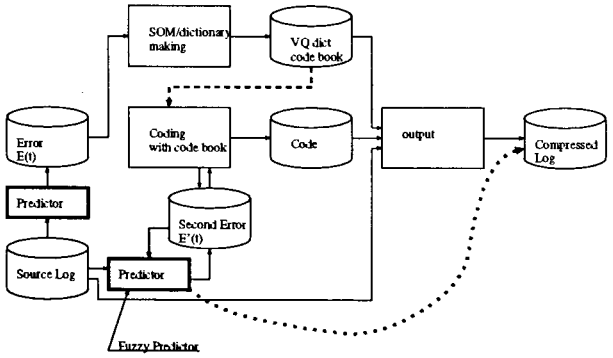


図 2: ファジィ予測器による圧縮システム

以上の仮定から通時での情報量は以下のようになる。

$$size_{soccer} = (10 + 10) \times 23 \times 6000 = 345KB. \quad (1)$$

2.2 バスケット試合情報のモデル化

バスケットも同様にモデル化する。

プレイヤとボールを合わせて 11 物体である。試合時間は 40 分で 0.1 秒単位では 24000 ステップである。コートサイズは、15m × 28m で 0.1m 単位で、各々8bit と 9bit で離散化する。

以上により次のようになる。

$$size_{basketball} = (8+9) \times 11 \times 240000 = 561Kbyte \quad (2)$$

2.3 ファジィ予測器のサイズ

ファジィ予測器を使った圧縮システムを、図 2 に示す。

マルチエージェントログの圧縮には、1 段 1 次線形予測を用い、その残差をベクトル量子化することで、高い圧縮が得られることが分かっている [2]。

この予測部にファジィ予測器を用いて、非線形な残差のバラツキを減らすことができれば、より精度良く高い圧縮率のシステム構成が期待できる。いっぽうで、最適なファジィ予測器はデータ毎に異なるためこの情報も圧縮データの一部として同時に保存が必要となり、最終的な圧縮効率は予測器の構成情報も含めなければならない。

ファジィ予測器として、被圧縮データを時系列に並べたとき、$P(t-1), P(t-2), \cdots P(t-i)$ から $\hat{P}(t)$ を予測するものとする。三角型のメンバーシップ関数をもつ、後件部シングルトンの簡略型ファジィ推論を用いると、この予測器は次のようなルール群として表される。

$$R_i : if\ P(t-1)\ is\ A_i^1 and \cdots P(t-j)\ is\ A_i^j\ then\ P(t)\ is\ B_i$$

ルール数は一定ではなく、データを近似する際に学習的に求められる値である。また、P と B, また A はそれぞれ n 次のベクトルであり、項数 n はサッカーで 46、バスケットで 22 となる。A はベクトルの各項に対応したファジィ集合の集まりによるベクトルであり、$(A_{i1}\, A_{i2} \cdots Ai_n)$ となる。

前件部 A は正負それぞれ大中小の 7 分割 (3bit) のファジィ集合から選ばれたものが n 項並んでいるとすると、A_i^k を表現するには 3 × n bit 必要となる。後件部 B は、位置 P の代表値で n 項の数値ベクトルであり、その表現には m × n bit となる。m は各対象問題ごとの位置のダイナミックレンジであり、バスケットとサッカーでは 8〜10bit である。前件部の j は 2 とする。

以上の仮定において 1 ルールあたりのファジィ予測器のサイズを計算すると次のようになる。

$$(3 \times n) \times 2 + m \times n = 92byte(soccer), 41byte(basket) \quad (3)$$

各試合の情報源の量は 350Kbyte〜550Kbyte である。予測器には多くともその 2 割り当てるとすれば 10Kbyte 程であり、ルールは 100〜200 ルールほどを使えることになる。

46 次元× 6000=276,000 点を 100 ルール、22 次元× 24000=528,000 点を 200 ルールがひとつの上限値として制約となる。

3 おわりに

知的な協調的な動作が含まれるマルチエージェントシステムの行動ログの圧縮について、その非線形な行動特性をファジィ予測器をもちいて圧縮するときの予測器のコストについて考察した。ファジィ規則を用いれば、正確な予測と情報の再構築が可能であるが、そこに使えるルール数には圧縮上の条件があることを示した。一般のファジィモデリングでは、53 万点のデータを 200 ルールでの近似するのはやや難しいとも言える。

ファジィ規則による再構成を全域に適用するのではなく、とくに協調動作による非線形性の強い部分などに特殊的に適用することを視野に入れ、より圧縮率と再現性を上げることが課題である。

参考文献

[1] A. Birk, S. Coradeschi, and S. Tadokoro, editors. *Robocup 2001 : Robot Soccer World Cup V*, volume 2377 of *LNAI*. Springer, 2002.

[2] 鹿田和之進 and 西野順二. エンターテイメント向けサッカーログフォーマット 2gooz 形式の検討. In **第 17 回 SIG-Challenge 研究会 講演論文集**, pages 25–28, 2003.

[3] 西野順二. サッカーシミュレーションログデータの圧縮フォーマット. **情報処理学会ゲーム情報学研究報告**, 2002-GI-9(35):7–12, 3 2003.

問い合わせ先：
〒１８２－８５８５
調布市調布ヶ丘１－５－１
電気通信大学 システム工学科
西野順二
nishino@se.uec.ac.jp
TEL/FAX: 0424-43-5578

マルチ全方位ビジョンを用いた自律移動ロボットのファジィナビゲーション

Fuzzy Navigation of Autonomous Mobile Robot Used Multiple Omnidirectional Vision System

○清水平 渉　　前田 陽一郎
Wataru SHIMIZUHIRA　　Yoichiro MAEDA

福井大学
Fukui University

Abstract — In this research, we proposed a multiple omnidirectional vision system (MOVIS) with three omnidirectional cameras and its calculation method for the measurement of the object position and the self-localization in an autonomous mobile robot. Furethermore, on the identification of the self-position, we tried to improve the accuracy of the measurement by correcting the absolute position based on the measurement error of landmarks in the origin of the absolute coordinate. Moreover, we explained the control of autonomous mobile robot by fuzzy control.

1. 緒 言

RoboCup 等の複数台の自律移動ロボットを対象とする研究においては、全方位カメラ（360 度のパノラマ画像が取得できるカメラ）を用いた研究がいくつか発表されている [1]。しかしながら、これらの研究ではほとんど単体で全方位カメラを用いているため、対象物体であるロボットからの方位は比較的正確に計測可能であるが、距離に関してはミラー上で物体画像が圧縮される上、対象物体の高さが不明な場合、正確な距離計測は不可能である。

一方、複数の全方位カメラを用いた研究には、子安ら [2] のように、鉛直に 2 つの全方位カメラを並べたものや、三木ら [3] のように、水平に 2 つの全方位カメラを用いたものが存在する。これに対し、本研究では 3 台の全方位カメラをロボット上に水平に正三角形状に配置したマルチ全方位ビジョンシステム (Multiple Omnidirectional VIsion System:MOVIS) を提案する。これにより、三角測量の原理によるステレオ視を各 2 台のカメラで行わせ、ロボット全周の物体認識と位置計測を比較的精度良くリアルタイムで行うことを目的とし、本システムを用いた自律移動ロボットのリアルタイム物体位置計測および自己位置同定手法について提案する。また、ファジィ制御を用いた全周に対する自律移動ロボットのボール回り込み方法についても解説する。

2. マルチ全方位ビジョンシステム:MOVIS

本研究で提案する MOVIS において全方位カメラは 3 台使用し、それぞれ同一性能を持つビジョンを M_1、M_2、M_3 とする。本システムは図 1 に示すように、移動ロボット上に床面と水平に正三角形状に配置する。この時、ロボットの重心と 3 つの全方位ビジョンが作る正三角形の重心は垂直方向に対し同一点に存在するようにする。

正三角形の重心より各頂点を延長した線を考え、各 2 台のカメラの画像取得範囲を 120 度ずつ 3 等分した領域に分割し、各領域をそれぞれ 2 台のカメラ対 (図 2 の場合、M_1 と M_2、M_2 と M_3、M_3 と M_1) を用いてステレオ視による三角測量を行なう。

図 1．MOVIS

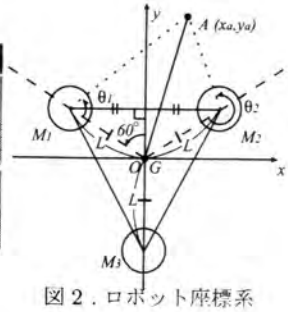


図 2．ロボット座標系

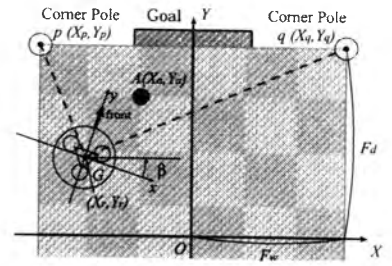


図 3．絶対座標系

3. 物体位置計測および自己位置同定

位置計測は計測物体 $A(x_a, y_a)$ を全方位ビジョン M_1、M_2 を用いて三角測量を行い、結果を重心におけるロボット座標系で求める。x 軸に水平にある $\overline{M_1M_2}$ に対し、M_1 における物体 A の傾きは $\theta_1 - \frac{\pi}{6}$、M_2 における物体 A の傾きは $\theta_2 - \frac{5\pi}{6}$ であり、ロボットの重心からビジョンまでの距離を L とする。ビジョン M_1、M_2 の中心座標は既知であるため、ロボット座標系における物体 A の位置 (x_a, y_a) は、(1) 式、(2) 式で求められる。

$$x_a = \frac{\sqrt{3}}{2}L \cdot \frac{\tan(\theta_2 - \frac{5\pi}{6}) + \tan(\theta_1 - \frac{\pi}{6})}{\tan(\theta_2 - \frac{5\pi}{6}) - \tan(\theta_1 - \frac{\pi}{6})} \quad (1)$$

$$y_a = \frac{1}{2}L + \sqrt{3}L \cdot \frac{\tan(\theta_2 - \frac{5\pi}{6}) \cdot \tan(\theta_1 - \frac{\pi}{6})}{\tan(\theta_2 - \frac{5\pi}{6}) - \tan(\theta_1 - \frac{\pi}{6})} \quad (2)$$

本研究では、RoboCup 中型ロボットリーグのフィールドを計測実験に用いたが、自己位置同定にはコーナーポールをランドマークとして使用した。絶対座標系における座標軸を図 3 に示す。絶対座標系におけるコーナーポール p、q の座標は既知であり、原点よりそれぞれ幅 Fw、奥行き Fd であるとする。また、ロボットの重心座標を (X_r, Y_r) とし、ロボット座標の x 軸と絶対座標系の X 軸の傾き角を β とおく。ロボット座標系において、位置計測より得たコーナーポール p、q の座標をそれぞれ $p(x_p, y_p)$、$q(x_q, y_q)$ とした時、傾き角を β は (3) 式のようになる。

さらに、絶対座標系におけるロボットの重心座標 (X_r, Y_r) は (4) 式、(5) 式のように求まり、これらの (x_p, y_p) にロボット座標系で計測したランドマーク p の値を代入し、(3) 式で両方のランドマーク情報を用いて β を求めれば自己位置 (X_r, Y_r) が同定できる。

$$\beta = \tan^{-1}\frac{y_q - y_p}{x_p - x_q} \quad (3)$$

$$X_r = -x_p + (\cos\beta)Fw + (\sin\beta)Fd \quad (4)$$

$$Y_r = -y_p - (\sin\beta)Fw + (\cos\beta)Fd \quad (5)$$

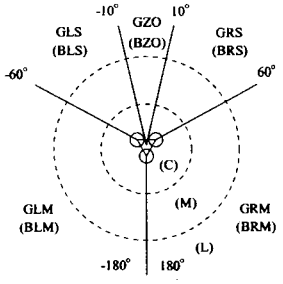
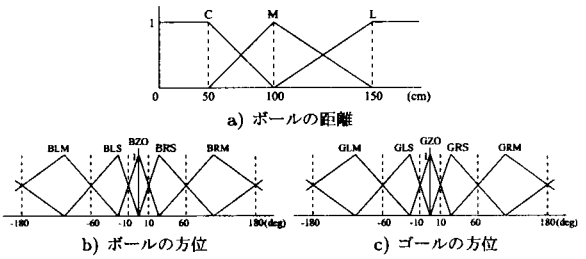


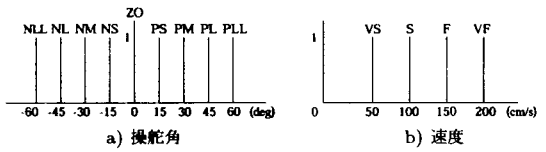
図 4．状態空間



a) ボールの距離

b) ボールの方位　　c) ゴールの方位

図 5．前件部



a) 操舵角　　b) 速度

図 6．後件部

ロボット座標系と絶対座標系が同一となるようにロボットを原点に固定し、自己位置同定を行なう。実際の RoboCup 環境においてコーナーポールをランドマークとして自己位置同定を行った結果、左右のコーナーポールの位置は誤差を含んだ測定値として $(\tilde{x}_p,\tilde{y}_p)$、$(\tilde{x}_q,\tilde{y}_q)$ が計測されたとする。この場合、自己位置同定を行なう (3)〜(5) 式において、実際の測定値を用いて自己位置を正しく導出するためには、x_p、y_p、x_q、y_q に対して (6) 式のような補正をかける必要がある。

$$x'_p = x_p\frac{-Fw}{\tilde{x}_p} \quad y'_p = y_p\frac{Fd}{\tilde{y}_p} \quad x'_q = x_q\frac{Fw}{\tilde{x}_q} \quad y'_q = y_q\frac{Fd}{\tilde{y}_q} \quad (6)$$

この補正値 x'_p、y'_p、x'_q、y'_q を計測された (3)〜(5) 式の x_p、y_p、x_q、y_q の代わりに用いることによって、原点における測定誤差を補正した自己位置の同定を行うことができる。

絶対座標系における物体 A の座標を (X_a, Y_a) とする。ロボット座標系における物体 A の位置 (x_a, y_a) は (1) 式、(2) 式より、補正後のロボット座標系の x 軸と絶対座標系の X 軸の傾き角 β' および自己位置 (X'_r, Y'_r) は (3)〜(5) 式の上記の補正をかけた式より求まるため、絶対座標系における物体 A の位置 (X_a, Y_a) は (7) 式、(8) 式より同定することができる。

$$X_a = \cos\beta'(x_a + X'_r) - \sin\beta'(y_a + Y'_r) \quad (7)$$

$$Y_a = \sin\beta'(x_a + X'_r) + \cos\beta'(y_a + Y'_r) \quad (8)$$

4. ボール回り込み制御

ここでは RoboCup 中型リーグの環境において、移動ロボットが自律的にボールに向かい、ゴールを行なうまでの一連の動作を考える。移動ロボットの制御にはファジィ制御を用い、ボールまでの距離と方位、ゴールの方位よりロボットの移動速度と操舵角を制御し、全周に対する外界情報を基にボールへの回りこみを行なう。ファジィ推論を用いたロボットの全周における環境の状態空間を図 4 に示す。

表 1．ファジィルール

	BLM			BLS			BZO			BBS			BRM		
	C	M	L	C	M	L	C	M	L	C	M	L	C	M	L
GLM	NLL	NLL	NLL	PL	PM	PS	PLL	PL	PL	PPL	PPL	PPL	PLL	PLL	PLL
GLS	NLL	NLL	NLL	PS	PS	PS	PL	PM	PM	PPL	PPL	PPL	PLL	PLL	PLL
GZO	NLL	NLL	NLL	NLL	NL	NM	ZO	ZO	ZO	PPL	PL	PM	PLL	PLL	PLL
GRS	NLL	NLL	NLL	NLL	NLL	NLL	NL	NM	NM	NS	NS	NS	PLL	PLL	PLL
GRL	NLL	NLL	NLL	NLL	NLL	NLL	NLL	NL	NL	NL	NM	NS	PLL	PLL	PLL

a) 操舵角

	BLM			BLS			BZO			BBS			BRM		
	C	M	L	C	M	L	C	M	L	C	M	L	C	M	L
GLM	VS	S	F	VS	S	F	VS	S	S	VS	VS	VS	VS	S	F
GLS	VS	S	F	S	F	F	S	S	F	VS	VS	VS	VS	S	F
GZO	VS	S	F	VS	VS	S	VF	VF	VF	VS	VS	S	VS	S	F
GRS	VS	S	F	VS	VS	S	S	S	F	S	F	F	VS	S	F
GRL	VS	S	F	VS	VS	VS	VS	S	S	S	S	F	VS	S	F

b) 速度

操舵角と速度を制御することにより、移動ロボットを自律行動させるため、ファジィ制御の後件部 (図 6) を次のように決定する。操舵角はロボットの正面方向を ZO として、左方向に NS、NM、NL、NLL、右方向に P、PM、PL、PLL と 15 度ずつにとる。速度は最小の VS を 50cm/s とし、S、F、VF と 50cm ずつ増加した値をとる。

以上の前件部と後件部からなるファジィルールの関係を表 1 に示す。このルールを用いることにより、移動ロボットは自律的にボールの回り込み制御を行なう。

5. 結 言

本研究では、3 台の全方位カメラによるマルチ全方位ビジョンシステム:MOVIS を構築し、自律移動ロボットにおける物体位置計測、自己位置同定を行う手法について提案した。また、MOVIS より得た外界情報を基にファジィ制御によってロボットを自律行動させるルールについても解説した。紙面の都合上、MOVIS を用いた計測実験結果およびファジィ制御による自律行動の実行結果を省いたが、講演時に報告する予定である。

参考文献

1) 知原 伸悟, 川端 邦明, 浅間 一, 三島 健稔: "全方位視覚センサによる移動ロボットの自己位置推定, " 第 *20* 回日本ロボット学会学術講演予稿集 *CD-ROM* , 3A25 (2002)
2) 子安 大士, 三浦 純, 白井 良明: "実時間全方位ステレオを用いたロボットナビゲーションのための移動物体認識, " *2001* 年ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集 *CD-ROM* (2001)
3) 三木 隆太郎, 山澤 一誠, 竹村 治雄, 横矢 直和: "複数の全方位画像センサを用いた遠隔監視システム," 信学技報, PRMU98-177, pp.7-14 (1997)

＜連絡先＞

〒 910-8507 福井市文京 3-9-1
福井大学大学院 工学研究科
知能システム工学専攻 清水平 渉
Tel & Fax : 0776-27-8050 (直通)
E-mail : wsimizuhira@ir.his.fukui-u.ac.jp

ロボットのイメージとは？ ―ロボフェスタ神奈川 2001 横浜大会での調査―

How should we perceive robots?: The research at RoboFesta Kanagawa 2001 Yokohama Competition

樫淵 めぐみ	鈴木 佳苗	坂元 章	長田 純一
Megumi Kashibuchi	Kanae Suzuki	Akira Sakamoto	Junichi Osada
お茶の水女子大学	筑波大学	お茶の水女子大学	(株)NEC デザイン
Ochanomizu University	University of Tsukuba	Ochanomizu University	NEC Design

Abstract; In order to examine how people perceive robots, the authors conducted a survey research for 493 visitors to RoboFesta Kanagawa 2001 Yokohama Competition, and then analyzed the images of seven stimuli; Humans, animals, machines, inanimate objects, and three robots (AIBO, ASIMO, and PaPeRo). The results showed that the seven stimuli were classified into the human-animal group, machine-inanimate object group, and the AIBO-ASIMO-PaPeRo (robot) group, and that the robot group fell in between the two other groups. These results indicate that very different types of robots could be put into one category: The image of a robot.

1 はじめに

科学技術の進歩に伴い、SF の世界に描かれたロボットとともにある暮らしが夢物語ではなくなりつつある。これまで、ロボットといえば、工場の生産ラインで用いられる産業用ロボットが中心であったが、近年、家庭などの日常生活の場で使用できる、小型で軽量のロボットが続々と開発・発売されている。このような流れは今後も加速すると考えられ、近い将来、家庭用ロボットや介護ロボットなどの形で、人間とロボットとの相互作用は日常的なものとなっていくだろう。ロボットと人間の相互作用について、検討する必要性が高まっている。しかしながら、これまでのところ、ロボットの機能に注目した開発や研究は盛んであるが、ロボットが人間に与える心理的影響はほとんど研究されていない。それ以前に、我々人間がどのようにロボットを知覚しているのかについても、信頼性の高い手法による実証研究は非常に乏しい。

現在われわれが目にすることのできるロボットは、ヒト型、動物型、既存の何とも似ていない形などさまざまであり、それぞれのもっている機能や特徴も千差万別である。果たして、これらさまざまなタイプのロボットは、それぞれが似通った存在として一つのカテゴリ（「ロボット」カテゴリ）を形作っているのだろうか。すなわち、すべてのロボットに共通する、一まとまりのイメージというものが存在しているものなのだろうか。また、われわれは、新奇な存在であるロボットを、機械・人間・動物・無機物といった、なじみのある既存のものと似たものであると知覚しているのだろうか。それとも、違うものであると知覚しているのだろうか。

以上の点を明らかにするために、本研究では、ロボフェスタ神奈川 2001 横浜大会会場（パシフィコ横浜）において、来場者に対して調査を実施することにより、人々のロボットに対するイメージ内容について検討した。ロボフェスタ会場内には多数のロボットが展示されており、これらを実際に目にした来場者を調査対象とすることができるため、同展示会にて調査を実施することとした。

2 方法

調査対象者

10 歳以下 19 名（男子 8 名・女子 11 名）、10 代 132 名（男子 61 名・女子 71 名）、20 代 55 名（男性 19 名・女性 36 名）、30 代 126 名（男性 45 名・女性 81 名）、40 代 91 名（男性 50 名・女性 41 名）、50 代 34 名（男性 15 名・女性 19 名）、60 代 36 名（男性 23 名・女性 13 名）の総計 493 名。

測定内容

ロボットイメージ尺度 鈴木他[1]により作成された「ロボットイメージ尺度」を用いた。AIBO (SONY)、ASIMO（ホンダ）、PaPeRo（NEC）、人間、動物、機械、無機物の計 7 種類のイメージ対象のそれぞれについて、両極の 6 件法で測定した。

デモグラフィック変数 性別と年齢。

手続き

ロボフェスタ神奈川 2001 横浜大会会場（パシフィコ横浜）における NEC 出展ブース内にて、同ブース来場者を対象に質問紙を配布し、同ブース内で回答してもらい、その場で回収した。

3 結果と考察

10 個のコンストラクトのそれぞれについて、イメージ対象を独立変数、コンストラクトを従属変数、性別と年齢を共変量として統制した共分散分析を行なった結果、すべてのコンストラクトについて、対象の主効果が有意となった。そこで、各コンストラクトを従属変数、性別と年齢を独立変数とする重回帰分析を行ない、その残差について多重範囲検定を行なった。対象別の残差平均値と、主要な結果を表 1 に示す。

分析の結果を概観すると、大半のコンストラクトについて、3 種類のロボットのあいだに有意差はなく、1 つのグループとしてまとまっていることが示された。また、多くのコンストラクトについて、ロボットのグループは、人間と動物のグループと、機械と無機物のグループのあいだに位置していた。これらの結果は、なじみのないロボットであっても、一まとまりのイメージを形作っており、そのイメージは、人間や動物と、機械や無機物のあいだに位置するが、そのどちらとも異なるものであることを示唆している。

このようなパターンをとらないコンストラクトとしては、「②安心な－不安な」について、AIBO と PaPeRo がもっとも得点が高く（すなわち「安心な」にあてはまると評価された）、次いで ASIMO と動物が続き、人間、機械と無機物の順番であった。機械不安に関する議論においては、一般に、人は、なじみのない精密な機械に対して不安を感じるとされるが、本結果は、ロボットに関しては、このような傾向はみられない可能性を示唆するものであり、興味深い。また、「⑤役に立つ－役に立たない」と「⑥複雑な－単純な」については、人間や機械がもっとも得点が高く、動物とロボットが続き、無機物の順であった。科学技術の最先端を体現しているロボットではあるが、現時点ではまだ、「役に立つ」「複雑な」ものとは捉えられていないようである。

参考文献

[1] 鈴木佳苗・橿淵めぐみ・坂元章・長田純一: 三つ組み法によるロボットイメージ尺度の作成, 第 19 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集（印刷中）

連絡先

〒112-8610
東京都文京区大塚 2-1-1
お茶の水女子大学　文教育学部 1 号館棟 224 室
橿淵 めぐみ
Email : megumik@hss.ocha.ac.jp

表 1　対象別の残差平均値

	AIBO	ASIMO	PaPeRo	人間	動物	機械	無機物	*df*	*F*値
1 親しみやすい	0.39 b	0.19 c	0.55 b	0.44 b	0.83 a	-1.04 d	-1.36 e	3,313	179.06
2 安心な	0.38 a	0.15 b	0.42 a	-0.20 c	0.04 b	-0.42 d	-0.37 d	3,313	33.71
3 感情をもつ	0.01 c	-0.19 c	-0.04 c	1.64 a	1.39 b	-1.26 d	-1.57 e	3,313	351.11
4 あたたかい	0.11 d	0.11 d	0.43 c	0.60 b	1.18 a	-1.15 e	-1.27 e	3,313	234.33
5 役に立つ	-0.43 e	0.00 c	-0.16 d	0.33 b	0.09 c	0.65 a	-0.48 e	3,313	53.20
6 複雑な	-0.08 c	0.41 b	-0.30 d	0.65 a	0.06 c	0.34 b	-1.07 e	3,313	78.44
7 好ましい	0.09 b	0.05 b	0.20 b	0.10 b	0.41 a	-0.25 c	-0.60 d	3,313	27.48
8 生命のある	-0.53 b	-0.38 b	-0.39 b	1.74 a	1.67 a	-1.18 d	-0.94 c	3,313	304.31
9 心が通じる	0.01 b	0.02 b	0.08 b	0.86 a	0.89 a	-0.81 c	-1.06 d	3,313	123.00
10 自律的	-0.02 c	-0.18 c	-0.22 c	1.54 a	1.35 b	-1.15 d	-1.34 e	3,313	286.70

注 1：性別と年齢の効果が統制されている。　注 2：すべて $p<.001$。
注 3：同一のアルファベットが付してある数値の間に有意差がないことを示す。

三つ組み法によるロボットイメージ尺度の作成

The construction of the robot image scale using the Triad Method

鈴木 佳苗	櫃淵 めぐみ	坂元 章	長田 純一
Kanae Suzuki	Megumi Kashibuchi	Akira Sakamoto	Junichi Osada
筑波大学	お茶の水女子大学	お茶の水女子大学	(株) NECデザイン
University of Tsukuba	Ochanomizu University	Ochanomizu University	NEC Design

Abstract: The purpose of this study is the construction of a scale for measuring our perception of robots (the robot image scale). Six participants who had a good knowledge of robots as well as a good deal of contact with robots were shown three targets of seven stimuli: Humans, animals, machines, inanimate objects, and three robots (AIBO, ASIMO, and PaPeRo). Then on a questionnaire they were asked to find similarities as specific things common to two but not applying to the other, and also, contrasts as constructs opposite to the similarities (the Triad Method). The constructs were grouped into categories having the same meaning with these described as being similar or contrasting. As a result, frequently described categories such as "familiar" "interaction" were selected. Moreover, we added four more categories such as "general evaluation" "fear of machines" in order to assess evaluative aspects of the targets and the feeling of unease with new media. In the end a total of ten representative bipolar constructs in each category were obtained.

1 はじめに

近年、家庭で使用できる小型で軽量のロボットが開発・販売され、ロボットとの日常的な相互作用が可能となってきた。今後、ロボットの普及に伴い、日常的な相互作用の機会は益々増えていくと考えられる。こうした状況では、ロボットは、人間にとって好ましい、安心して相互作用できるようなものであることが求められるだろう。

ロボットの印象に関しては、これまでに、ロボット開発の領域で研究が行われてきている[1]。例えば、池浦らは、移動ロボットが人間に接近するときの皮膚電気反射(GSR)を測定し、ロボットが急に発信するほど、脅威が強く感じられていたことを示している[2]。このように、ロボットの個々の機能や動きに注目して印象を検討している研究はあるが、ロボット全般のイメージを信頼性の高い手法を用いて実証的に検討した研究は乏しい。

ロボット全般のイメージを検討するためには、まず、そのための尺度を開発する必要がある。そこで、本研究では、対人認知の領域で用いられてきた「三つ組み法」[3]という手法を用いることにより、ロボットイメージ尺度の作成を行うこととした。三つ組み法とは、評定者に3つの対象を呈示し、そのうちの2つに共通している点（類似概念）とその対義語（対比概念）を指摘させる方法であり、この類似概念と対比概念が1対のコンストラクトとして抽出されることになる。三つ組み法は、具体的な対象間の比較を通してコンストラクトを抽出するため、イメージしにくい対象を捉える視点を抽出するのに特に有用であると考えられている。現在、我々が目にすることのできるロボットには、ヒト型、動物型、既存の何とも似ていない形など様々なタイプのものがあり、それぞれのロボットの機能や特徴も多様である。本研究では、具体的な対象として、様々なタイプのロボットの中から、ペット型ロボット(SONY社のAIBO)、二足歩行のできる人間型ロボット(HONDA社のASIMO)、コミュニケーション志向型のロボット(NEC社のPaPePo)を取り上げ、これら3つのタイプのロボット間、あるいは、機械、人間、動物、無機物との比較を通して、新規な存在であるロボットを捉えるコンストラクトを抽出することとした。

2 方 法

調査対象者 心理学を専攻する大学院生 4 名と学部4年生2名の計6名に対して調査を行った。いずれも、マルチメディア評価研究に従事しており、ロボットに関する知識や接触経験の高い者であった。

イメージ対象 AIBO (SONY)、 ASIMO (ホンダ)、PaPeRo (NEC)、人間、動物、機械、無機物の7つを対象として呈示した。

手続き 三つ組み法を用いて、7つの評定対象から3つを呈示し、2つに共通し、他の1つとは異なる「類似概念」と、その対義語である「対比概念」について回答を求めた。

図1に三つ組み法の例を示した。表中の○印の2つの対象に共通し、×印の1つの対象にあてはまら

	人間	動物	機械	無機物（石や机）	ASIMO（HONDA）	AIBO（SONY）	PAPERO（NEC）		類似概念	対比概念
1	○			○		×				
2		○			×		○			
3	○					○	×			
4	○	×			○					
5	×			○		○				

図1 三つ組み法の質問紙例

ないものが「類似概念」、その対義語が「対比概念」として記述された。全ての組合せを2つにランダムに分けた質問紙を作成し、評定者にはどちらか一方の質問紙をランダムに配布した。

3 結果と考察

グループ化 コンストラクトの選出にあたっては、まず、類似概念、対比概念として挙げられた言葉を共通な意味をもつカテゴリにグループ化した。

例えば、「生活に役立つ」「働く」「仕事をする」「労働力になる」「道具として使われる」などの言葉は、「役に立つ」というカテゴリに、「相互理解」「働きかけ」「反応」「相互作用」などの言葉は、「相互作用」というカテゴリにグループ化した。最終的に、「役に立つ」「人工」「生」「相互作用」「自律」「感情」「身近」「生産」の8つのカテゴリを得た。

コンストラクトの選出 小学生などの年少者から高齢者までの広い年齢を対象として今後イメージ調査を行うために、本研究では、各カテゴリの意味を反映し、且つどの年齢においても理解できるコンストラクトを挙げた。その結果、表1中の上6つのコンストラクトが選出された。

対人認知の領域では、評価に関する次元が対象を捉える基本的な次元として重要であることが示唆されていることから、対象に対する評価的イメージを測定するために、一般的な評価として「好ましい－好ましくない」、対人認知の領域で用いられてきた社会的評価次元から「あたたかい－つめたい」、知的評価次元から「複雑な－単純な」の計3カテゴリを加えることとした。また、機械不安などに代表されるように、パソコンなどの新しいメディアに対しては不安を感じることが予想されることから、「安心な－不安な」を含めることとした。このように、概念的に重要であると考えられる4つのコンストラクトを追加し、計10カテゴリとした（表1）。

尺度作成における三つ組み法の利用の有用性 先述のように、三つ組み法では、具体的な対象間の比較を通して、個人が実際にその対象を捉える際に用いている視点を抽出することができるという利点がある。本研究のように、三つ組み法によって複数の調査対象者から回答を得て、代表的なカテゴリ・コンストラクトを抽出するという一連の手続きは、広い対象に利用可能な方法であり、今後の応用が期待される。

表1 選出されたカテゴリとコンストラクト

カテゴリ	コンストラクト	
身近	親しみやすい	親しみにくい
感情	感情をもつ	感情をもたない
役に立つ・生産	役に立たない	役に立つ
人工・生	生命がある	生命がない
相互作用	心が通じない	心が通じる
自律	自分の意思で行動する（自律的）	自分ではなく他人の意思で行動する（他律的）
（機械不安）	安心な	不安な
（社会的評価）	つめたい	あたたかい
（知的評価）	単純な	複雑な
（一般的評価）	好ましい	好ましくない

注：括弧内は、追加カテゴリを表す。

参考文献

[1] 橿淵めぐみ： ロボットの影響 －対ロボット知覚と有効利用，そして悪影響論－ 坂元章(編) メディアと人間の発達 学文社 (印刷中)

[2] 池浦良淳・大塚英樹・猪岡光： 皮膚電気反射に基づくロボット運動の心理的評価に関する考察 人間工学, Vol.31, pp.355-358 (1995)

[3] 若林明雄： George A. Kelly の個人的構成概念の心理学 －パーソナルコンストラクトの理論と評価－ 心理学評論, Vol.35, pp.311-338 (1992)

連絡先：
〒305-8550
茨城県つくば市春日 1－2
筑波大学 図書館情報学系
鈴木 佳苗
E-mail: kanae@slis.tsukuba.ac.jp

SD 法による人ロボット相互作用の評価

Evaluation of Human-Robot Interaction with SD method

神田崇行，石黒浩

Takayuki Kanda, and Hiroshi Ishiguro

ATR 知能ロボティクス研究所

ATR Intelligent Robotics and Communication Laboratories

Abstract －We have developed a partner robot named "Robovie". A unique aspect of the robot is that the mechanism is designed for communication. Robovie can generate enough behaviors needed for communication with the actuators and sensors. Further, we have evaluated the robot's performance of the interactive behaviors through a SD method. We believe that it is necessary and important to evaluate the interaction for developing and improving partner robots, which require psychological measurements.

1. はじめに

ロボット工学には２つの方向性がある：１つは限られた環境で動作するタスク指向ロボットの開発であり，他方はオープンな環境で人間と協調して動作するインタラクション指向ロボットの開発である．産業用ロボットは前者であり，工場内の限られた環境で組立のような決まったタスクを行う．我々の開発しているロボットはこれらと異なり，パートナーとして我々の日常生活の中にあり，コミュニケーション機能を通して様々な情報をもたらす．我々は，このようにパートナー型のロボットが存在することが，コミュニケーションのための新たな情報基盤となると考える．

このようなロボットの実現の際に重要となるのが，相互作用の評価である．従来の産業用ロボットなどはその性能を位置精度やタスク実行時間といった物理的な尺度で測定することが出来たが，パートナー型のロボットは人間に影響を及ぼすことがそのタスクに含まれるために，評価のために心理尺度を用いる必要が生じる．

2. Robovie:対話型ヒューマノイドロボット

図１に我々の開発したロボット"Robovie"を示す．Robovie は人間とコミュニケーションするために人間に類似した外見を持ち，人間が視覚・触覚・聴覚をもつように様々なセンサを持つ[1].

3. 自律動作による相互作用

Robovie に，子供のように人間と日常的なコミュニケーション行動をする自律行動を実装した(システムの詳細は文献[2]に示す). このようなインタラクション機能は将来日常生活の場で活動するロボットには欠かせないものである．自律インタラクション機能の実験のために，「抱擁」「握手」「簡単な会話」「物の指さし」といった 80 種類程度の人間との遊び行動および，「頭をかく」「腕組みする」といった 20 種類程度の待機行動，パトロールの真似をする等の環境を移動する 10 程度の行動を用意した．ロボットシステムは、人間からの働きかけがないときは待機行動や移動行動を実行し、人間からの働きかけがあった場合には、働きかけがある限り遊び行動を続けるように設計されている。

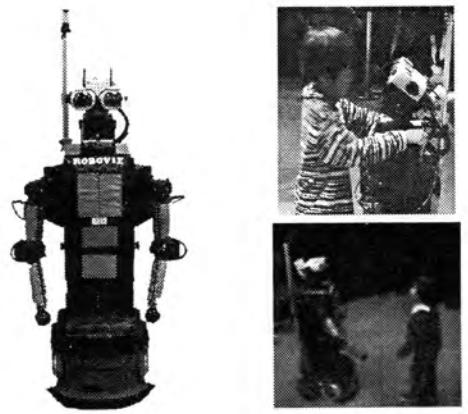


図 1 : Robovie

4. 評価実験

開発したロボットを SD 法により評価することを試みた．（文献[3]に詳細を報告する．）

方法 30 名の大学生が被験者として実験に参加し，以下の手順で評価実験を行った．

1. 被験者は 5 分間ロボットを観察するように指示される．
2. ロボットからの“触ってね”と言った呼びかけに応じて;被験者はロボットの自律インタラクション機能を体験する．
3. ロボットの印象に関するアンケートに回答する．

実験条件 Passive, Active, Complex の 3 通りの動作パターンが用意された．

Passive: ロボットは最初「遊ぼうよ，触ってね」と言って待っている．被験者がロボットを触ると「握手」や「じゃんけん」等の遊び行動を 1 つ実行する．その後，再びロボットは「遊ぼうよ，触ってね」と言って待っている．

Active: ロボットは「遊ぼうよ，触ってね」と言って待っている．被験者がロボットを触ると遊び行動をする．その後，被験者がロボットからの働きかけに応じる限り，ロボットは続けて遊び行動をしようとし続ける．

表 1:因子分析の結果得られた因子パターン

	Evalu-ation	Famil-iarity	Poten-cy	Social-ity	Activ-ity	Commu-nality
良い	**0.808**	0.252	0.127	0.003	0.146	0.755
やさしい	**0.759**	0.110	-0.038	0.197	-0.209	0.671
かわいらしい	**0.690**	**0.514**	-0.111	0.132	-0.020	0.770
面白い	**0.505**	0.442	0.153	0.182	0.355	0.633
暖かい	0.451	0.074	0.110	0.399	0.117	0.394
近づきがたい	0.417	0.136	0.240	0.246	-0.085	0.318
人間的な	0.336	0.116	0.167	0.312	0.137	0.271
愉快な	0.186	**0.873**	0.112	0.166	-0.011	0.837
親しみやすい	0.313	**0.727**	0.059	0.175	0.001	0.660
好きな	**0.573**	**0.614**	-0.108	0.086	0.149	0.746
陽気な	0.021	**0.527**	0.029	0.351	0.078	0.408
感じのよい	0.453	**0.509**	0.130	0.302	0.002	0.573
賢い	0.331	0.448	0.252	-0.263	0.254	0.508
派手な	-0.033	0.079	**0.667**	0.263	0.279	0.599
複雑な	0.012	0.021	**0.654**	-0.295	0.113	0.528
敏感な	0.112	-0.004	**0.640**	0.079	0.152	0.451
充実した	0.226	0.339	**0.516**	0.203	0.213	0.519
明るい	0.239	0.458	0.173	**0.657**	0.162	0.755
積極的な	0.195	0.202	-0.099	**0.556**	0.224	0.447
うちとけた	0.480	0.329	0.103	**0.528**	-0.129	0.645
速い	-0.024	0.022	0.374	0.040	**0.711**	0.648
すばやい	-0.044	0.022	0.204	0.124	**0.574**	0.389
興味深い	0.377	0.351	0.084	0.163	0.390	0.452
Proportion	16.355	15.565	8.901	8.792	6.795	

Complex: Active パターンに加えて，被験者がロボットの働きかけに応じるのを止めた際に待ち状態に戻る他に，ロボットは歩き回ったり待機行動をしたりする．

結果

ロボットから受けた主観的印象について，28 の形容詞対による SD 法により評価を行った．各形容詞対について得られた 7 段階評価（非常に・かなり・やや・どちらでもない・やや・かなり・非常に）による評定値を因子分析した．固有値に基づいて 5 因子を抽出した．得られた解の累積説明率は 56.4%であった．バリマックス回転後の各項目の負荷量及び寄与率を表 2 に示す．1 番目の因子は良い，面白いといった項目で負荷が高かったため「評価性(Evaluation)」因子と命名した．2 番目以降の各因子も負荷が高い形容詞に基づいてそれぞれ「親近性(Familiarity)」「力量性(Potency)」「社交性(Sociality)」「活動性(Activity)」因子と命名した．

因子分析の結果得られた標準因子得点に基づき，ロボットの 3 通りの行動パターン「受動」「能動」「複雑な行動」の印象を比較した(表 3,図 13)．分散分析の結果，力量性得点に有意性が見られた．この力量性得点について LSD 法による多重比較を行ったところ，「受動」パターンの得点が「複雑」パターンの得点よりも有意に大きかった($p<0.05$)．有意傾向のあった親近性についても参考のために多重比較を行ったところ「受動」パターンの得点が「能動」パターンの得点よりも有意に大きかった($p<0.05$)．つまり，ロボットは「受動」パターンによる行動を行った際に最も好意的な印象を与えた．

表 2：観察条件毎の印象の比較

	Num. of subjects	Evalu-ation	Famil-iarity	Poten-cy	Social-ity	Activ-ity
Passive	10	0.45	**0.55**	**0.25**	0.28	0.28
Active	11	0.16	**-0.51**	-0.20	-0.32	0.04
Complex	10	0.24	0.29	**-0.84**	0.07	-0.41
p		0.82	0.06	0.04	0.40	0.33
			#1	#2		

(Multiple Comparison #1:Passive>Active, #2:Passive>Complex)

5. おわりに

本稿では，SD 法による人-ロボット相互作用について簡単に報告した．このようなロボットのもたらす影響を測る上では，主観的評価を測るための心理尺度の利用は不可欠であると言える．一方，実験において「受動」パターンは好意的な印象を与えたが，人間のロボットに対する自発的発話や対人的行動を引き起こす面では他の条件に劣っていた[3]．今後，対ロボット距離や視線のやりとりといった相互作用における物理指標[4]の発見と利用が重要となると考えられる．

謝辞

本研究は通信・放送機構の研究委託により実施したものである．

参考文献

[1] 神田崇行,石黒浩,小野哲雄,今井倫太,前田武志,中津良平:研究用プラットホームとしての日常活動型ロボット“Robovie”の開発，電子情報通信学会論文誌，Vol.J85-D-I, No.4, pp.380-389 (2002).

[2] T. Kanda, H. Ishiguro, M. Imai, T. Ono and K. Mase: A constructive approach for developing interactive humanoid robots, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2002), pp. 1265-1270 (2002).

[3] 神田崇行,石黒浩,小野哲雄,今井倫太,中津良平:人間と相互作用する自律型ロボットRobovieの評価，日本ロボット学会誌，Vol.20, No.3, pp.315-323 (2002).

[4] T. Kanda, H. Ishiguro, M. Imai, and T. Ono: Body Movement Analysis of Human-Robot Interaction,'' Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI 2003) (2003).

連絡先:

〒619-0288
京都府相楽郡精華町光台 2-2-2
ATR 知能ロボティクス研究所
神田崇行
電話: 0774-95-1424
FAX: 0774-95-1408
E-mail: kanda@atr.co.jp

ペット型ロボットをめぐる物語生成
―有料老人ホームにおけるロボット介在活動(RAA)の事例―
Narrative generation of the pet-type robot:
A case study of Robot Assisted Activity (RAA) at a for-profit nursing home

加藤　謙介	渥美　公秀	矢守　克也
Kensuke KATO	Tomohide ATSUMI	Katsuya YAMORI
大阪大学	大阪大学	京都大学
Osaka University	Osaka University	Kyoto University

Abstracts: In this study, we examined robot assisted activity (RAA) with a pet-type robot for elderly people at a for-profit nursing home from the perspective of group dynamics. In concrete, we investigated participants' narratives during RAA based on VTR analysis. As a result of RAA, the participants conducted "mind reading" toward the robot, and constructed "story" about RAA through their own narratives in cooperation.

問題　近年、ペット型ロボットへの社会的関心が高まるとともに、ロボットを、実際のケアの場面で活用する事例が報告されはじめている。ペット型ロボットは、その形態が動物に似ていることもあり、動物介在活動（Animal Assisted Activity: AAA）[1]と同様な手法で、治療場面で試用されつつある。横山[2]は、動物介在活動を模したロボットの利用法を、ロボット介在活動（Robot Assisted Activity：RAA）と名付けている。ロボットを用いたケアの試みについては、そもそも一般に入手可能なロボットの登場がごく最近だったこともあり、研究・実践例ともに未だ数は多くはない。しかし、小児病棟や高齢者施設などの医療・介護施設における研究・実践例は、徐々に報告され始めている（e.g., [2][3][4]）。

ロボットと人との交流場面では、人間がロボットの仕草に対して盛んに意味付けを行っていることが報告されている。横山[2]は、RAA において、対象となった子供や高齢者が、ロボットの挙動に対して様々な意味付けをしている様子を報告している。特に、横山の観察した小児病棟の事例では、RAA に参加した患児が、一緒に参加している他の患児の目を見ながら、ペット型ロボットとのふれあい、その行動に解釈を行っている様子が報告されている。また、SONY 製のペット型ロボット AIBO について、佐部ら[5]は、「ユーザが自分なりに都合よく解釈を与えて」いると述べている。このように、人間側の「解釈」が、対象との相互作用を特徴付ける事態は、人と動物の関係においても観察されている[6]。人間が、対象（ロボット）の行動に解釈を施し、あたかも「心」が存在するかのように交流を図ることは、RAA を考察する際に重要な示唆を与えるものであると考えられる。

人工知能研究や古典的なロボット研究では、ごく簡単な機構で反応を行うロボットや人工知能に対して、観察者が「心」を見出してしまう例がいくつか報告されている（e.g., [7][8][9]）。興味深いのは、例えば刺激から「逃げる」行動や、「適当な」相槌を打つといった振る舞いにより、観察者が、対象（機械やロボット）に「心」のようなものを見出してしまうことである。つまり、対象に「心」が備えられていなくても、我々は、そこに「心」を見出し、相互行為を行いうるのである。

こうした特徴、即ち、対象に何らかの「心」のようなものを措定して相互作用を行うことについて、上野・西阪[10]は、「心をだれかに（あるいは自分に）帰属するということ、つまり『心をすること doing mind』は、具体的な相互行為の中で、その相互行為を進めていくための一つのリソースにほかならない」(p.39) と述べている。上野・西阪の議論を踏まえれば、対象に心を帰属すること、即ち"doing mind"を通して、我々は、「物」とも相互行為を行いうるということになるだろう。RAA の実施場面でしばしば観察される、ロボットの振る舞いへの解釈は、RAA の参加者が、ロボットに対して"doing mind"を行いながら、相互作用を継続していることを表している、と言えるだろう。

しかしながら、こうした対象への「心」的状態の解釈、"doing mind"は、ロボット等と対峙する対象者個

人の「主観的な」解釈に留まっていたのでは、対象との相互行為の継続が困難である、という点である。これは、RAAの実践例において、しばしば対象者がロボットに「飽きて」しまうことが報告されていることにも示されている（e.g., [2]）。

ここで、物語論の議論を援用し、「心の読み取り」に端を発する相互作用の特徴を、さらに理論的に整理してみよう。物語論に関する議論のうち、本研究で特に重要なのは、「物語が、他人とのやり取りの中でのみ生み出される」という点である[11]。「心の読み取り」の結果得られた解釈は、他人に承認されることを通して、初めて「物語」となる。麻生[12]は、物語が「共同的に承認」されることで初めて成立することを、母子間の相互作用から考察している。ロボットと、我々人間とのコミュニケーションを考察する際には、「心の読み取り（mind reading）－解釈の他者による承認－物語の生成」という一連のプロセスが、理論的に重要な基盤となると考えられる。

本研究では、上記の理論的観点を踏まえ、施設に入所する高齢者を対象としたペット型ロボットを用いたRAAを取り上げ、グループ・ダイナミックスの観点から検討を試みた。具体的には、筆者ら自身がRAAを実践するとともに、施設でのRAAに対して長期にわたる参与観察を行い、RAAセッション中における参加者の相互作用を、定量的・定性的データをもとに検討することを試みた。本稿では特に、『「参加者のロボットの挙動に対する心の読み取り」－「参加者同士による解釈の共同的承認」－「RAAをめぐる物語生成」』というプロセスに着目し、参加者らが、ペット型ロボットをめぐり、どのような相互行為を行い、RAAに参加しているのかを検討した。

方法 **[1]参与観察**：筆者らは、有料老人ホームK（兵庫県西宮市）において、入所する高齢者を対象とするペット型ロボットを用いたRAAを実施とともに、参与観察を行った。RAAに対する参与観察は、2002年5月25日から、毎週1回約1時間実施した（2003年2月までに25回実施）。その際、筆者らは、観察記録を記述するとともに、許可を得てRAAの場面をビデオ撮影した。加えて筆者らは、RAA実施後に毎回、施設職員に対して、インタヴューを実施し、RAA場面全体の印象、及び参加者の様子について聞き取りを行った。なお、高齢者へのインタヴューデータとしては、RAA中の会話記録を用いた。

本研究では、VTRデータ、筆者らの観察記録、及び、インタヴュー結果をもとに、定量的・定性的分析を実施した。

(1)定量的分析：筆者らは、観察記録等から、RAAセッション中における参加者群の行動カテゴリーとして12項目（『AIBOの「発声」・「動き」』、『AIBO-Masterの「発声」・「AIBOへの接触」・「AIBOへの視線」』、『対象者の「発声」・「AIBOへの接触」・「AIBOへの視線」』、『施設職員の「発声」・「AIBOへの接触」・「AIBOへの視線」』『参加者数』）を抽出した。加えて、KホームでのRAAのうち、第1セッション（42分間）と第13セッション（62分間）のVTRデータを取り上げ、5秒を1測定単位とし、セッション中における参加者群の行動パターンを分析・比較した。なお、定量的分析手法の詳細については、渥美・矢守・加藤[13]に詳述したため、本稿での説明は最小限に留める。

(2)定性的分析：筆者らは、RAA時のVTRデータ及び観察記録、加えて、施設職員に対するインタヴュー結果から、参加者の反応、およびRAA時における参加者の会話・挙動の特徴を整理した。その際、特にペット型ロボット、及びRAAをめぐる参加者群の「心の読み取り－解釈の他者による承認－物語の生成」のプロセスに着目し、RAAセッション中における参加者間の会話・挙動の特徴を抽出した。

[2]Kホームにおける RAA：KホームにおけるRAAは、同施設に入所する高齢者を対象とするレクリエーションプログラムの一環として実施された。RAAには、株式会社SONY製のペット型ロボットAIBO（ERS-210）が1台用いられた。AIBOには、自律動作を可能にするプログラム「ハローAIBO！」を組み込んだ。RAAのプログラムは、AIBOとのふれあい、ボール遊び等であった。KホームでのRAAには、対象者・施設職員・AIBO-Masterの3群が参加した。

(1)対象者：対象者は、施設に入所する高齢者であった。対象者は施設職員によってRAAに招かれたが、強制参加ではないので、RAAに参加するも拒否するも、対象者の自由であった。同施設でのRAAには、毎回5～10名の入所者が参加した。参加者の多くは、軽度の痴呆症状を呈していた。また、参加者は誰もAIBOを直接見たことはなく、知っていた人もほとんどいなかった。

(2)施設職員：RAA時には、ケアマネージャーや介護スタッフ等、施設職員が随時1～2名参加した。職員らは、対象者のケアを行うとともに、RAA進行を補佐した。

(3)AIBO-Master：筆者らの1人が、「AIBO-Master」としてRAAに参加した。AIBO-Masterは、Kホームにおける RAAのコーディネーターを務めるとともに、RAAプログラムの進行係を兼務した。

結果 筆者らは、上記の方法を用いて、Kホームでの RAA における参加者群の集合的行動の特徴を分析した。

(1)**定量的分析**：KホームでのRAAに関する定量的分析結果については、加藤・渥美・矢守[14]に詳述したため、本稿の考察に関わる範囲での説明に留める。第1セッションと第13セッションの双方において、最も頻出した参加者群の行動パターンは、『AIBOの動き有り、Masterの発声・AIBOへの視線有り、参加者の視線・発声有り、スタッフの発声・視線有り、参加者多し』であった。即ち、『AIBO の動きと共に、参加者群がAIBO を見て会話を行う』という行動パターンが、RAAセッション中に頻出した。

(2)**定性的分析**： 定性的データの分析により、KホームにおけるRAAの全セッションにおいて、参加した3群に、以下のような特徴的な反応を見出すことができた。

①**対象者の反応**：対象者はAIBOに対し、1.愛着反応(5-6名)、2.恐怖反応(1-2名)、3.積極的無視(2-3名)、4.無反応(1名)、の4つの反応を示した。特に「愛着反応」を示した対象者らが、繰り返しRAAに参加した。以下に対象者らの会話の一例を挙げる。これは、RAAプログラム開始後 30 分を過ぎ、テーブル上にあるAIBOが、対象者の方を向いてたたずんでいる様子を見た、対象者らのやり取りである（第 11 セッションのVTR記録より）。

A氏「どっち行こうかなあ」
B氏「もうしんどいねんて」
C氏がテーブルに近づくと、B氏「かみよるで～」
A氏「どうしよ、思案してるわ」
B氏「私や聞こえませんて？」
A氏「Cさんの方が好きやって？そんないじめんといてちょうだい、てね。ははは」

このように、対象者らは、AIBOに「心」があるかのような発言を行い、AIBOの内的状態についての解釈を述べ合った。さらに、対象者らは、その解釈を互いに承認しあうことで共有し、RAAセッション中は、AIBOをめぐる短い「物語」を共同で作り、楽しんだ。

②**職員の対応**：職員らは、参加者の発言を、文脈に即して適切に受け、RAAに関わる「物語」が円滑に進行するよう務めた。以下、RAAプログラム中における、施設職員と入所者との会話の一例で、AIBO-Masterが、ある対象者のひざの上にAIBOを置き、交流を促した際の場面である（第11セッションのVTR記録より）。

施設職員「(AIBOが) Dさんのおひざの上で (笑)」
AIBO-Master「なでてあげてくれます？」
D氏「久しぶりね」(と言いながら、AIBOの頭をなでる)
施設職員「ああ、ほんとだねえ、言うてるわ」
AIBO、「伸び」をする
施設職員「ああ、気持ちいいんだわ～。Dさんのひざの上～」

このように、施設職員は、AIBOの振る舞いに対する対象者の解釈を補佐しつつ、RAAに参加した。また、施設職員らは、AIBO-Masterに対し、RAA中は参加者に積極的に話しかけるとともに、AIBOの挙動の意味を参加者に解説するよう指示した。

③**AIBO-Masterの対応**：職員の指摘を受け、AIBO-Masterは、RAAのプログラム進行だけではなく、状況に即してAIBOの「声優」役を演じ、参加者の「物語」作りの補佐を務めた。以下、AIBOの振る舞いをめぐる、対象者とAIBO-Masterとのやり取りの一部を紹介する。これは、AIBOが首を横に振り、対象者の命令をなかなか聞いてくれなかった際の一場面である（第11セッションのVTR記録より）。

G氏「いやじゃいやじゃ。ほら、知らん顔してる」
AIBO-Master「(微笑みながら) 違う違う、これもう少しみんなにかまってほしいってことですよ」
G氏「ああそうかそうか」(と、AIBOの頭をなでる)。「腕を組んでいきましょう (笑)」
AIBO、座ったまま両手を振る。
G氏「これ何やろ？」
AIBO-Master「『かまってかまって』て」
G氏「ああそうか」(と、AIBOの頭を再度なでる)

このように、AIBO-Masterは、RAAプログラム実施中、単にペット型ロボとの機能説明に終始するのではなく、対象者のAIBOの挙動への解釈を補佐しつつ、対象者とともに、AIBO、及びRAAをめぐる短い物語を作り、楽しんだ。

考察 Kホームでの RAA の事例を検討した結果、RAAプログラムの参加者に、様々な特徴的な行動が観察された。定量的分析の結果、『AIBOの動きと共に、参加者群がAIBOを見て会話を行う』という参加者群

の行動パターンが見出された。また、定性的分析の結果、RAAに繰り返し参加した対象者だけではなく、施設職員やAIBO-Masterらもまた、AIBOの行動に対して繰り返し「心の読み取り」を行い、AIBOやRAAに関わる「物語」を生成する様子が確認された。

Kホームでの RAA において、対象者らは、AIBOの本来の機能そのものではなく、むしろ対象者ら自身が産み出した「物語」[15]を楽しんでいたと考えられる。定性的分析結果でも確認されたように、対象者らは、まず、AIBOの内的状態に言及するような発言を繰り返し、AIBOの「心」の状態を述べ合った。次いで、対象者は、他の対象者によるAIBOの「心」の状態の解釈を聞き、それを「承認」する様子が観察された。AIBOの挙動に対する対象者の解釈は、他の対象者らとともに「共同的に承認」されることによって、RAAをめぐる「物語」として成立することとなったと考えられる。加えて重要なのは、施設職員、AIBO-Masterを含む参加者全員が、AIBOの挙動に関する解釈の「共同的承認」[12]に関わり、RAAに関する「物語」が共同で構築されていったことであろう。KホームでのRAAでは、RAAに関わった参加者全員が、AIBO・RAAをめぐって「心の読み取り－解釈の他者による承認－物語の生成」という相互行為を行っていた、と考えられる。

本研究の結果、RAAという、ロボットと人との交流場面において、参加者間に「心の読み取り－解釈の他者による承認－物語の生成」という一連のプロセスがあることが確認された。以上の知見から、RAA研究、および実践について、次のような示唆が得られると考えられる。RAA研究への示唆として、RAAに関わる集団全体を捉える視点の重要性が挙げられる。RAA研究では、ともすれば対象者の変化のみが取り上げられがちである。しかし、本研究の知見より、ロボットの挙動をめぐり、RAAの参加者全員が様々な相互行為を行っていることが確認された。RAAを研究する際には、それが実施される集団全体を視野に入れて検討しうる研究手法が有効であると言えよう。

RAAの実践に対する示唆として、「物語の共同承認者」の重要性が挙げられよう。「ロボット」を媒介として形成されるRAAにおいては、しばしば、ロボットが主役として取り上げられ、ともすれば、その性能の向上のみに注目が集まってしまいがちである。しかし、RAA実践においては、ロボットの挙動への解釈を「共同的に承認」してくれる人の存在こそが肝要である。つまり、RAAの実践においては、ロボットのみならず、RAAに関わる「物語」の「共同承認者」の存在もまた不可欠であることが示唆されよう。

参考文献

[1] 横山章光：アニマル･セラピーとは何か，NHKブックス（1996）

[2] 横山章光：ロボットを活用した精神医療の可能性：アニマルセラピーの視点から，最新精神医学，Vol.7，No.5，pp.439-447.（2002）

[3] 横山章光・玉井伸哉・太田清利ら：小児病棟における4足歩行型ロボット（AIBO）によるRAA（ロボット介在活動）の試行，人と動物の関係学会第7回学術大会予稿集，p.40.（2001）

[4] Wada, K., Shibata, T., Saito, T., & Tanie, K.: Psychological and Social Effects to Elderly People by Robot Assisted Activity at a Health Service Facility for the Aged, SCIS & ISIS 2002.（2002）

[5] 佐部浩太郎・藤田雅博：エンターテインメントロボットの商品化，日本ロボット学会誌，Vol.18，No.2，pp.185-187.（2000）

[6] 藤崎亜由子：人はペット動物の「心」をどう理解するか－イヌ・ネコへの言葉かけの分析から 発達心理学研究，Vol.13，No.2，pp.109-121.（2002）

[7] Braitenberg, V.: Vehicles: Experiments in synthetic psychology, Kunstliche Wesen.（1984）加地大介 訳 模型は心を持ちうるか：人工知能・認知科学・脳生理学の焦点，哲学書房（1987）

[8] Turing, A. M.: Computing machinery and intelligence. Mind, Vol.59, pp.433-460.（1950）

[9] Weizenbaum, J.: Computer power and human reason: From judgment to calculation. W.H. Freeman.（1976）秋葉忠利 訳 コンピュータ・パワー：人工知能と人間の理性，サイマル出版会（1979）

[10] 上野直樹・西坂 仰：インタラクション：人工知能と心，大修館書店（2000）

[11] 浅野智彦：自己への物語論的接近，勁草書房（2001）

[12] 麻生 武：ファンタジーと現実，金子書房（1996）

[13] 渥美公秀・加藤謙介・矢守克也：ペット型ロボットを用いた活動に対するグループ・ダイナミックス的考察(1)：VTR分析手法の開発，日本心理学会第67回大会（2003）

[14] 加藤謙介・渥美公秀・矢守克也：ペット型ロボットを用いた活動に対するグループ・ダイナミックス的考察(2)：有料老人ホームにおけるRAAに対するVTR分析，日本心理学会第67回大会（2003）

[15] 野口裕二：物語としてのケア：ナラティヴ・アプローチの世界へ，医学書院（2002）

連絡先

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘1-2

大阪大学大学院人間科学研究科 ボランティア人間科学講座

加藤 謙介

Phone & Fax：06-6879-8064／E-mail：DZL02550@nifty.ne.jp

線形クラスタリングによる境界線抽出
Boundary detection by linear fuzzy clustering

藤井 太郎, 本多 克宏, 市橋 秀友
Taro FUJII, Katsuhiro HONDA, Hidetomo ICHIHASHI
大阪府立大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract : Boundary detection forms an important preprocessing of object shape recognition. In this paper, robust linear fuzzy clustering technique is applied to the detection of straight lines in noisy digital images. The robust clustering algorithm is based on least absolute deviations and performs segmentation of edge and fitting of lines simultaneously.

1. はじめに

画像認識のプロセスにおいては，図形や物体の境界点を抽出し，それらから物体の形状を記述しようとする前処理がしばしば行われる．本論文では，画像のフィルタリング処理によりエッジが強調された2値画像が得られた場合に，物体の輪郭の一部をなす局所的な直線を抽出する問題を考える．2次元画像からノイズに埋もれた直線構造を抽出する手法としては，ハフ変換 [1] などさまざまな手法が提案されているが，データ集合の局所的な線形構造をとらえる線形ファジィクラスタリング手法も，クラスタリング基準として絶対値誤差を用いることで，プロトタイプとしてノイズの影響を無視したロバストな超平面を抽出できることから [2]，ここでは2次元の2値画像からの境界線抽出に応用することを試みる．

2. 線形クラスタリングによる直線の抽出

画像中の n 個のエッジ候補点の2次元座標 $\boldsymbol{x}_i = (x_{i1}, x_{i2})$，$i = 1, \cdots, n$ が与えられたときに，n 個のデータ点を C 個のクラスターに分割しながら，クラスターごとに局所的な直線構造を抽出することを考える．ノイズの影響を無視しながらロバストな線形クラスタリングを行うために，本多ら [2] は最小絶対誤差に基づく線形ファジィクラスタリング法を提案している．ここでは，画像からの輪郭線の抽出を考えて，第 c クラスターのプロトタイプとなる直線が，長さが1のマイナー成分ベクトル（法線ベクトル）$\boldsymbol{a}_{cm}$ およびクラスター中心 $\boldsymbol{b}_c$ を用いて表されるとし，ロバストな線形構造の抽出問題を以下の最小化問題に定式化する．

Minimization Problem LAD

$$\min \quad \sum_{c=1}^{C}\sum_{i=1}^{n}\{u_{ci}|\boldsymbol{a}_{cm}^{\top}(\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{b}_c)| + \lambda u_{ci}\log u_{ci}\} \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{c=1}^{C} u_{ci} = 1 \qquad ; i = 1, \cdots, n \tag{2}$$

$$a_{cm1}^2 + a_{cm2}^2 = 1 \qquad ; c = 1, \cdots, C \tag{3}$$

ただし，u_{ci} が第 i データ点の第 c クラスターへの帰属度（メンバシップ）を表す．エントロピー項はメンバシップのファジィ化のために用いられたもので，λ がファジィ度を調節する [3]．最適解を求める際には，交互最適化の定理に基づく繰り返しアルゴリズムが用いられる．

まず，クラスターごとの局所的なマイナー成分ベクトルの更新法を求めるために，メンバシップ u_{ci} とクラスター中心 $\boldsymbol{b}_c$ が暫時既知として，以下の最小化問題を考える．

Minimization Problem ACM

$$\min \quad \sum_{i=1}^{n} u_{ci}|\boldsymbol{a}_{cm}^{\top}(\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{b}_c)| \tag{4}$$

$$\text{s.t.} \quad a_{cm1}^2 + a_{cm2}^2 = 1 \tag{5}$$

(4) 式を最小とするプロトタイプは必ずいずれかのサンプルデータ点を通ることから，局所的なマイナー成分ベクトルを求める問題は目的関数が最小となるときに直線が通るサンプルデータ点を探索する問題に帰着される．そして，最小絶対誤差に基づく局所的なマイナー成分ベクトルは，選ばれたサンプルデータ点とクラスター中心を通る直線の法線ベクトルとして求められる．

次に，クラスターごとに中心 $\boldsymbol{b}_c$ の更新則を求めるために，u_{ci} および $\boldsymbol{a}_{cm}$ が暫時既知の条件の下で以下の目的関数の最小化を考える．

$$J_c(\boldsymbol{b}_c) = \sum_{i=1}^{n} u_{ci}|\boldsymbol{a}_{cm}^{\top}(\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{b}_c)| \tag{6}$$

ここで，(6) 式は $\boldsymbol{a}_{cm}$ に射影されたデータの絶対値距離の和であるので，$\boldsymbol{a}_{cm}$ を基底ベクトルとする 1 次元空間に射影されたデータの l_1 距離の和であるととらえられる．したがって，最適な直線は $\boldsymbol{a}_{cm}^{\top}\boldsymbol{x}_i,\ i=1,\cdots,n$ のメディアン（中央値）に対応するデータ点を通る．唯一のクラスター中心を求めるために，以下の更新法を考える．$\boldsymbol{a}_{cm}$ を第 1 基底ベクトルとする正規直交系を張る基底ベクトルを $\boldsymbol{v}_1, \boldsymbol{v}_2$ とすると，作成した正規直交系におけるクラスターの中心の第 j 成分は ${\boldsymbol{v}_j}^{\top}\boldsymbol{x}_1,\cdots,{\boldsymbol{v}_j}^{\top}\boldsymbol{x}_n$ の少なくとも一つの点の第 j 成分に等しくなることから，関数 $q(k), k=1,\cdots,n$ により添え字が

$$ {\boldsymbol{v}_j}^{\top}\boldsymbol{x}_{q(1)} \leq {\boldsymbol{v}_j}^{\top}\boldsymbol{x}_{q(2)} \leq \cdots \leq {\boldsymbol{v}_j}^{\top}\boldsymbol{x}_{q(n)} \qquad (7) $$

を満たすように変換されたとすると，各軸ごとにメンバシップを考慮しながら ${\boldsymbol{v}_j}^{\top}\boldsymbol{x}_{q(k)}$ のメディアン（中央値）を探索し，メディアンに対応する $\boldsymbol{x}_{q(k)}$ を通るように，クラスター中心を $\boldsymbol{v}_j$ が示す方向に順次平行移動させる．

また，メンバシップの更新則は，ラグランジュの未定乗数法により，以下のように求められる．

$$ u_{ci} = \frac{\exp(-\lambda^{-1}|\boldsymbol{a}_{cm}^{\top}(\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{b}_c)|)}{\sum_{l=1}^{C}\exp(-\lambda^{-1}|\boldsymbol{a}_{lm}^{\top}(\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{b}_l)|)} \qquad (8) $$

$\boldsymbol{a}_{cm}$，$\boldsymbol{b}_c$ および u_{ci} を交互最適化の原理に基づいて収束するまで繰り返し更新することにより，最適解が求められる．

3. 輪郭線の抽出実験

最小絶対誤差を用いる線形ファジィクラスタリング法により実画像から物体の輪郭線を抽出する実験を行った．160 × 160 ピクセルからなる図 1 の画像から，フィルタ処理によりエッジを強調した 2 値画像をつくり，その画像からエッジとみなされるピクセルの座標値を抽出して分析用データを作成した．ただし，分析用データは平均 0 分散 1 に正規化する前処理を行った．図 2 に散布図を示す．クラスター数を 7 として，最小絶対誤差に基づくクラスタリングを行うことにより得られたプロトタイプを図 3 に示す．おのおののプロトタイプがエッジに対応する直線をとらえられている．このように，ロバストな線形ファジィクラスタリング法により区分的な輪郭線を抽出できることが分かる．

4. おわりに

本論文では，エッジを強調した 2 値画像から物体の輪郭線を抽出する問題に，ロバストな線形ファジィクラスタリング法を応用した．実画像を用いた実験を通して，最小絶対誤差に基づく目的関数により，ノイズの影響を無視しながら画像中の直線構造をとらえられることを示した．ただし，最適なクラスター数を事前に与える必要があることから，クラスター数決定のための指標の作成が今後の課題である．

図 1: 元の画像

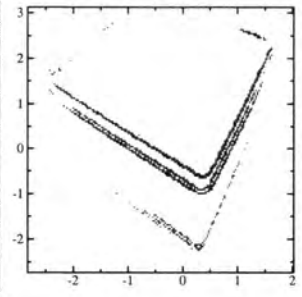


図 2: エッジ強調した画像

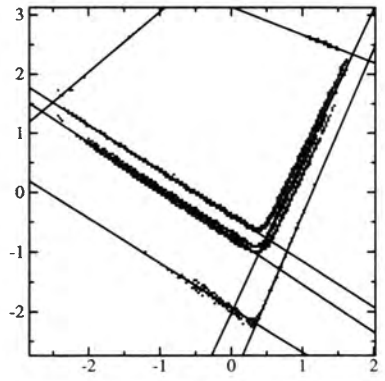


図 3: 線形クラスタリングにより得られたプロトタイプ

参考文献

[1] 梅田三千雄: ハフ変換; 日本ファジィ学会誌, Vol.81, No.2, pp. 229-233 (1996)

[2] 本多克宏, 東江伸浩, 市橋秀友: 最小絶対誤差に基づく線形ファジークラスタリング; 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J86-D-II, No.1, pp. 12-21 (2003)

[3] 宮本定明:クラスター分析入門，森北出版 (1999)

連絡先

〒 599-8531 大阪府堺市学園町 1-1

大阪府立大学大学院工学研究科　　本多 克宏

TEL: 072-254-9355　FAX: 072-254-9915

E–mail: honda@ie.osakafu-u.ac.jp

クラスタリングを用いた視覚的コンテンツ推薦システムの開発

Visual contents recommender using fuzzy clustering

倉田 勝之, 本多 克宏, 市橋 秀友
Katsuyuki KURATA, Katsuhiro HONDA, Hidetomo ICHIHASHI
大阪府立大学大学院工学研究科
Graduate school of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract : This paper introduces a visual contents recommender based on local linear models derived by fuzzy clustering. The system provides not only the list of contents to be recommended but also 3-D feature space in whish users can search other selections intuitively.

1. はじめに

インターネットをはじめとした情報収集システムの発展に伴い，ユーザのニーズにあったコンテンツを探索することが困難となりつつある今日，システムの側からユーザのニーズにあった情報を選別する情報フィルタリング技術の開発が望まれている [1] [2].

本研究では，局所的な線形モデルを用いた欠測値推定による対象ユーザへの推薦コンテンツの選定と，コンテンツ間の類似度を考慮した他の選択肢となりうるコンテンツの能動的な探索を同時に行うことができるシステムを開発する．提案システムは欠測値を含む不完全データのための線形クラスタリング法 [3] に基づくもので，推薦されるコンテンツを示すと同時に，3次元特徴空間における他の選択肢の配置を表示することで，視覚的な探索を可能とする．

2. 局所的主成分分析と欠測値の推定

m 次元の n 個の標本データからなる $(n \times m)$ データ行列 $X = (x_{ij})$ が与えられたときに，n 個の標本データを C 個のクラスターに分割しながら，クラスターごとに p 本の主成分ベクトルを求める問題を考える．FCV 法の目的関数はデータ点と線形多様体との距離により定義されるが，主成分分析で用いられる最小2乗基準にメンバシップ u_{ci} を導入することにより，以下のように定義することができる．

$$\varphi = \sum_{c=1}^{C} \mathrm{tr}\Big\{(X - Y_c)^T U_c^{\theta} (X - Y_c)\Big\} \tag{1}$$

ただし $U_c = \mathrm{diag}(u_{c1}, \cdots u_{cn})$ であり，tr は行列の対角要素の和（トレース）を表す．$Y_c = (y_{cij})$ は第 c クラスターにおけるデータ行列 X の低階数近似行列を表し，$Y_c = F_c A_c^T + \mathbf{1}_n b_c^T$ である．ここで，$F_c = (f_{cik})$ は $(n \times p)$ の成分得点行列，$A_c = (a_{cij})$ は主成分ベクトルを並べた $(m \times p)$ の主成分行列である．また，$\mathbf{1}_n$ はすべての要素が 1 の n 次元ベクトルである．

本多ら [3] は，最小2乗基準を用いた局所的な主成分分析法を，欠測値を含む不完全データに拡張することにより，欠測値を含むデータからの局所的な主成分の抽出法を提案した．エントロピー正則化 [4] を考慮することにより，欠測値を含むデータの楕円体クラスタリング法の目的関数は，以下のように定義される．

$$\begin{aligned} L \;=\; & \sum_{c=1}^{C}\sum_{i=1}^{n} u_{ci} \sum_{j=1}^{m} d_{ij}\Big\{\alpha(x_{ij} - \sum_{k=1}^{p} f_{cik} a_{cik} \\ & - b_{cj})^2 + (1-\alpha)(x_{ij} - b_{cj})^2\Big\} \\ & + \beta \sum_{c=1}^{C}\sum_{i=1}^{n} u_{ci} \log u_{ci} \end{aligned} \tag{2}$$

ここで，d_{ij} はデータ x_{ij} が観測されている場合には1，欠測している場合には0をとる2値変量であり，(2) 式の第1項目は局所的な主成分分析のための項である．第2項目は FCM 法のための項である．第3項目はエントロピー項で，ファジィ分割を得るための項である．また，α は主成分分析とクラスタリングの優先度合いを示す定数であり，β はクラスタリングのファジィ度を決定する定数である．唯一の解を得るために，

$$F_c^T U_c F_c = I \quad ;c = 1, \cdots, C \tag{3}$$

$$F_c^T U_c \mathbf{1}_n = O \quad ;c = 1, \cdots, C \tag{4}$$

$$\sum_{c=1}^{C} u_{ci} = 1 \quad ;i = 1, \cdots, n \tag{5}$$

および，$A_c^{\top} A_c$ が対角行列となる制約が付加される．

一旦，局所的な線形モデルが推定されると，メンバシップが最大となるクラスターを当該ユーザの所属クラスターとし，X の欠測値に対応する Y_c の要素を用いて予測が可能となる．また，クラスターごとの主成分行列の行方向の要素を低次元特徴空間でのコンテンツの座標ととらえることにより，対象ユーザの近傍における探索空間を作成する．

3. コンテンツ探索システム

2章で述べた手法を用いてコンテンツ探索システムを開発した．150人の学生に，70タイトルの映画に対してどの程度面白かったかを「1〜5点」または「見ていない」（欠測値）で評価してもらうアンケート調査を行い，アンケートの結果をトレーニングデータ X とした．システム上でユーザの映画の評価を入力すると，欠測値を予測し，予測値の大きいものから推薦される

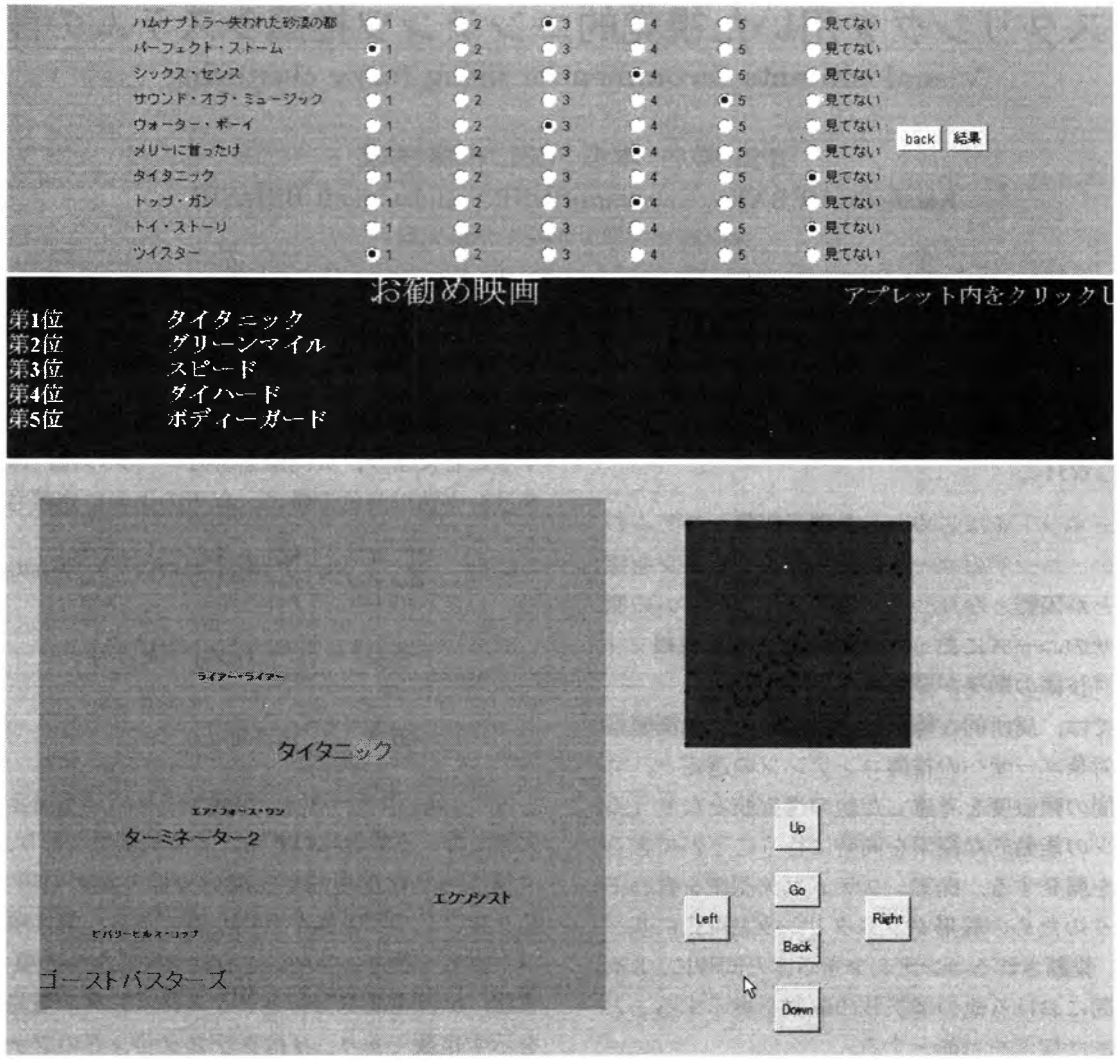


図 1: 視覚的コンテンツ探索システム

コンテンツとして提示される．さらに主成分得点を低次元空間でのコンテンツの座標ととらえることにより，3 次元空間にコンテンツを配置した．ユーザは布置を眺めることによって，コンテンツの相関を直感的に理解でき，コンテンツ間の類似度を考慮した他の選択肢となりうるコンテンツの能動的な探索を行うことができる．

図 1 の右の小窓は 3 次元空間を上から見たもので，横軸を x_1，縦軸を x_2 として表示している．左の窓は，進行方向に垂直な直線と x_3 軸で張られる平面にデータ点を射影した図である．右側のボタンを操作することで，3 次元空間を視覚的に探索することができる．

4. おわりに

本論文では予測値に基づいてコンテンツを推薦すると同時に，コンテンツを 3 次元空間に配置し，自ら探索することで，“楽しさ”と共に，コンテンツ間の類似度を考慮した他の選択肢を提供するシステムを開発した．操作性の向上が今後の課題である．

参考文献

[1] 森田昌宏，速水治夫: “情報フィルタリングシステム情報洪水への処方箋”，情報処理，Vol.37, No.8, pp.751-757 (1996)

[2] J.L. Herlocker, J.A. Konstan, A.Borchers and J. Riedl: “An Algorithmic Framework for Performing Collaborative Filtering”, *Proc. of the 1999 Conference on Research and Development in Information Retrieval* (1999)

[3] 本多克宏，杉浦伸和，市橋秀友，荒木昭一，九津見洋 : “最小 2 乗基準を用いた Fuzzy c-Varieties 法における欠測値の処理法，”日本ファジィ学会誌，Vol.13, No.6, pp.680-688 (2001)

[4] 宮本定明: クラスター分析入門, 森北出版 (1999)

連絡先

〒 599-8531　大阪府堺市学園町 1-1

大阪府立大学大学院工学研究科　本多 克宏

TEL: 072-254-9355　FAX: 072-254-9915

E-mail: honda@ie.osakafu-u.ac.jp

概念ファジイ集合の自動構築およびフィルタリングシステムへの応用

Automatic Construction of Conceptual Fuzzy Sets and Application to a Filtering System

新村 昭好 Akiyoshi Shimmura　村井 創 Hajime Murai　丸田 央* Akira Maruta　高木 友博 Tomohiro Takagi

明治大学理工学部情報科学科
Department of Computer Science, Meiji University

Abstract: In this study, we propose a RBF(radial basis function) based method to build CFSs(conceptual fuzzy sets), and evaluate the proposed method by applying it to a large scale text filtering problem. The method comprises a words clustering step performed by k-means algorithm and a user profile adaptation step by Rocchio method. TREC8 and TREC2002 data set was used to evaluate the filtering system and experimental results showed that the system improved filtering performance.

1 はじめに

本論文では，新しい大規模な概念辞書構築，及び概念拡張手法を提案する．また，情報フィルタリングシステムに上記手法を用いることによりその有用性を示す．

情報検索などの研究分野では検索の精度を向上させるために，クエリや文書の持つキーワードを拡張することが多い．しかし，キーワード拡張にはシソーラスのような語の上位・下位概念や類似関係，連想関係などが整理されている辞書を用いなくてはならない．ところが，現実には語は上位・下位関係がはっきりせず，これらを正確に定義することは不可能である．また，共起情報等の，類似関係で整理されている辞書を用いる場合でも，文脈に依存した拡張をしていないという問題がある．そこで単語間の様々な関係によりのファジィ集合を生成することを目的に，単語間に上位概念・下位概念を持たず，文脈依存が可能な概念辞書を構築する．我々はコーパスから概念を抽出し，その概念と単語との関連度をニューラルネットワークで表現することで概念辞書の自動構築を行った．

また，構築した概念辞書の有効性を示すために，情報フィルタリングシステムに概念辞書を組み込んだ．概念辞書を組み込んだ場合と組み込まない場合の精度を比較することによって概念辞書の有効性を示す．

2 概念ファジイ集合

概念ファジイ集合(Conceptual Fuzzy Sets:CFSs)は，曖昧な言葉の概念(意味)を他の言葉によって形成されるファジィ集合で表現するという手法である．また，CFSs では単語の意味表現を状況に応じて動的に変化させることができる．

例えば，"java"という単語はプログラム言語やコーヒー，島の名前などいくつかの意味を持っている．"java"は，"fortran"と同じ文脈に出現することによってプログラム言語の意味を指す．また，"mocha"と同じ文脈に出現することでコーヒーの意味を指す．このように，"fortran"や"mocha"といった周囲の状況により，"java"の概念は動的に変化する．

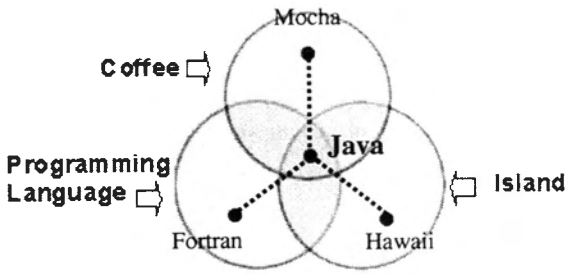


図1 CFS 概念の例

これまで CFSs の実現には単語をノードとしたBAMs や Hopfield といった連想ネットワークモデルが用いられてきた．しかし，これらのモデルには，上位概念・下位概念を定義しなくてはならないこと(BAMs)，学習した記憶が排他的に想起されてしまう(Hopfeild)などの問題点があった．

そこで本研究では，新たなモデルとして，上位・下位概念を定義する必要がない，RBF(Radial Basis Function)ネットワークを用いたモデルを提案する．RBFネットワークは概念を捉え，その概念を他ノードに活性伝播することで文脈依存した拡張が可能である．

3 RBF ネットワークを用いた CFSs の実現

3.1 RBF ネットワーク

RBF(Radial Basis Function)ネットワークモデルを図2に示す．

*現在，凸版印刷株式会社に所属

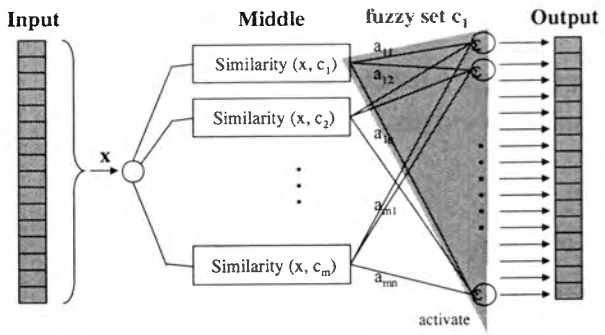


図2 RBF ネットワーク

RBF ネットワークでは，中間層の基底関数を線形結合することによってネットワークの出力を計算する．以下に一般的な RBF ネットワークの計算方法を示す．

1) 中間層の出力

中間層であらかじめ定義された中心ベクトル c_i と入力ベクトル x との類似度を式 1，2 によって計算し，x と c_i とのユーグリッドノルムを引数としたガウス関数を出力する．

$$\text{Similarity}(x, c_i) = \phi(\|x - c_i\|) \quad \text{(式 1)}$$

$$\phi(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma^2}\right) \quad \text{(式 2)}$$

ガウス関数のような単調減少関数を通すことで，x に近い c_i のみが大きな値を出力する．

2) 出力層の出力

中間層の出力に重み a_{ij} を掛けたものを加え合わせた値を式 3 によって出力する．

$$f_j(x) = \sum_i^M a_{ij} \times \text{Similarity}(x, c_i) \quad \text{(式 3)}$$

ここで，f_j は出力層のベクトル j 番目の要素の出力である．

また，RBF ネットワークの学習方法として，J. Moody と C. Darken により提案されている，クラスタリングに基づくユニットの配置と教師データに基づき重みを求めるハイブリッド法[2]を利用した．

3.2 概念拡張

我々は RBF ネットワークを用いることにより，CFSs に基づく概念辞書を構築する．RBF モデルの概念辞書では，概念認識フェーズと概念拡張フェーズを経て拡張を行う．

まず，中間層の中心ベクトル c_i と入力ベクトル x の類似度を計算することにより入力に近い概念を認識する(概念認識フェーズ)．次に，中間層で認識した概念から関連する単語へ重みを伝播することにより概念拡張を行う(概念拡張フェーズ)．

概念認識フェーズでは，入力に関連するいくつかの細かい概念を認識する．このことにより，概念拡張フェーズでは認識した細かい概念を組み合わせることで動的な概念拡張を行うことができる．

3.3 基底関数

RBF ネットワークにおいて基底関数は一般的にガウス関数が用いられている．基底関数は関連する概念にフォーカスを当てるための重要な関数となる．

しかし，ベクトルの次元数が大きくなるとガウス関数では，パラメータをどのように設定しても，中間層のどのノードも同じように活性化してしまうという問題にぶつかり，どれが入力に近い概念であるか判断できない．各ノードの活性値の差を明確化するためには次の 2 つの計算方法が考えられる．一つは基底関数にシグモイド関数を使う方法，もう一つは中間層のベクトル c_i と入力ベクトル x との類似度を Cosine Measure で計算する方法である．

1) 基底関数にシグモイド関数を適用する場合：

$$\phi(r) = \frac{1}{1 + e^{\alpha(r-\theta)}} \quad \text{(式 4)}$$

Similarity(x , c_i)は式 1 と同様に計算する．

シグモイド関数を使用する場合，式 4 において，傾き(ゲイン)のパラメータ α と閾値のパラメータ θ の値を動的に決定する．

2) ユニットの活性値出力に Cosine Measure を適用する場合：

$$\text{Similarity}(x, c_i) = \frac{x \cdot c_i}{\| x \| \| c_i \|} \quad \text{(式 5)}$$

この手法は，ベクトル空間モデルにおいてベクトル同士の類似度を比較するときにもっともよく使われている手法である．

3.4 概念辞書の自動構築

本研究では RBF ネットワークを用いて，概念辞書の自動構築を行った．辞書の学習は J. Moody と C. Darken のハイブリッド学習法[2]に基づいて行った．

まず，中間層のベクトルを決定するために文書のクラスタリングを行った．文書のクラスタリングには K-means を使用した．クラスタリングの対象は TREC-8 の Filtering Track で使用した約 21 万の英文ニュース記事である．生成された各クラスタは何らかの概念を持っていると考えられる．そこで，各クラスタの中心ベクトルを中心概念と呼ぶことにする．

次に生成した中心概念を RBF ネットワークの中間層のベクトルとし，中間層-出力層間の重みを教師データに基づく学習を行う．学習は最小二乗誤差法により行う．教師データは TREC-8 からある文書に対して割り当てられたトピックを利用して生成した．図 3 に学習の流れを示す．

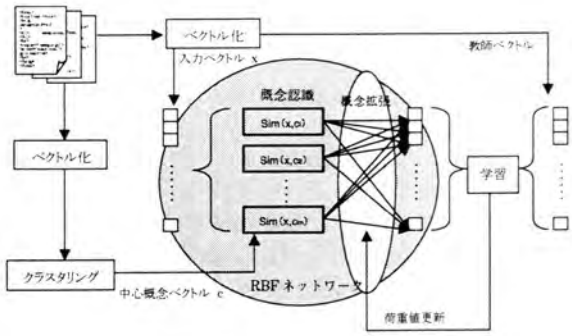


図3 RBF ネットワークの重み学習

4 フィルタリングシステム

4.1 システム概要

システムの概要を図 4 に示す. システムでは, ユーザの要求するトピックを示すプロファイルを作成する. 初期プロファイルは, トピックに関連する文書をベクトル化し, そのベクトルを概念拡張することで作成する. システムに入力文書が与えられると, 入力文書をベクトル変換して概念拡張を行う. その概念拡張したベクトルとプロファイルの類似度を Cosine measure で比較し, 閾値以上であればユーザに入力文書を提示する.

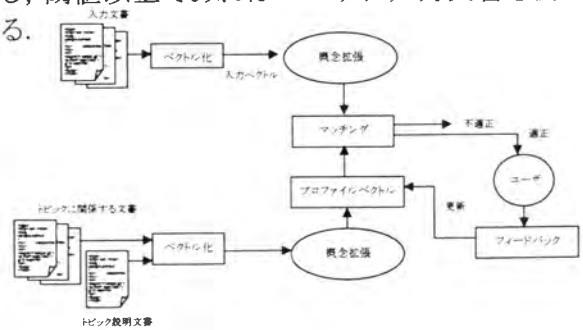


図 4 フィルタリングシステムの概要

以下に, 文書をベクトル変換する処理及び, ユーザからのフィードバックをプロファイルの修正に利用する手法について述べる.

4.2 ワードベクトル変換処理

文字列で生成される文書をワードベクトルに変換するために次の 4 つの処理を行う

1) 単語毎に分割
2) ストップワード削除
3) 語幹抽出
4) 単語の重み付け

ストップワードの削除には SMART システムで採用されている不用語リストを用い[3], 語幹抽出には Porter アルゴリズムを用いた[4]. 単語の重み付けは TF-IDF 法を用いた.

4.3 適合性フィードバック

適合性フィードバック手法には Rocchio[6]を用いる. プロファイルベクトルは概念拡張したベクトルであるため, ユーザが適正であると判断した文書を概念拡張したベクトルを d_R, また不適正だと判断した文書を概念拡張したベクトルを d_N とするとき, プロファイルベクトル q を式 6 で修正する.

$$q' = \alpha q + \beta d_R - \gamma d_N \qquad (式 6$$

5 評価実験

5.1 実験内容

提案システムに TREC*2002 Filtering Track で与えられたニュース文書の一部(37,555 文書)を入力し, その評価を判定する.

比較対象としてシステムに概念拡張を用いた場合(Sigmoid 関数と Cosine 尺度を用いた場合の 2 パターン)と概念拡張を加えない, TF-IDF によるワードベクトルを用いた場合の 3 種類のパターンと, その 3 パターンそれぞれにおいて, 構築した概念辞書の中心概念数・ワード次元数をともに 500・25,220, 700・13,046, 1000・13,046 と変化させた 3 パターン, 合計 9 パターンの実験を行った.

5.2 実験結果と考察

上記の通り, 中心概念数・ワード次元数と概念拡張の手段の違いによる, 9 パターンのフィルタリング結果を表 1, 表 2, 表 3 で示す

表 1 中心概念 500・ワード次元数 25,220 結果

	Sigmoid	Cosine 尺度	TF-IDF
分類成功	3524	5487	3985
誤分類	10001	15325	7238
適合率	0.471564	0.73423	0.533253
再現率	0.260555	0.263646	0.355074
F-尺度	0.335351	0.387979	0.426294

表 2 中心概念 700・ワード次元数 13,046 結果

	Sigmoid	Cosine 尺度	TF-IDF
分類成功	4562	4765	4192
誤分類	6109	10236	8208
適合率	0.610464	0.637628	0.560953
再現率	0.427514	0.317645	0.338065
F-尺度	0.502866	0.424755	0.421879

表 3 中心概念 1000・ワード次元数 13,046 結果

	Sigmoid	Cosine 尺度	TF-IDF
分類成功	4195	4256	4192
誤分類	5274	8703	8208
適合率	0.561354	0.596516	0.560953
再現率	0.443025	0.328421	0.338065
F-尺度	0.495219	0.416603	0.421879

*TREC (Text REtrieval Conference)とは, テキスト検索方法論の大規模評価に必要なインフラストラクチャを提供し, 情報検索コミュニティー内の研究の支援を目的とするワークショップ.

概念ファジイ集合の自動構築およびフィルタリングシステムへの応用

Automatic Construction of Conceptual Fuzzy Sets and Application to a Filtering System

新村 昭好 Akiyoshi Shimmura　村井 創 Hajime Murai　丸田 央* Akira Maruta　高木 友博 Tomohiro Takagi

明治大学理工学部情報科学科
Department of Computer Science, Meiji University

Abstract: In this study, we propose a RBF(radial basis function) based method to build CFSs(conceptual fuzzy sets), and evaluate the proposed method by applying it to a large scale text filtering problem. The method comprises a words clustering step performed by k-means algorithm and a user profile adaptation step by Rocchio method. TREC8 and TREC2002 data set was used to evaluate the filtering system and experimental results showed that the system improved filtering performance.

1 はじめに

本論文では，新しい大規模な概念辞書構築，及び概念拡張手法を提案する．また，情報フィルタリングシステムに上記手法を用いることによりその有用性を示す．

情報検索などの研究分野では検索の精度を向上させるために，クエリや文書の持つキーワードを拡張することが多い．しかし，キーワード拡張にはシソーラスのような語の上位・下位概念や類似関係，連想関係などが整理されている辞書を用いなくてはならない．ところが，現実には語は上位・下位関係がはっきりせず，これらを正確に定義することは不可能である．また，共起情報等の，類似関係で整理されている辞書を用いる場合でも，文脈に依存した拡張をしていないという問題がある．そこで単語間の様々な関係によりのファジィ集合を生成することを目的に，単語間に上位概念・下位概念を持たず，文脈依存が可能な概念辞書を構築する．我々はコーパスから概念を抽出し，その概念と単語との関連度をニューラルネットワークで表現することで概念辞書の自動構築を行った．

また，構築した概念辞書の有効性を示すために，情報フィルタリングシステムに概念辞書を組み込んだ．概念辞書を組み込んだ場合と組み込まない場合の精度を比較することによって概念辞書の有効性を示す．

2 概念ファジイ集合

概念ファジイ集合(Conceptual Fuzzy Sets:CFSs)は，曖昧な言葉の概念(意味)を他の言葉によって形成されるファジィ集合で表現するという手法である．また，CFSs では単語の意味表現を状況に応じて動的に変化させることができる．

例えば，"java"という単語はプログラム言語やコーヒー，島の名前などいくつかの意味を持っている．"java"は，"fortran"と同じ文脈に出現することによってプログラム言語の意味を指す．また，"mocha"と同じ文脈に出現することでコーヒーの意味を指す．このように，"fortran"や"mocha"といった周囲の状況により，"java"の概念は動的に変化する．

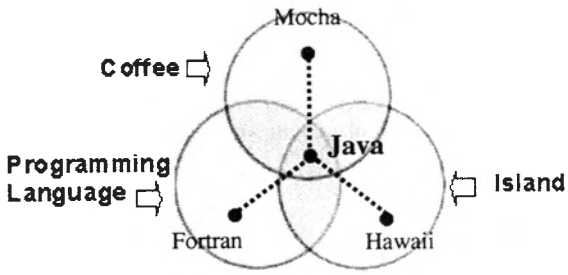


図1 CFS 概念の例

これまで CFSs の実現には単語をノードとしたBAMs や Hopfield といった連想ネットワークモデルが用いられてきた．しかし，これらのモデルには，上位概念・下位概念を定義しなくてはならないこと(BAMs)，学習した記憶が排他的に想起されてしまう(Hopfeild)などの問題点があった．

そこで本研究では，新たなモデルとして，上位・下位概念を定義する必要がない，RBF(Radial Basis Function)ネットワークを用いたモデルを提案する．RBFネットワークは概念を捉え，その概念を他ノードに活性伝播することで文脈依存した拡張が可能である．

3 RBF ネットワークを用いた CFSs の実現

3.1 RBF ネットワーク

RBF(Radial Basis Function)ネットワークモデルを図2に示す．

*現在，凸版印刷株式会社に所属

外的基準がある場合の局所的な独立成分分析

Local independent component analysis with external criteria

下村 直也, 本多 克宏, 市橋 秀友
Naoya SHIMOMURA ,Katsuhiro HONDA, Hidetomo ICHIHASHI
大阪府立大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract : This paper proposes a technique of local independent component analysis which extracts independent components uncorrelated to some external criteria. Local independent components are extracted by Fuzzy Fast ICA algorithm after the preprocessing by local principal component analysis with external criteria in which the effects of the external criteria are removed from the fuzzy scatter matrices using Fuzzy c-Regression Models (FCRM).

1. はじめに

大規模な多変量データから高次の統計量を用いて潜在的な特性を抽出するために，データ集合の部分構造を考慮した局所的な独立成分の抽出法が提案されている [1]．この方法では，ICA アルゴリズムの前処理に線形ファジィクラスタリング法を応用し，得られた局所的な主成分とメンバシップを考慮した Fuzzy Fast ICA アルゴリズムにより局所的な主成分を抽出する．しかし，実データの分析においては，結果がある支配的な要因の影響を強く受けたために自明な特性しか得られないことがある．そこで本研究では，支配的な外的基準の存在を仮定し，データ行列からそれらの影響を取り除きながら局所的な独立成分を抽出する方法を提案する．

2. 外的基準を考慮した局所的な主成分の抽出法

m 次元の n 個の標本データからなるデータ行列 Y からクラスターごとに s 個の外的基準 $x_1, \cdots, x_s$ の影響を取り除いた主成分の抽出を行うために，クラスターと回帰の同時分析を用いて Y を外的基準で説明できる要因とできない要因に分解することを考える [2]．主成分を抽出することを考慮して，クラスターごとに各変量の平均が 0 になるように $y_{cki} = y_{ki} - v^y_{ci}$, $x_{ckj} = x_{kj} - v^x_{cj}$ とする．ただし v^y_{ci}, v^x_{cj} はクラスター c の中心を表す．以下の目的関数の最小化問題を考える．

$$L = \sum_{c=1}^{C}\sum_{i=1}^{t}\sum_{k=1}^{n} u_{ck}\{y_{cki} - \sum_{j=1}^{s} x_{ckj} b_{cji}\}^2 + T_0 \sum_{k=1}^{n}\sum_{c=1}^{C} u_{ck} \log u_{ck} \quad (1)$$

ただし，u_{ck} はデータ k のクラスター c への帰属度合を示すメンバシップであり，c に関する和が 1 となる制約が付加される．L の第 1 項目はクラスターごとの回帰分析のための項である．第 2 項目はエントロピー正則化 [3] を用いた項で，メンバシップが $\{0,1\}$ にならないように制御する項である．ここで，$Y_c = \{y_{cki}\}$, $X_c = \{x_{ckj}\}$ とおくと，ラグランジュ関数の最適性の必要条件 $\partial L/\partial b_{cji} = 0$ から，クラスターごとの偏回帰係数行列 B_c は，

$$B_c = (X_c^T D_c X_c)^{-1} X_c^T D_c Y_c \quad (2)$$

となる．ただし，T は転置を表す．また，D_c は u_{ck} を第 k 対角要素とする対角行列である．同様に，$\partial L/\partial u_{ck} = 0$, $\partial L/\partial v^x_{cj} = 0$, $\partial L/\partial v^y_{ci} = 0$ から，u_{ck}, v^y_{ci}, v^x_{cj} の更新則が求められる．各パラメータの繰り返し最適化により，回帰分析とクラスター分析を同時に行う．

次に，求まった偏回帰係数 B_c を用いると，主成分分析の対象となるデータはクラスターごとに次のように分解される．

$$\begin{aligned} Y_c &= X_c B_c + \{Y_c - X_c B_c\} \\ &= Y_{X_c} + Y_{X_c}^- \end{aligned} \quad (3)$$

ここで，Y_{X_c} は X で説明される項を，$Y_{X_c}^-$ は X で説明されない項を表す．したがって，クラスター c における Y のファジィ散布行列 S_{fc} も，

$$S_{fc} = S_{fc}^X + S_{fc}^{X-} \quad (4)$$

のように，X に関連する行列 S_{fc}^X とそれ以外の行列 S_{fc}^{X-} の 2 つの要因行列に分解して求めることができる．X に関連しない要因行列 S_{fc}^{X-} の固有値と固有ベクトルにより，クラスタリングを考慮した外的基準 X に独立な主成分を求めることができる．

3. Fuzzy Fast ICA アルゴリズム

局所的な主成分分析法により求められたメンバシッ

プとクラスターごとの局所的な主成分ベクトルを考慮しながら，独立成分を抽出するために，本多ら [1] は Fuzzy Fast ICA アルゴリズムを提案している．クラスターごとに得られた局所的な主成分ベクトルを用いて，元の観測データをクラスターごとに $E\{\boldsymbol{z}_c \boldsymbol{z}_c^T\} = I_c$ を満たすデータ $\boldsymbol{z}_{cj}$ に白色化する．このとき，Fuzzy kurtosis を定義することにより，メンバシップを考慮した ICA における目的関数を次のように表す．

$$\boldsymbol{J}_c(\boldsymbol{w}_c) = \frac{\sum_{j=1}^{J} u_{cj} (\boldsymbol{w}_c^T \boldsymbol{z}_{cj})^4}{\sum_{j=1}^{J} u_{cj}} - 3\|\boldsymbol{w}_c\|^4 + F(\|\boldsymbol{w}_c\|^2)$$

ただし，$\boldsymbol{w}_c$ がクラスター c における独立成分ベクトルを表し，右辺の第 1 項および第 2 項で表される Fuzzy kurtosis を最大化（最小化）することで独立な復元信号 $\boldsymbol{s}_j = \boldsymbol{w}_c^T \boldsymbol{z}_{cj}$ が得られる．また，第 3 項は $\boldsymbol{w}_c$ の長さが 1 となる制約を表す項である．Fixed-Point Iteration を利用したアルゴリズムにより最適な独立成分ベクトルが求められる．本論文では，外的基準に独立な局所的主成分分析を前処理に用いることにより，外的基準に無相関な独立成分を抽出する．

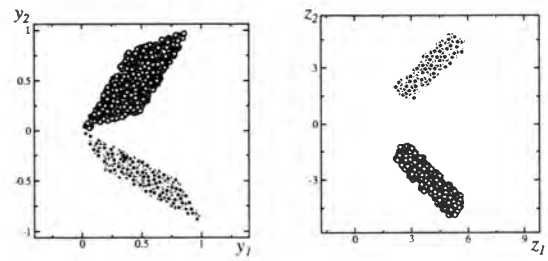
4. 数値実験

提案法の有効性を確かめるために，以下の数値実験を行った．まず，一様乱数と二つの混合行列を用いて図 1(a) のような二組のデータ分布 (y_1, y_2) を作成した．y_1, y_2 には第 1 組 (○) では負の相関，第 2 組 (●) では正の相関があることが分かる．続いて，各々の組の y_1, y_2 に乱数 x を用いて，

第 1 組 (○) : $z_1 = y_1 + x$, $z_2 = y_2 + x$

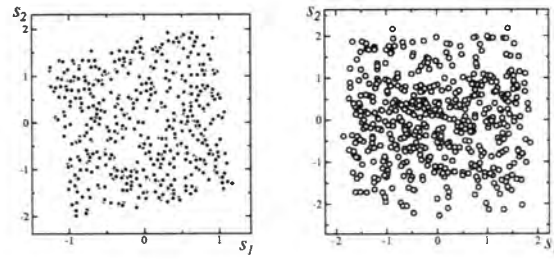
第 2 組 (●) : $z_1 = y_1 + x$, $z_2 = y_2 - x$

という変換を行って，図 1(b) のような第 1 組 (○) では正の相関，第 2 組 (●) では負の相関がある二組のデータ分布 (z_1, z_2) を作成した．そこで，(y_1, y_2) の相関を潜在的な特徴と考え，変換後のデータ (z_1, z_2) を主成分分析の対象，変換に用いたデータ x を外的基準と考えて，クラスタリングを考慮しながら (z_1, z_2) を x で線形回帰することにより，クラスターごとの潜在的な主成分の抽出を行い，そのデータに Fuzzy Fast ICA を適用した．分析の結果，データ (z_1, z_2) は (●) がクラスター 1 に，(○) がクラスター 2 に分割された．クラスターごとに得られた主成分ベクトルを表 1 に，得られた回帰残差から抽出した独立成分を図 2 に示す．外的基準の影響を取り除いた局所的な主成分に対して独立成分分析を行うことで，潜在的な特徴を表す独立成分が抽出できていることが分かる．



(a) 変換前のデータ　　(b) 変換後のデータ

図 1: 実験に用いたデータの散布図



(a) クラスター 1　　(b) クラスター 2

図 2: 抽出された独立成分の散布図

表 1: クラスターごとの主成分ベクトル

クラスター 1		クラスター 2	
第 1 主成分	第 2 主成分	第 1 主成分	第 2 主成分
-0.99893	-0.04616	-0.97839	0.20673
0.04616	-0.99893	-0.20673	-0.97839

5. おわりに

支配的な要因によりデータの潜在的な特性が隠されている場合に，それらの影響を取り除いて局所的な独立成分を抽出する方法を提案した．また，数値実験により提案手法の有効性を示した．

参考文献

[1] 本多克宏, 大上将之, 北口勝志, 市橋秀友: Fuzzy c-Varieties 法を用いた局所的な独立成分の抽出法; システム制御情報学会論文誌, Vol.14, No.5, pp.252-258 (2001).

[2] 呉　志賢, 本多克宏, 新山隆一, 市橋秀友: ファジィクラスタリングを用いる外的基準に独立な局所的主成分の抽出法; 日本ファジィ学会誌, Vol12, No.6, pp.826-834 (2000).

[3] 宮本 定明: クラスター分析入門, ファジィクラスタリングの理論と応用, 森北出版, (1999)

連絡先
〒 599-8531 大阪府堺市学園町 1-1
大阪府立大学大学院工学研究科　本多克宏
TEL:072-254-9355 FAX:072-254-9915
E-mail:honda@ie.osakafu-u.ac.jp

移動ロボットに対するコツ教示とコツの明示化に関する一考察

A Study on Teaching of Skills to Mobile Robot and Interpretability of Acquired Skills

森井　義人　MORII Yoshito
古橋　武　FURUHASHI Takeshi
三重大学　Mie University
井谷　久博　ITANI Hisahiro
名古屋市工業研究所　Nagoya Municipal Industrial Research Institute

Abstract: This paper studies teaching information understanding by mobile robot from a point of view of skill acquisition. In particular, teaching of skills and interpretability of skills are considered. This paper considers the skill for a robot as the learnable part which mostly affects robot's performance. The skill in this sense is in the refined parts of preprocessing of input variables, control rules, output variables, and also in the sub-evaluation functions to be incorporated into the robot. The process of teaching information understanding is thus viewed as a process of acquiring the above skills.

This paper studies acquisition of skills for task execution by using actual mobile robot. This paper focuses on the skill acquisition from expert's assistance given in the form of patterns. Skill acquisition is to acquire refined rules. This refinement of rules is achieved by re-dividing the input space. Fusion axes are introduced to visualize the refined rules. The skills are explicitly acquired as differences between the rules before/after the assistance by the expert.

1　はじめに

近年，ロボットによる作業を容易に実現することを目的として，ロボットの自律化を目指したさまざまな研究がなされている[1][2]．しかし，完全な自律化は難しく，自律学習の限界が指摘されている．そこで，人間の教示による，ロボット作業実現の効率化が見直されている[3][4]．

井谷・古橋[5][6]は，これまでにロボットによる人間の教示情報の理解を教示情報の接地と再学習のコツ獲得の２段階に分けて考察してきた．記号接地問題[7][8]は形式的な記号システムの意味的解釈をシステムと環境に内在する固有のものに接地する問題である．理解の第１段階である，文献[5]の教示情報の接地は，トップダウン的に与えられた教示情報をロボットのセンサ情報に接地する過程において，人間から与えられた記号情報を，ロボットの物理的制約（センサ・アクチュエータの能力など）に基づいた記号情報へと再構成することをいう．理解の第２段階である，文献[6]の再学習のコツ獲得は，ロボットが未知の状況下でも速やかに学習できる重要な情報（コツ）を，教示情報を基にして，環境との相互作用を通して獲得することである．

本稿では，ロボットによる教示情報の理解過程をコツ獲得の視点から捉え直し，コツの教示方法とコツの明示化について考察する．本稿では，ロボットにおけるコツを“ロボットの性能に最も影響を与える学習可能な部分”と捉える．ここでコツとは，ロボットの基本部分における，入力変数，行動ルール，出力変数の前処理の部分や，ロボットに内在化されるサブ評価関数にあると考える．

教示の理解過程の第１段階におけるコツは，与えられた教示情報を基にして再構成した行動ルール群を洗練する過程で得られる各部分の変化分にあると捉える．コツは，教示者による補助の前後でのルールの差異として明確に得られると考える．得られたコツを明示化するために統合軸を導入し，２次元空間内にて視覚化を行う．

本稿では，これまでに筆者らが行った，移動ロボットを用いた通路通過問題の実機実験[9]のデータを用いて，コツの明示化の検討を行った．

2　教示情報からのコツの獲得

2．1　教示情報の理解とコツ

教示情報の理解の第１段階[5]は，人間から与えられた記号情報をロボット自身が環境との相互作用を通してロボットの物理的制約（センサ・アクチュエータの能力など）に基づいた記号情報へと再構成すること．また，理解の第２段階[6]はロボットが未知環境に置かれ，再学習を要するときに，再学習を効率的に行うコツを獲得することとしてきた．

本稿では，この教示の理解過程をコツ獲得の視点から捉え直す．一般的にコツとは，「物事をなす大切な部分，勘所，要領，呼吸」のことである．また，コツには，言葉や記号で表すことのできる知識的なコツと，言葉や記号では表すことができない実際の行動によってのみ表すことのできる技能的なコツがあると考える．筆者らは，ロボットにおけるコツを，“ロボットの性能に最も影響を与える学習可能な部分”であると捉える．図１にロボットの基本部分における，コツの所在の可能性を示す．図１に示すように，コツは，入力変数，行動ルール，出力変数の前処理の部分や，内在化されるサブ評価関数にあると考える．教示情報の理解過程は，上述のコツ獲得の過程と見なすことができる．教示の理解過程の第１段階におけるコツは，再構成した行動ルール群を洗練する課程で得られる各部分の変化分にあると捉える．第２段階におけるコツは，再学習に対応できる内在化されたサブ評価関数にあると考えられるが，この点は将来の課題とする．

本稿では実機実験を前提に，少ない試行回数で優良な行動ルール群の獲得を目指し，行動ルール群の獲得におけるコツ獲得に焦点を絞って，コツ教示とコツの明示化について考察を進める．

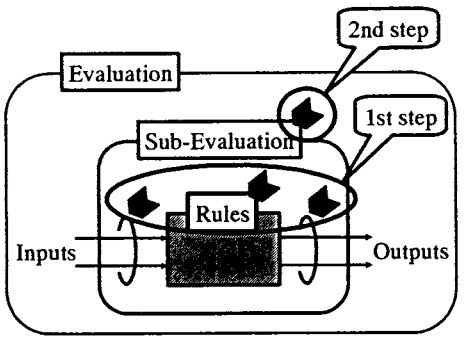


Fig.1: Points for skills

2．2　コツ教示とコツ獲得

図2にロボットのモデル[10][11]を用いて，コツ教示の様子を示す．前節で述べたように，コツには，知識的コツと技能的コツがあり，それぞれ教示方法が異なる．知識的コツは言葉や記号などを用いて教示を行い，技能的コツは手取り足取り教示を行う．

ロボットは自らのセンサによって環境から得たパターン情報を基に，入力空間分割によるモデリングを行い，人間から与えられた教示情報であるルール R'，パターン F'，及びパターン・ルール間の射影 Π' をロボットの物理的制約に基づいた情報へと再構成する．しかしこの過程で，ロボットは必ずしも人間の教示情報を的確に再構成できるとは限らない．ロボットは教示情報を再構成して得た行動ルール群を基に行動戦略を立て，アクチュエータにより環境内で行動するが，うまくタスク実行できないことがある．そこで，新たにタスク実行の補助を人間が移動ロボットのアクチュエータを通して与える．この時，ロボットは環境から取り込むパターン情報を基に，再びモデリングを行い，与えられたタスクをより的確に実行するための R，F，Π を環境との相互作用を通して自律的に見つけ出す．タスク実行の補助により，入力空間の分割に変化が現れれば，その変化の差はタスク実行のコツとして明示的に獲得される．

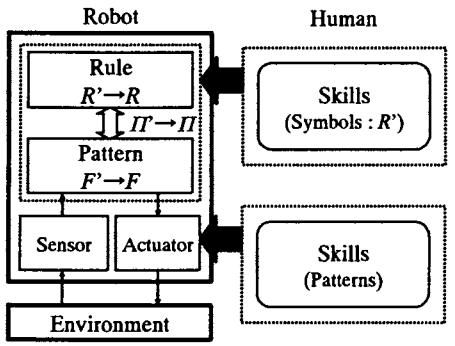


Fig.2: Teaching of skills

3　行動ルール群の獲得とコツの明示化

3．1　入力変数選択と入力空間分割によるモデリング

本稿では，ロボットによる教示情報の理解過程における行動ルール群の獲得を，入力変数選択と入力空間分割によるモデリングにより行う．筆者らは，これまでクリスプなツリー状の分割方法で入力空間分割を行ってきた[9]．従来の方法の問題点として，必ずしもデータ分布に即した分割ができないことが挙げられる．そこで本稿では，クラスタリングにより入出力データ空間を分割し，行動ルール群の獲得を図る．クラスタリング手法としては，Fuzzy C-Means(FCM)[12]を用いた．

センサ情報と行動結果の入出力データの分布から，以下の手順で行動ルール群を獲得する．

1．入力情報の中からモデリングに用いる入力変数を選択する．
2．人間が，入出力データ分布を見て，クラスタの個数をあらかじめ指定し，FCM により入出力空間を分割する．
3．各クラスタを入力空間に射影し，入力空間上での各クラスタを1つのルールとする行動ルール群を獲得する．

3．2　統合軸[13]によるコツの明示化

前節で，行動ルール群の獲得の際に，入力変数選択後にクラスタリングを行うとしたが，変数選択によってはデータの構造をうまく捉えられなくなることがある．データ構造を捉えた低次元化法が有効となる．そこで，山本ら[13]の統合軸を用いた低次元化によって，コツの明示化を図る．

統合軸は，ファジィ多重判別分析(Fuzzy Multiple Discriminant Analysis: FMDA)から得られる固有ベクトルを用いて，(1)式で表される．統合軸が(1)式のように線形式として定義されているため，その軸に対して，どの変数がどの程度影響を及ぼしているかを，方向ベクトルの大きさを見ることにより解釈することが可能である．また，統合軸に対する制約として，MDA が入力次元よりも低次元への写像を行う手法であること，及び一般に C 個のクラスタは C-1 本の判別式により判別可能であることから(2)式が導かれる．

$$\xi_l = \boldsymbol{e}_l^t \boldsymbol{x} = e_{l1}x_1 + e_{l2}x_2 + \ldots + e_{lD}x_D \quad (1)$$

$$F \leqq \min[C\text{-}1, D] \quad (2)$$

ξ_l　：　l 番目の統合軸
$\boldsymbol{e}_l$　：　l 番目の統合軸の重みベクトル
$\boldsymbol{x}$　：　k 番目の入力ベクトル　$\boldsymbol{x}_k = (x_1, x_2, \ldots, x_D)^t$
D　：　入力ベクトルの次元
F　：　統合軸の本数
C　：　クラスタ数

コツの明示化のための，統合軸への射影の手順は以下のようである．

1．全ての入力と出力からなる入出力空間を前節と同様に FCM によりクラスタリングを行う．
2．FMDA により統合軸を決定する．
3．統合軸からなる可視化可能な低次元化された空間に各クラスタを射影する．

以上のようにして，得られた統合軸の意味を捉えることによって，そこに射影されたコツの持つ意味を捉えることが可能となる．

4　実験的検討

移動ロボットによる教示情報からのコツ獲得の検討として，文献[9]での実機実験のデータを用いてモデリングを行った．また，コツの明示化についても考察する．

4．1　通路通過問題

等間隔の通路を壁に衝突することなく通り抜ける通路通過問題を考える．通路は入り口から出口まで一定幅 90cm で，左に直角に曲がり，その 90cm 先で右に直角に曲がっている．

本実験で用いる移動ロボットは，立体視のできる CCD カメラを搭載しており，壁面との距離を測定できる．移動ロボットは，各ステップにおいて CCD カメラからの距離情報を入力として，モデリングによって得られたモデルにより回転時間を出力として行動する．

なお，本実験の詳細については文献[9]を参照されたい．

4．2　教示情報からのコツの獲得

まず始めに，人間がタスク実行の手本をアクチュエータに直接働きかけることで示す．この時，移動ロボットは CCD カメラから得られる 5 種類の入力情報（x_0：壁面との最短距離，x_1：最短距離方向の相対角度，x_2：前方距離，x_3：視野の右端距離，x_4：視野の左端距離）と，1 種類の出力情報（y_0：回転時間）を記録する．壁面に衝突することなく出口に到達するまでのデータを蓄積する．蓄積されたデータを用いて，入力変数選択と入力空間分割によるモデリングを行い，与えられたタスクを実行するためのモデルを構築する．

次に，移動ロボットに先ほど獲得したモデルに基づいて，通路通過行動を行わせる．この段階では，まだタスク実行がうまくできずに，人間の補助を必要とする場面があった．補助教示は，ロボットの右前方に壁面が迫った際に，衝突回避のために左に曲がるように教示を行った．ここで獲得したデータを基に，再びモデリングを行い，与えられたタスクをより的確に実行するためのモデルを再構築する．

4．3　実験結果と考察

前節の実験で得られたデータを基に，入力変数選択と FCM クラスタリングによるモデリングを行った．図 3 にモデリングによって得られたモデルの例を示す．ここで，入力変数は，比較のため，文献[9]でツリー状分割によるモデリングを行った際に示したものと同様の x_0(壁面との最短距離), x_4(視野の左端距離)の例である．これまでのツリー状分割ではうまく分割できなかった部分も，クラスタリングによる空間分割を行うことでうまく分割することができた．なお，ツリー状分割によって得られたモデルの例については文献[9]を参照されたい．

次に，図 4 に補助教示後のモデリングによって得られたモデルの例を示す．図 3 と同様，入力変数は，x_0(壁面との最短距離), x_4(視野の左端距離)の例である．また，表 1 に各クラスタ内の出力の平均値と試みに付けたラベルを示す．図 4 のクラスタ番号が，表 1 のクラスタ番号と対応している．補助教示前の図 3 と比較すると，壁面との最短距離と視野の左端の距離が非常に近い際に補助教示を行ったことにより，その部分に新たなクラスタが形成されていることが見てとれる．このクラスタが，今回のタスクにおけるコツであると捉えることができる．つまり，壁面との最短距離と視野の左端の距離が非常に近い際に左に曲がることがコツとして獲得されたと言える．この様に，補助教示の前後の変化分として，タスク実行のコツが獲得された．

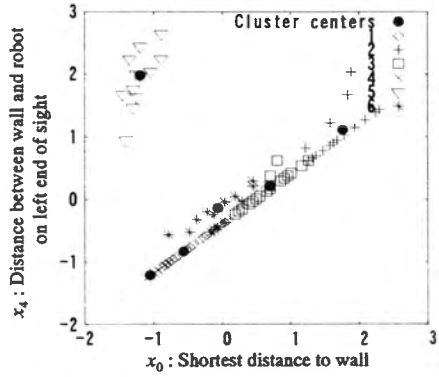


Fig.3: Acquired model

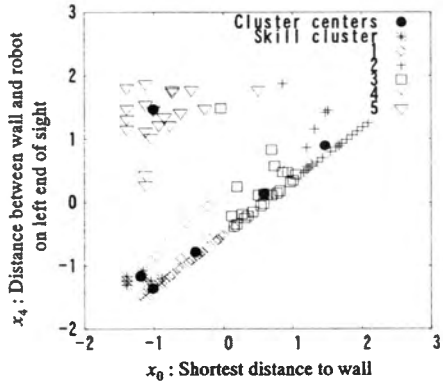


Fig.4: Acquired model after human's assist

Table 1: Mean value of outputs and labels of clusters

Cluster	Mean output value	Label
Skill	-122.73	Little Left
1	17.45	Nearly Straight
2	-13.00	Nearly Straight
3	17.45	Nearly Straight
4	200.00	Right
5	-71.72	Little Left

4．4　コツの明示化についての検討

コツの明示化の検討として，補助教示後のデータに対して，全ての入力変数を用い，5 入力 1 出力の 6 次元空間を対象に FCM によるクラスタリングと統合軸による低次元化を行った．

クラスタ数が 6 個の時の固有値と固有ベクトルを表 2 に示す．(2)式より，統合軸は 5 本まで取ることが可能であるが，本稿では，コツの明示化を目的とした低次元化であるため，統合軸は 2 次元(2 本)以下であることが望ましい．表 2 より，固有値の値が 1.18 と 0.60 の 2 つが大きいため，2 本の統合軸で

クラスタを分けることができていると判断できる．すなわちこれは，５次元から２次元への低次元化が可能であることを示す．この時の，統合軸からなる２次元平面に射影した各クラスタを図５に示す．ただし，各変数軸は正規化してある．また，表３に各クラスタ内の出力の平均値とラベルを示す．図５のクラスタ番号が，表３のクラスタ番号と対応している．

ここでの統合軸は，それぞれ，ξ_0はx_0(壁面との最短距離)，x_3(視野の右端距離)，x_4(視野の左端距離)の方向ベクトルがやや大きく，ξ_1はx_1(最短距離方向の相対角度)の方向ベクトルが大きいことが分かる．つまり，今回のタスクにおけるコツは，ロボットが壁に視野を塞がれる程に近づき，かつ，それが右前方よりである際に，左に曲がることであることがわかる．

Table 2: Eigen values and eigen vectors from FMDA

Eigen Values	Eigen Vectors				
	e_0	e_1	e_2	e_3	e_4
1.180	0.47	-0.38	0.30	0.55	0.49
0.602	-0.29	-0.93	-0.08	0.09	0.21
0.246	0.33	-0.57	0.22	-0.66	0.29
0.083	-0.32	0.39	-0.43	0.74	0.06
-0.028	-0.27	-0.20	-0.41	0.04	0.85

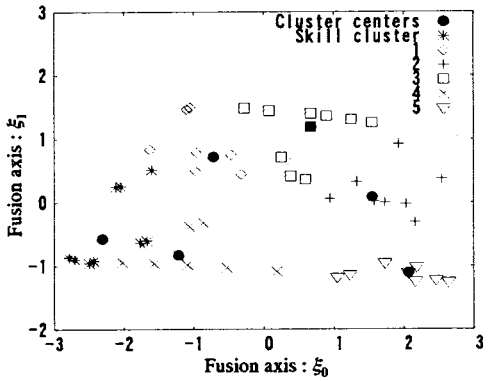


Fig.5: Projected clusters on a plane consists of fusion axes

Table 3: Mean value of outputs and labels of clusters

Cluster	Mean output value	Label
Skill	-127.78	Little Left
1	95.69	Little Right
2	2.77	Straight
3	17.45	Nearly Straight
4	-16.11	Nearly Straight
5	-16.11	Nearly Straight

5 まとめ

本稿では，ロボットによる教示情報の理解過程をコツ獲得の視点から捉え直した．また，ロボットにおけるコツを“ロボットの性能に最も影響を与える学習可能な部分”と捉えた．ここでコツとは，ロボットの基本部分における，入力変数，行動ルール，出力変数の前処理の部分や，再学習に対応できるロボットに内在化されたサブ評価関数にあるとした．

教示情報の理解過程は，上述のコツ獲得の過程と見なすことができる．教示の理解過程の第１段階では，与えられた教示情報を基にして再構成した行動ルール群を洗練する過程で得られる各部分の変化分をコツと捉えた．コツは，補助教示の前後でのルールの差異として，明確に得られることを示した．

また，統合軸により入力空間を低次元化し，統合軸の持つ意味を捉えることによって，獲得されたコツの持つ意味を明らかにした．

今後は，行動ルール群の獲得における空間分割のより良い方法について検討していくことが課題として挙げられる．また，コツの明示化について，入力空間の低次元化の方法についてもさらに検討していく必要がある．

参考文献

[1] 高橋，浅田：複数の学習器の階層的構築による行動獲得，日本ロボット学会誌，Vol.18, No.7, pp.1040-1046, 2000.

[2] 森本，銅谷：階層型強化学習を用いた３リンク２関節ロボットによる起立運動の獲得，日本ロボット学会誌, Vol.19, No.5, pp.574-579, 2001.

[3] 植山：ミニ特集「作業の教示とプログラミング」，日本ロボット学会誌, Vol.17, No.2, pp.157, 1999.

[4] 椹木：知識獲得と教示，日本ロボット学会誌，Vol.13 No.5, pp.588-591, 1995.

[5] 井谷，古橋：衝突回避運動における自律移動ロボットによる教示情報の接地に関する一考察，計測自動制御学会論文集, Vol.36, No.8, pp.692-697, 2000.

[6] 井谷，古橋：自律移動ロボットによる教示情報の理解，計測自動制御学会論文集，Vol.38, No.11, pp.966-973, 2002.

[7] S.Harnad : “The Symbol Grounding Problem”, Physica D, Vol.42, pp.335-346, 1990.

[8] 麻生：情報統合技術－実世界知能のためのキーテクノロジー－, RWC NEWS, Vol.5, http://www.rwcp.or.jp/rwc-news/05/intelligence.html, 1996.

[9] 森井，古橋，森川，井谷：移動ロボットによる教示からのコツの獲得に関する一考察，第 12 回インテリジェント・システム・シンポジウム, pp.355-360, 2002.

[10] I.Horswill : “Analysis of adaptation and environment”, Artificial Intelligence, Vol.73, pp.1-30, 1995.

[11] H.Ohno and T.Furuhashi : “A Conceptual Framework for Construction of Autonomous System and its Application to Input Variable Selection for Cart Pole Control”, Proc. of International Workshop on Soft Computing in Industry (IWSCI'99), pp.48-53, 1999.

[12] J.C.Bezdek : “Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms”, Plenum, New York, 1981.

[13] K.Yamamoto, T.Yoshikawa, T.Furuhashi : “A Proposal of Fuzzy Modeling on Fusion Axes Considering the Data Structure”, FUZZ-IEEE 2003, pp.348-353, 2003.

連絡先：

〒514-8507 三重県津市上浜町 1515
三重大学大学院 工学研究科
情報工学専攻 パターン情報処理研究室
森井 義人
TEL: 059-231-9746
FAX: 059-231-9456
E-mail: morii@pa.info.mie-u.ac.jp

人間を誘導する案内ロボットの軌道計画法

Trajectory planning of a guidance robot which guides a human being

溝渕 宣誠 [1)]　王 碩玉 [1)]　河田 耕一 [1)]　山本 正樹 [2)]
Yoshinobu Mizobuchi　Shuoyu Wang　Koichi Kawada　Masaki Yamamoto
1)：高知工科大学　2)：松下電器産業(株)
Kochi University of Technology　Matsushita Electric Insustrial Co., Ltd.

Abstract : The mobile robot is actively researched, and a lot of researches on the control which transfer the goal avoiding obstacles have been done from so far. On the other hand, it is necessary to do the control considering the human being for the robot which works in the same environment as the human being. In this paper, it aims to develop the guidance robot which leades the human being in the building, it proposes Trajectory planning of the guidance robot beased on the distance type fuzzy reasoning method.

1　はじめに

従来から移動ロボットの研究は盛んに行われおり障害物を回避しながら目標まで移動する走行制御について様々な視点から多くの研究がされている．近年，ロボットは少子高齢化などの問題を背景としてその活躍の場を産業分野から医療分野，人間生活の場に拡大している．したがって，人間と同じ物理空間で作業するロボットにおいては，人間の意志，感情，行動に対しての理解，ロボットの動きによる感情表現，安全性などの人間との相互関係から様々の重要な要素が生まれ，それらに対する研究が重要となる．本研究では，建物内で人間を誘導できる案内ロボットを開発することを目的として人間との相互関係に基づいたロボットのトータルシステムの研究を行っている．案内ロボットにおいては人間と案内役との間に見られる相互関係に基づいて安全かつに的確に人間を案内する事が求められる．そのため人間と案内役との間に見られる相互関係を如何に定量的にするかが重要な問題となる．著者らは人間と案内役との間に見られる案内知識を IF-THEN ルールによって表現し，案内知識における曖昧な概念をファジィ集合によって定量化した．[1]この考え方は，一つの方程式でシステムの特性のすべてを表現しようとする数理モデル論と根本的に異なり，案内動作から生まれる案内役と人間との複雑な相互関係をより近似的に適切に定量表現できる．また，本研究ではファジィ推論法として距離型ファジィ推論法[2]を用いている．距離型ファジィ推論法においては前件部と事実との距離を推論の根拠としているので，前件部ファジィ集合が互いに覆われていないようなファジィルールの場合でも，適切な推論結果を得ることができる．さらに，分離規則は厳密に満たされている．著者らはこの特徴を利用して案内ロボットの軌道計画法において前件部にシングルトンを用いてファジィ推論を行った．[3]これによりある事実に対して任意の軌道値を求める事ができた．本論文では案内役が人間を誘導する動作をロボットで実現する為に，これまでの案内知識とロボットが移動する際の回避知識からそえぞれ別々に距離型ファジィ推論法を用いて軌道計画を行った．また，それぞれの軌道計画から案内ロボットの軌道値として得られる案内，回避といったそれぞれの動作を IF-THEN ルールを用いて調整を行った．それぞれの軌道計画法の動作を調整するによりそれぞれの軌道計画法が競合する事を抑える事ができる．実際に目標まで回避動作を行いながら案内動作を行う案内ロボットの実験を行い，その検証を行った．

2　案内ロボットの軌道計画法

案内ロボットの軌道計画法においては従来から移動ロボット分野で研究されている回避動作の他に人間を案内する為の案内動作が必要となる．しかし，その為にこれらの案内，回避といった動作をすべて一つの軌道計画法で統一的に記述するのは実際には困難である．そこで本論文では案内，回避といった動作を別々の軌道計画法で記述し，それぞれの軌道計画で得られた動作を IF-THEN ルールを用いて調整した．図 1 にシステムの構成を示す．

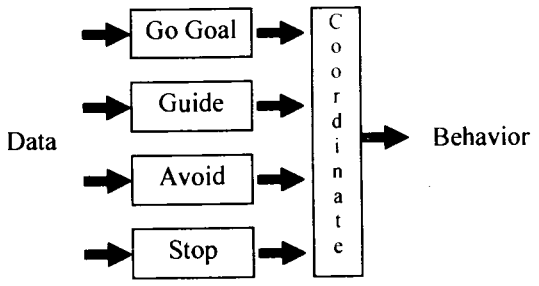


図 1　システムの構成

Go Gaol はある指定した目標まで単純に移動するだけの軌道計画である．Guide は人間を誘導する案内動作の軌道計画である．Avoid は障害物を回避する回避動作の軌道計画である．Stop は障害物に衝突した場合に停止する停止動作の軌道計画である．これらの軌道軌道計画は個々にそれぞれの動作として軌道値を決定する．これらの決定された動作は Coordinate で IF-THEN ルールにより調整される．具体的には一例として表 1 のように記述される．

表 1　調整ルール

R^1 ： IF $Vt \cdot avoid \leqq Vt \cdot guide$ THEN $Vt = Vt \cdot avoid$
ELSE $Vt = Vt \cdot guide$

$Vt \cdot avoid$, $Vt \cdot guide$ はそれぞれ Avoid, Guide での軌道計画で求められた前進速度であり，Vt は調整された前進速度である．つまり，この調整ルールは案内速度が障害物に衝突しないように調整する為のルールである．このように案内，回避といった別々の知識に基づく動作を個々に軌道計画を行い，決定された動作に対してそれぞれの動作を調整する IF-THEN ルールを用いている事で複雑な案内ロボットの動作アルゴリズムを実現できる．

3　ロボットの構成

写真 1　案内ロボット

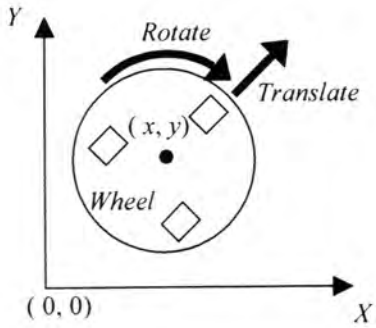


図 2　移動機能

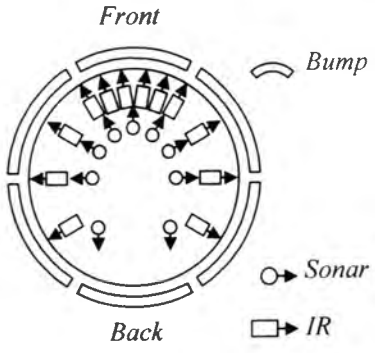


図 3　センサの配置

写真 1 にロボットの写真を示す．図 2 にロボットの移動機能，図 3 にロボットの上部から見たセンサの配置を示す．ロボットは直径 350mm，高さ 800mm の円柱形を自律型全方向移動ロボットである．底面には 3 つのタイヤが三角形の頂点に配置されている．タイヤは全て同じ方向を常に向いており，同じ回転数で回転し前進動作する．回転動作はタイヤの回転中心と床平面に対して垂直な軸にプーリーを用いて回転する．内界センサとしてエンコーダを搭載しており初期状態の自己の中心位置を原点として前進方向を X, 前進方向に対して左 90° 方向を Y として自己位置を X-Y 座標として認識する事ができる．また，外界センサとして下部側面にタッチセンサが 6 個，中央側面には赤外線センサ 12 個，超音波センサが前方に向けて 7 個，後方に向けて 2 個，計 9 個が配置されている．

4　各動作の軌道計画の作成

4.1 Go Goal

Go Goal は指定した目標まで移動する目標移動動作の軌道計画である．図 4 に目標までの移動計画法を示す．ここでは現在座標(x, y)と目標座標(x_0, y_0)を比較し，目標座標の方向と現在の進行方向の誤差 θ と目標座標から現在座標までの距離 d より前進速度 V_t, 回転速度 Vr を修正する．式(1), (2)に前進速度 V_t, 回転速度 Vr を示す．尚，Kt, Kr は定数とする．

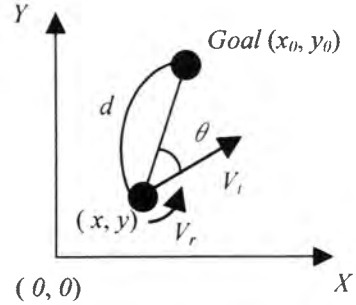


図 4　目標への軌道計画

$$V_t = K_t \cdot d = K_t \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2} \quad (1)$$

$$V_r = K_r \cdot \theta \quad (2)$$

4.2 Guide

Guide は人間を誘導する案内動作の軌道計画である．案内動作においては如何に案内役と人間の相互関係を定量化するか，如何に案内役の知識を表現するかが中心課題となる．そこで人間と案内役との間に見られる案内知識を IF-THEN ルールによって表現し，案内知識における曖昧な概念をファジィ集合によって定量化した．この特徴としては，多様な非線形特性をもつ入出力関係が得られ，非線形の強い実システムを適切に近似することができる．本論文では，距離型ファジィ推論法に基づいて Guide における軌道計画を行った．距離型ファジィ推論法においては前件部と事実との距離を推論の根拠としており，前件部のファジィ集合が互いに覆われていないようなファジィルールの場合でも，適切な推論結果を得ることができる．さらに，分離規則は厳密に満たされている．

4.2.1 知識の抽出

案内役と人間との相互関係より言語ルールを作成する．本論文では知識の評価指標として案内ロボットに装備された超音波センサにより検出した人間との距離を用いる．案内知識の一部を表2に示す．

表2　言語ルール

R^1 ：もし人間との距離が近ければ，
速度を速い速度にせよ．

R^2 ：もし人間との距離が適切であれば，
速度を適切な速度にせよ．

4.2.2 知識の定式化

表2の定式化を行う．前件部変数は超音波センサから検出された人間との距離とする．また，後件部変数は軌道値として案内ロボットの速度を用いる．表3に推論ルールの一部を示す．

表3　推論ルール

R^1 ： $x = A^1 \rightarrow y = B^1$

R^2 ： $x = A^2 \rightarrow y = B^2$

ここで，表3の前件部変数は$x \in \{A^1, A^2, \cdots\}$であり，後件部変数は$y \in \{B^1, B^2, \cdots\}$である．尚，$A^1, A^2, \cdots$，及び，$B^1, B^2, \cdots$は言語ルールの前件部と後件部に対応した言語変数であり，前件部xは超音波センサから検出した人間との距離，後件部yはロボットの速度を示している．

4.2.3 言語変数の定量化

定式化された知識の前件部と後件部の言語ルールの定量化を行う．本論文では前件部，後件部の言語変数は三角型ファジィ集合とシングルトンで与えている．前件部の実数値を図5に示す．また，後件部の実数値を図6に示す．

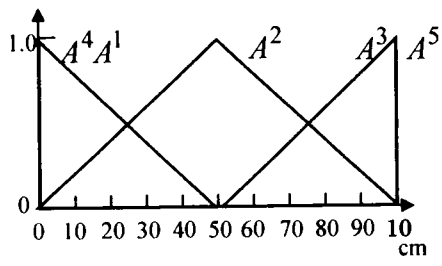


図5　前件部

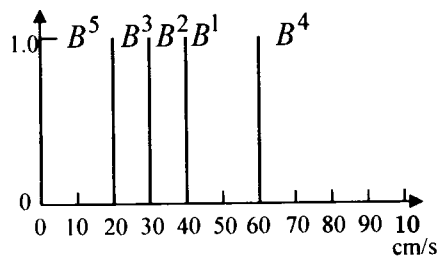


図6　後件部

4.2.4 距離型ファジィ推論法に基づく軌道計画法

距離型ファジィ推論法に基づいて各動作知識に基づく知識動作における軌道値の算出を行う．軌道値の算出は次のSTEPからなる．

STEP1：事実と前件部の距離を求める．距離の計算は式(3)で与えられる．ただし，A'，Aは前件部，事実を表しi＝推論ルールの数，$1 \le p < \infty$である．式(3)においての値を2として一般的なファジィ集合間の簡略化距離計算式を与える．

$$d_i = d(A', A) = \left[\int \left| \inf A'_{M\alpha} - \inf A_{M\alpha} \right|^p d\alpha \right]^{\frac{1}{p}} + \left[\int \left| \sup A'_{M\alpha} - \sup A_{M\alpha} \right|^p d\alpha \right]^{\frac{1}{p}} + \left[\int_{-\infty}^{\infty} \left| \left(\frac{1}{M_{A'}} - 1 \right) \mu_{A'}(x) - \left(\frac{1}{M_A} - 1 \right) \mu_A(x) \right|^p dx \right]^{\frac{1}{p}} \quad (3)$$

STEP2：次に軌道値を推論する．推論結果y_0は式(3)より求められた前件部と事実との距離d_iより式(4)で与えられる．ただし，B^iは後件部の実数値である．

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^{I} \left[B^i \prod_{j=1, j \neq i}^{n} d_j \right]}{\sum_{i=1}^{I} \prod_{j=1, j \neq i}^{I} d_j} \quad (4)$$

この式(4)で求められた推論結果y_0を各動作知識に基づく知識動作における軌道値として与える．

4.3 Avoid

Avoidは障害物を回避する回避動作の軌道計画である．AvoidもGuide同様に案内知識をIF-THENルールで表現し距離型ファジィ推論法を用いて軌道値を算出した．具体的には“もし障害物との距離が10cm以下ならば停止する”，“もし障害物との距離がある一定距離以上ならば最大速度で移動する”といったクリスプな知識より推論ルールを作成してシングルトンを用いて距離型ファジィ推論を行った．距離型ファジィ推論においては前件部がシングルトンの場合でも適切な推論結果が導き出されるので，より少ない簡単な推論ルールで的確に推論を行う事ができる．

4.4 Stop

Stopは障害物に衝突した場合に停止する停止動作の軌道計画である．ここではセンサが衝突を検出した場合にすぐに停止するように軌道計画を作成した．

5　実験及び実験結果

先ほど作成した軌道計画法を用いて案内実験を行った．実験はある通路でロボットを原点(0cm，0cm)から目標(210cm，170cm)まで移動させ，人間をロボ

ットに追従させた．ロボットには目標座標だけを与え壁などの障害物となる物体の座標情報は与えていない．また，実験条件として追従する人間はロボットの原則的に必ず後方を追従する事とし，また途中で一旦停止するとする．

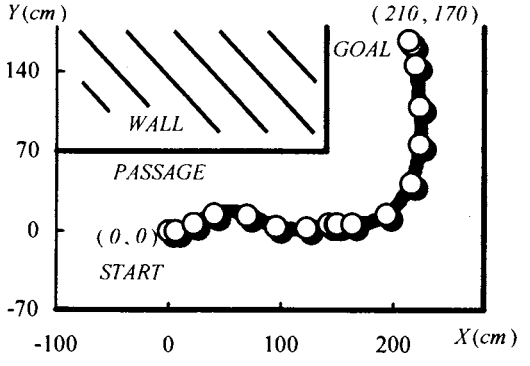


図 7　案内ロボットの軌道

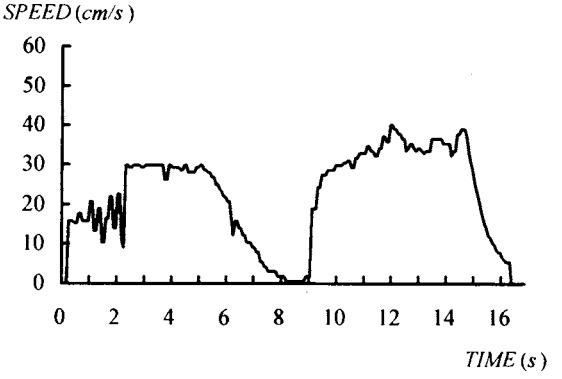


図 8　ロボットの速度

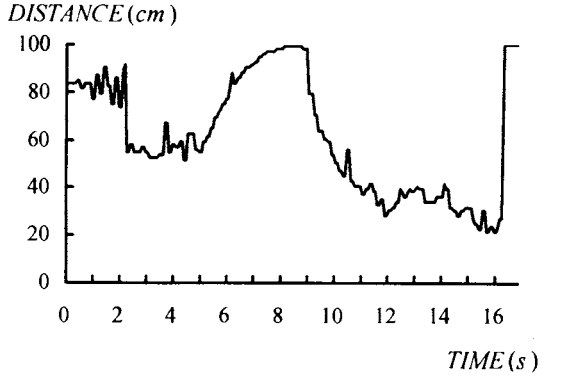


図 9　人間とロボットの相対距離

実験結果として図 7 にロボットの軌道を示す．白のプロットは一秒毎の位置座標を示している．図 8 に時間毎のロボットの移動速度を示す．図 9 にロボットのセンサから検出された時間毎のロボットと人間との相対距離を示す．図 7 のように壁に衝突せずに目標まで案内動作をしながら移動する事ができた．これは Aviod の回避知識が距離型ファジィ推論法によって作成された通りに機能しているといえる．また，図 8，図 9 に示すように人間が停止した場合にはロボットも速度を落として停止する．またロボットは人間がロボットに追従すればロボットは速度を上げる．つまり人間との相対距離に応じて移動速度を変化させている．これも Guide の案内知識が作成された通りに機能しているといえる．このように導入した軌道計画法の有効性が示されたといえる．

6　まとめ

本論文では，案内ロボットのトータルシステムの研究として人間を誘導する案内動作やロボットが移動する際の回避動作などを IF-THEN ルールを用いて知識としてそえぞれ別々に抽出，ファジィ集合を用いて定量化，ファジィ推論を用いて軌道計画を行い，軌道値として得られる案内，回避といったそれぞれの知識動作を IF-THEN ルールを用いて軌道値の調整を行った．これにより案内や回避といった別々の知識に基づく軌道計画を一つの複雑な案内ロボットの動作アルゴリズムとして実現できる．実際にこの手法を用いて目標まで回避動作を行いながら案内動作を行う案内ロボットの実験を行い，比較的簡単な調整ルールの記述のみでも十分に回避を行い案内動作をする事が解った．また，距離型ファジィ推論法に基づく軌道計画法を知識動作に導入することで Guide においては案内役と人間から生まれる相互関係を定量的に表現するすることが可能であり，Avoid においても実数値を用いてより少ないルールで十分な成果が得られた．

今後の課題として，実際に人間を案内する場面においてこの他にも様々な動作が必要である．こうした動作をどれだけ知識動作として記述することが出来るかが重要である．一方で調整ルールをより複雑にすることで多様な知識動作をより効果的に動作させる事が期待できる．

参考文献

[1] 溝渕宣誠，王碩玉，河田耕一，山本正樹：距離型ファジィ推論法による案内ロボットの制御，17th FuzzySystem Symposium 論文集，pp.257~260(2001)

[2] 王碩玉，土谷武士，水本雅晴：距離型ファジィ推論法 Part1~Part12，Fuzzy System Symposium 論文集(1996～2001)

[3] 溝渕宣誠，王碩玉，河田耕一，山本正樹：距離型ファジィ推論法を用いた案内ロボットの軌道計画法，第 12 回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集，pp.259~264 (2002)

連絡先：

〒782-8502
高知県香美郡土佐山田町宮ノ口 18
高知工科大学 知能機械システム工学科
王 碩玉
電話 ：0887-57-2306
FAX ：0887-57-2320
Email : wang.shuoyu@kochi-tech.ac.jp

Q-Learningに基づく自律移動ロボットの感情行動学習

Emotion Behavior Learning of Autonomous Mobile Robot Based on Q-Learning

○秋口 俊輔　　前田 陽一郎
Shunsuke AKIGUCHI　Yoichiro MAEDA
福井大学
Fukui University

Abstract — In recent years, some researches for embedding the human's emotion to the autonomous mobile robot are reported in the field of the pet robot. Furthermore, the researches based on not only psychological but also physiological knowledge are also started recently. In this research, we notice the influence that the neuromodulators give on learning or generating emotion. We propose an architecture of the emotion generation system used Q-Learning method for an autonomous mobile robot.

1. はじめに

近年、AIBOに代表されるようなエンタテイメントロボットや介護ロボットの分野において、ロボットに人間に近い感情を埋め込む試みが盛んに行われている。また、ロボットにおける感情モデルについての研究もさまざまなアプローチで行われている。

三輪ら [1] は、運動方程式をモデルとした情動方程式を提案し、刺激による心理状態の遷移を表現可能とした。また快-不快、覚醒-不覚醒の2軸からなる気分ベクトルを導入し、ロボットの心理状態を刺激と気分によって決定するアルゴリズムを考案した。

中田ら [2] は、普遍性のある表現の法則を探求するために、ロボットの対人表現を一方的表現・反応表現・繰り返し表現の3つに分類し、人間に与える印象の原因とその印象の内容との関係を明らかにした。

また、筆者ら [3] は、ファジィルールで作成された、喜び (Joy)・怒り (Anger)・悲しみ (Sadness) の3つの感情（基本心理ベクトル）を基にさまざまな感情を表現できる自律移動ロボットのための感情シミュレータを開発した。

本研究では、神経修飾物質系によるメタパラメタ制御を持つQ-Learningを用いた自律移動ロボットの感情表現行動の学習手法について考察する。

2. 感情モデルと神経修飾物質系

ここでは、本研究における感情発生システムについて述べる。感情発生システムの概要を図1に示す。

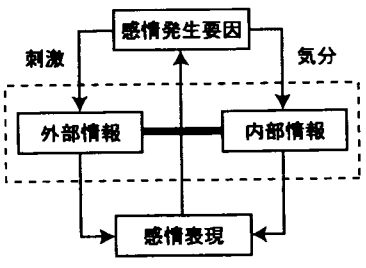


図1．感情発生システムの概要

本研究では、感情発生要因によって感情が発生すると考える。感情発生要因が存在すると、環境の状態などの外部情報と、感情などの内部情報を基に、どのような行動を行うのかを決定する。決定した行動によって感情を表現し、行動の結果、感情発生要因が変化する。本研究では、どのような外部情報、内部情報のときに、どのような行動を行うことで感情を表現するのかを、Q-Learningを用いて学習する。

2·1 感情モデル

本研究ではE. T. Rolls[4] の感情モデルを基に、「喜び」、「怒り」、「恐れ」、「安らぎ」の4つを感情発生要因と考える。ここでは、感情発生要因を正の強化と負の強化に分け、それらの要因が存在するか、存在しないか、消滅するかによって4つの方向の感情を発生させる。以下に各感情と要因の関係について示す。

- 喜び：正の強化が存在する。
- 怒り：正の強化の消滅または正の強化がない。
- 恐れ：負の強化が存在する。
- 安らぎ：負の強化の消滅または負の強化がない。

2·2 神経修飾物質系

Q-Learningを含む学習システムにおけるメタパラメタ設定は、効率的な学習を行う上で非常に重要である。しかし、それらの設定を適切に行うことは難しい。このような問題に対して銅谷 [5] は、学習システムのメタパラメタ制御と脳内の神経修飾物質系の関係を示している。銅谷によると、強化学習におけるメタパラメタと神経修飾物質系との間において、代表的な神経修飾物質系であるドーパミン系と報酬予測の増減が、セロトニン系と報酬評価の時間スケールが、ノルアドレナリン系と動作選択の逆温度が、アセチルコリン系と学習速度係数がそれぞれ関連性があるとしている。本研究ではこれを基に、神経修飾物質系を用いたQ-Learningのメタパラメタ設定を行うことで、人間の感情発生機構に近いシステムを構築する。

神経修飾物質系には上記以外にもさまざまな種類が存在するが、本研究ではドーパミン系、ノルアドレナリン系、アドレナリン系、セロトニン系に注目する。これらの神経修飾物質系は以下の場合にその分泌量が増加する傾向があることが知られている。

- ドーパミン系：喜びを感じるとき
- ノルアドレナリン系：怒りを感じるとき
- アドレナリン系：恐れを感じるとき
- セロトニン系：安らぎを感じるとき

感情と神経修飾物質系とを関連付けることにより、感情の変化に伴い神経修飾物質系の分泌量が変化し、各

感情に対して適切にメタパラメタの制御を行うことができると考えられる。

3. 感情行動学習システム

本研究では、前述した感情モデル、神経修飾物質系の働きを用いて自律移動ロボットの感情獲得手法を提案する。以下に神経修飾物質系と感情およびメタパラメタの関連性、提案システムの学習の流れについて述べる。

3-1 神経修飾物質系と感情、メタパラメタの関連性

Q-Learning におけるメタパラメタには、強化信号 (ΔQ)、割引率 (γ)、ボルツマン温度 (T) などが存在する。以下に神経修飾物質系と Q-Learning のメタパラメタの対応を示す。

- ドーパミン系 : ΔQ
- ノルアドレナリン系 : T
- アドレナリン系 : $-\Delta Q$
- セロトニン系 : γ

神経修飾物質系と Q-Learning におけるメタパラメタおよび Rolls のモデルによる感情発生要因の対応づけにより、図 2 に示すような関係を導くことができる。

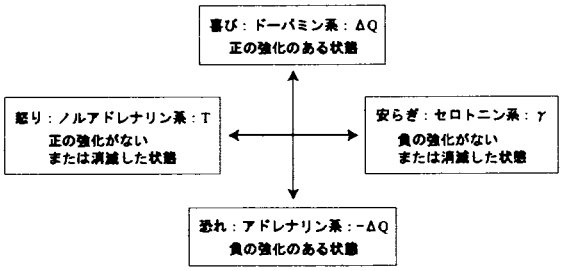


図 2 . 神経修飾物質系とメタパラメタおよび感情発生要因の関係

メタパラメタの設定を神経修飾物質系によって行うことで、神経修飾物質系に対応する感情が変化することにより、自律移動ロボットの感情を適切に表現する行動を学習することが可能になると考えられる。

3-2 感情行動学習

ここでは、自律移動ロボットの感情表現行動の具体的な学習方法について述べる。そのブロック図を図 3 に示す。

図 3 における、「情動」と「気分」について本研究では次のように考える。感情はその強さや持続時間によって「情動」と「気分」とに分けて考えることが多い。情動とは身体動作を伴うような強く、一時的な感情であり、気分は比較的長時間継続する弱い感情である。本研究では、図 2 によって決定される感情を「情動」と、「気分」はその積分値として定義する。以下にシステムの流れについて示す。

- step1 : 環境からの刺激によって感情発生要因が変化する。
- step2 : 感情発生要因の変化に伴い、神経修飾物質系の分泌量が変化し、情動、各メタパラメタが決定する。

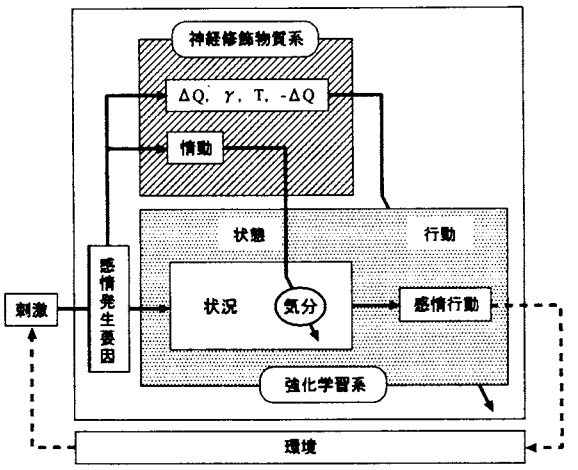


図 3 . 感情行動学習のブロック図

- step3 : ロボットは刺激に対する外部情報 (状況)、内部情報 (気分) を基に、とるべき行動を決定する。
- step4 : 決定した行動を行い、感情表現をする。

以上のような提案手法を用いることにより、発生する感情によって神経修飾物質系が変化し、感情に応じたメタパラメタ制御を行うことで感情を表現する行動を獲得できると考えられる。

4. おわりに

本研究では、神経修飾物質系による Q-Learning のメタパラメタ制御を用いた自律移動ロボットの感情獲得に関する一手法を提案した。今回は紙面の都合上掲載できなかったが、現在、本提案手法の有効性の検証を AIBO を使用した実験によって行っており、講演時にその結果についても報告する予定である。

参考文献

[1] 三輪 洋靖, 大口 哲也他 : "ヒューマノイドロボット用心理モデルの構築 -学習システム・気分ベクトル・2 次情動方程式の導入-," 第 20 回日本ロボット学会学術講演会予講集 CD-ROM, 2C16 (2002)

[2] T. Nakata, T. Sato and T. Mori : "Expression of Emotion and Intention by Robot Body Movement," Intelligent Autonomous Systems 5 (IAS-5), IOS Press, pp.352-359 (1998)

[3] 前田 陽一郎 : "ファジィルールを用いた基本心理ベクトルに基づく自律移動ロボットの感情生成実験," 日本ファジィ学会誌, Vol.12, No.6, pp.816-825 (2000)

[4] E. T. Rolls : "A theory of emotion, and its application to understanding the neural basis of emotion," Neural and Chemical Control, Japan Scientific Societies Press, pp.325-344 (1986)

[5] 銅谷 賢治 : "行動学習系のメタパラメタ制御と神経修飾物質," 数理科学, Vol.38, No.6, pp.19-24 (2000)

<連絡先>

〒 910-8507 福井市文京 3-9-1
福井大学大学院 工学研究科
システム設計工学専攻 秋口 俊輔
Tel & Fax : 0776-27-8050
E-mail : sakiguti@ir.his.fukui-u.ac.jp

スウェーデンにおけるアザラシ型メンタルコミットロボットの主観評価

産総研　柴田　崇徳，筑波大　和田　一義，産総研　谷江　和雄

Subjective Evaluation of Seal Type Mental Commit Robot in Sweden

Takanori SHIBATA*1, Kazuyoshi WADA*1,2, Tanie Kazuo*1,2

*1Intelligent Systems, AIST, *2University of Tsukuba

Abstract: This paper describes research on mental commit robot that seeks a different direction from industrial robot. The main goal of this research is to explore a new area in robotics, with an emphasis on human-robot interaction. We introduced a cat robot and a seal robot, and evaluated them by interviewing many people. In this paper, 133 subjects evaluated the seal robot, Paro by questionnaires in an exhibition at the National Museum of Science and Technology in Stockholm, Sweden. This paper reports the results of questionnaires.

1. はじめに

ロボット工学の新しい応用として、工場などで人の労働を補助することよりも家庭などにおいて人とインタラクションを行い、人の心に働きかけ生活を豊かにすることを目的とするロボット、感情的人工生物の研究開発を行っている[1]。感情的人工生物はペット動物のように、自律的に心や感情を持つかのように行動し、かつ人との触れ合いの相互作用により、人と情緒的交流をする。そして、人と視覚的あるいは身体的に触れ合うことを通して人に楽しみや安らぎを与える人工物である。その応用として、人の孤独感を解消し人の心を豊かにし、ストレスを癒すことを目的とするロボットの総称として「メンタルコミットロボット」を提案し、「猫形」および「アザラシ型」ロボットの開発を行ってきた[1]-[9]。

これまでに、アザラシ型ロボット「パロ」を筑波大学小児病棟へ導入し、動物の代わりにロボットを介在した精神療法、ロボット・アシステッド・セラピー（RAT）を行った[3]。アンケート調査や看護者の観察より、パロとの触れ合いによる子供たちの気分改善や、パロを介した子供同士や看護者とのコミュニケーションの活性化が見られた。

また、パロを老人介護施設の一種であるデイサービスセンターへ導入し、動物の代わりにロボットとの触れ合いを行うロボット・アシステッド・アクティビティ（RAA）を行い[4 - 7]、高齢者に対しても同様に効果があることを確かめた。

また、メンタルコミットロボットとのインタラクションにより人が受ける印象についても主観評価を行ってきた。これまで、2000 年 7 月から 8 月の 3 週間にわたり東京ビックサイトで開催された夢の技術展にパロを出展し、パロとのインタラクションを体験した観客に対して、パロの印象に関する複数の質問よりなるアンケートを用い調査を行った[8]。785 名より回答が得られ、すべての質問項目について高い評価を得た。さらに、2002 年 2 月から 3 月にかけて 7 週間にわたりイギリス、ロンドンの科学博物館にて開催された"Japan: Gateway to the Future, Digital Technology Exhibition"にパロを出展し、先の研究と同様に観客に対してアンケート調査を実施した。440 名より回答が得られ、日本と同様な高い評価を得た[9]。

今回、スウェーデン、ストックホルムの科学技術博物館にて開催されているロボット展へ 2003 年 5 月から 3 年間、パロを展示する機会を得た。ここでもこれまでの研究と同様に観客に対してアンケート調査を行った。本論文ではそのアンケート結果について報告する。

2. アザラシ型メンタルコミットロボット

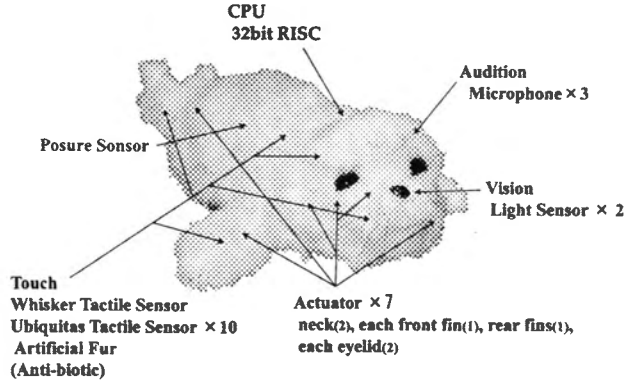


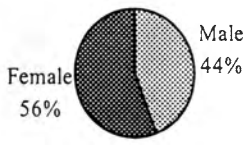
Fig.1 Seal Robot "Paro"

展示に使用したアザラシ型ロボット、パロは人との接触を重視して設計されている(Fig.1)。パロの外観は、身近ではない動物として、生後 3 週間だけ真っ白な毛で覆われている竪琴アザラシの赤ちゃんをモデルにし、白い柔らかな人工の毛皮で覆われている。病院などでの使用のため、毛皮には抗菌加工や抜け毛防止などを施してある。パロは感覚として触覚、視覚、聴覚、平衡感覚を持つ。触覚として人へ柔らかさを提供するために面触覚センサーを開発し、頭部、前後のひれ、背中に複数内蔵している。視覚として２つの光センサーを頭部に内蔵し、光の方向や強さを認識している。聴覚は頭部に 3 つのマイクを内蔵し、音の方向や強さ、自分の名前や挨拶など単語レベルでの認識が可能である。平衡感覚は姿勢センサーを本体に内蔵し、人に抱かれた場合の自己姿勢を認識できる。動きでは 7 つのアクチュエータを使用し、左右まぶたの独立開閉、首の上下・左右、左右前ひれ、後ろひれの駆動を実現した。音声として、デジタルサンプリング後加工したアザラシの赤ちゃんの鳴き声を複数用いている。またパロの重量は約 3[kg]である。

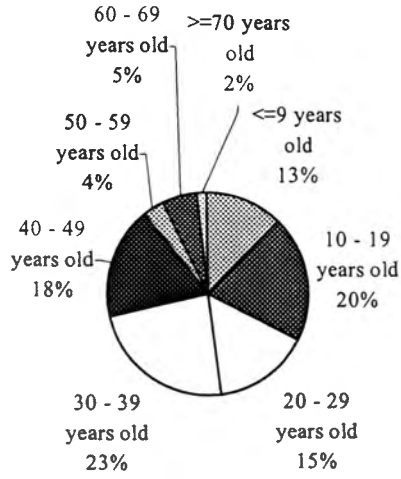
3. 主観評価の方法

2003 年 5 月から 3 年間、スウェーデン、ストックホルムの科学技術博物館にて開催されるロボット展へパロを出展している。今回、現地の多くの人々からパロに対する印象や意見等を得る目的で、アンケート調査を行った。

ステージでは専属の説明者により毎週末、1 日に 1 回から 3 回のデモンストレーションを実施し、メンタルコミットロボットの開発の経緯、目的、機能などの説明を行った後に、実際にパロとのインタラクション時間を設けた。



(a) Distribution by Gender



(b) Distribution by Age

Fig.2 Proportion of Gender, Age, and Nationality of Respondents

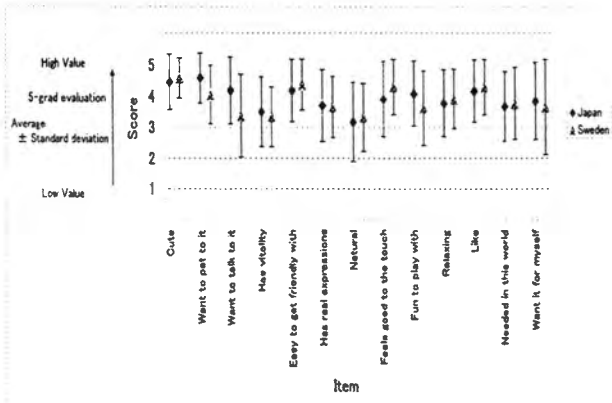


Fig.3 Average and Standard Deviation of Answers to 13 Questions about Subjective Evaluation in Stockholm, Sweden (111 sheets) and Tokyo, Japan (641 sheets)

デモンストレーションの間、パロを机の上に置き、ステージに訪れた観客は自由にインタラクションを行った。アンケートはインタラクションを終えた観客に対し順次依頼し、了承された人に対してのみ実施した。5､6 月中の週末にアンケートを実施し、7 日間で 133 枚の回答を得た。

アンケートはスウェーデン語で記載され、その質問内容は大きく分けて、回答者自身に関する質問、SD 法による官能評価のための質問の 2 つに分類される。回答時間は個人差はあるものの、約 5 分から 10 分を要した。訪れる観客には小さな子供も多く、その様な場合には親の協力を得てアンケートを実施した。

デモンストレーションはステージに訪れた観客が自由にインタラクションを行えるように、パロを自由に触れる状態で机の上に設置した。ステージ前が大変混み合うこともあったが、デモンストレーションには毎回約 30 分の時間を設け、できるだけ多くの人に順番にインタラクションを体験してもらった。インタラクションとしては触ったり、撫でたり、という行為が中心であり、女性の中には抱き抱えたりする姿も見られた。その他、名前を呼びかけたり、顔を近づけたりする様子が見られた。

4. 結果と考察

Fig.2 (a),(b)にＳＤ法による官能評価すべてに回答した 111 人の性別、年齢を示す。また Fig.3 にスウェーデン、ストックホルムの科学技術博物館で行った官能評価と先に東京ビックサイトで行った官能評価の各項目の平均値と標準偏差を示す。これよりスウェーデンにおいても項目全般に評価がよく、特に項目"Cute"、"Easy to get friendly with"、"Feels good to the touch"、"Like"は高い評価が得られている。この結果は、先に東京ビックサイトで行った研究結果と非常によく似ている。

5. 結論

スウェーデン､ストックホルムの科学技術博物館にて開催されているロボット展へアザラシ型ロボット､パロを出展している。パロとインタラクションを行った観客に対しアンケート調査を実施し､先に日本で行った主観評価と同等の高い評価を得た。イギリス、ロンドンで得られた同様の官能評価との比較に関しては別の機会に報告する。今後、ここで得られた結果をもとにロボットの改良を行い､主観的評価の高いロボットの開発を目指す。

参考文献

[1] T. Shibata, K. Inoue, and R. Irie : "Emotional Robot for Intelligent System - Artificial Emotional Creature Project," Proc. of 5th IEEE Int'l Workshop on ROMAN, pp. 466-471, 1996.

[2] 柴田 : "人の心を癒すメンタルコミットロボット"，日本ロボット学会誌, vol.. 17, no. 7, pp. 943-946, 1999.

[3] T. Shibata, T. Mitsui, K. Wada, A. Touda, T. Kumasaka, K. Tagami, K. Tanie : "Mental Commit Robot and its Application to Therapy of Children," Proc. of the IEEE/ASME Int'l Conf. on AIM'01 (July. 2001) paper number 182 and 6 pages in CD-ROM Proc.

[4] K. Wada, T. Shibata, T. Saito, K. Tanie, Robot Assisted Activity for Elderly People and Nurses at a Day Service Center, Proc. of the 2002 IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, pp.1416-1421, 2002.

[5] T. Saito, T. Shibata, K. Wada, K. Tanie, Examination of Change of Stress Reaction by Urinary Tests of Elderly before and after Introduction of Mental Commit Robot to an Elderly Institution, Proc. of the 7th Int. Symp. on Artificial Life and Robotics Vol.1 pp.316-319, 2002.

[6] K. Wada, T. Shibata, T. Saito, K. Tanie, Psychological and Social Effects to Elderly People by Robot Assisted Activity at a Health Services Facility for the Aged, Proc. of Joint 1st International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 3rd International Symposium on Advanced Intelligent Systems, paper number 23Q1-3, in CD-ROM Proc., 2002

[7] T. Saito, T. Shibata, K. Wada, K. Tanie, Change of Stress Reaction by Introduction of Mental Commit Robot to a Health Services Facility for the Aged, Proc. of Joint 1st International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 3rd International Symposium on Advanced Intelligent Systems, paper number 23Q1-5, in CD-ROM Proc., 2002

[8] T. Shibata, T. Mitsui, K. Wada, and K. Tanie, Subjective Evaluationof Seal Robot: Paro -Tabulation and Analysis of Questionnaire Results, Jour. of Robotics and Mechatronics, Vol. 14, No. 1, pp. 13-19, 2002.

[9] T. Shibata, K. Wada, and K. Tanie, Tabulation and Analysis of Questionnaire Results of Subjective Evaluation of Seal Robot at Science Museum in London, Proc. of the 2002 IEEE Int. Workshop on ROMAN, pp.23-28, 2002

記憶シェマの動的構築による運動観察からのファジィ概念獲得

Acquiring Fuzzy Concepts on Observed Motions by Dynamic Construction of Memory Schemata

谷口 忠大
TadahiroTaniguchi
京都大学工学研究科
Graduate School of Engineering, Kyoto University

椹木 哲夫
Tetsuo Sawaragi
京都大学工学研究科
Graduate School of Engineering, Kyoto University

Abstract: In this article, a new machine-learning method we call Dual-Schemata model is presented. Dual-Schemata model is a kind of self-organizational machine learning methods, that is based on Piaget's Schema theory. Schema is a model to explain a memory and cognitive development of a human being, and we develop it as a Dual-Schemata model by modifying this. Then, we show an experimental result, in which we apply this model to a face robot. In the experiment, we show a kind of fuzzy concepts emerge inside of an autonomous facial robot through its interaction with the environment. We discuss this result in terms of a robot's self-organizational learning process of symbols.

1. 緒言

近年、人間との共生を志向した自律ロボットの開発が盛んである。 Sony の AIBO や SDR、iROBOT の ROOMBA、HONDA の ASIMO など例にはきりがない。しかし、その裏で活動のドメインとなる人間社会は複雑で謎に満ちている為、現在の人工知能技術では限界も自ずと明らかである。将来的に人間社会において柔軟な活動を可能とする自律ロボットの開発を目指すためには、その人間社会を構成する人間・環境の要因を考慮した、フリキシビリティのある人工知能設計論の展開が必要である。我々は、そのような立場に立ち、人間や環境との自然なインタラクションの中から記号接地性の高い学習を可能とする機械学習パラダイムの展開を目指している。

本稿においては、認知発達について著名な心理学者 J.ピアジェのシェマ(schema)モデルについて説明した後に、我々の提案する双シェマ(Dual-Schemata)モデルについて説明し、その後に双シェマモデルを用いて行った自律ロボットの学習実験において、外界との相互作用を通して、外部からの教師信号を一切必要とせずに、自立的な判断でシェマを分化させることにより、自律ロボットが階層関係まで含めた複数個の内的表象を獲得することが出来ることを示す。

2. ピアジェのシェマ(shema)理論

J.ピアジェは 1940 年代において、既に認知発達における自己組織化的な過程を理解していた。その基本的なモジュールとして考えられていたのがシェマ（schema）という概念である。シェマは人間の認識を構成するモジュールで、その同化・調節・分化などの動的側面は、生体における細胞にも似たイメージで理解される存在である。

シェマは以下の二つの二項対立で特に特徴付けられる。一つ目が同化と調節で、二つ目が均衡化と分化である。同化はシェマに外界からの情報を取り込む作用であり、外部事象をどのシェマに入れるかという作用がこれにあたる。また、調節は外部事象を取り込むためにシェマ自体を変化させる作用である。この二つを繰り返して行うことにより、認知主体の内部に存在するシェマは外部環境に沿った形に維持される。これが均衡化の作用である。しかし、あまりそのシェマとかけ離れた新規な情報が入ってきた場合には新たにシェマを作り出し分類する必要がある。この作用が分化である。これらを繰り返し行うことにより、認知主体は外界と自らの身体とのインタラクションを通して感覚運動時期における認知発達を遂げていく。これらのダイナミクスを通して認知主体は教師依存の受動的な過程ではなく、自発的、能動的な過程で外界と認知主体の関係における差異体系を獲得していくことが出来る。

これらは近年の身体性認知科学の言葉で言い換えれば、「外界とのインタラクションを通した、身体性に基づく記号概念の自己組織化メカニズム」ということになる。我々はこのモデルに若干の修正を加え双シェマモデルとして計算機モデル化し機械学習理論への応用を行う。

3. 現在の機械学習理論

現在の機械学習理論における学習システムとはそ

の多くが明示的、もしくは暗示的な目標の下に入力から出力の関数を最適化していくという画一的なパラダイムの上に乗っている。ニューラルネットの逆誤差伝播法や、強化学習のQ-学習、ＧＡにおける最適化なども全てそうである。このような学習においてはどこかに必ず、"真の知識"を有しているデザイナの存在を仮定するため、我々人間の学習過程を十分に表現しているとは言いがたい。また、コホーネンの自己組織化マップ(SOM)などは教師を仮定しない自己組織化過程によりクラスタリングを行うが、そのクラスタリングの理由付けが初期設定しているパラメータの中に潜んでおり、学習主体の能動的な意味付けの行為が特に議論されていないいないため、現段階では自律ロボットの為の十分に有意義な方法論であるとは言い難い。

これらに対して我々は特に感覚運動的な学習についての資源は、学習を行う主体の外界との相互作用の<文脈>と自らの<身体性>、及び自己の中で情報の記憶における<資源的制約>の３つが中心であると考えている。これらはピアジェの認知発達観と符合する考え方である。この考え方に基づき、自律ロボットが外界とのインタラクションを通して、主体と外界との関係性の中に存在する差異体系を学習していく自己組織化学習システムとして双シェマモデルを提案する。

4. 双シェマモデル(Dual-Schemata model)

まず、自律ロボットのシステムは何らかの知覚系としてのセンサ類と行為系としてのモーター類を持っているとする。ここで言う、センサ類とは映像入力、音声入力、接触センサ入力、温度入力などであり、それらは何らかの特徴抽出フィルターを通して有限次元の実数値ベクトルとして内部の処理系に渡される。そして、内部処理系における意思決定を経て、行為出力は数次元の実数値ベクトルとして出力され、それがやはりフィルターを通してモーター類において実際の動作出力として具現化する。この仮定の下、自律ロボットシステムにおいて、時刻ｔに行為系に対し内部処理システムから出力されるベクトルを行為ベクトル A_t とする。また、知覚系から内部処理系へと入力されるベクトルの次元を知覚ベクトル S_t とする。ここでパースの記号論に示唆を得、対象の概念とは「我々がそれに対していかに行為をするか、また、その結果は何かということである」と考える（プラグマティズムの格律)。つまり、言い換えれば行為・知覚の循環の中における関係性として対象の「意味」と捉える。これは最も原始的な形では、$U_t=(A_t,S_t,S_{t-1})$の三項間の関数関係であると言える。よって、$F(S_t,S_{t+1})=A_t$ を満たすような F をして外界に存在する対象の表象とする。

次に、ピアジェのシェマを、新たに行為シェマ、知覚シェマの二つに分割して考える（双シェマ)。それぞれは複数個存在し、ロボットの認知的状態は常にその組み合わせうちいずれかの活性化と考える（知覚シェマは２番で行為シェマは３番と、言ったように)。これをシェマ状態とよぶ。また、それぞれのシェマはその内部に一つづつ関数を持っている。それぞれ以下である。

・知覚シェマ: $\hat{F}=(F,\alpha): A_t = F(S_t, I_{t+1}) + \alpha\delta_t$

・行為シェマ: $\hat{G}=(G,\beta): I_{t+1} = G(S_t) + \beta\delta_t$

ここで、δ_t は[0,1]の実数値乱数である。また、I_t は行為シェマが決定する、時刻ｔにおいて主体が知覚ベクトルとして獲得したいと計画する値である。つまり理想的な状況では $S_{t+1} \fallingdotseq I_{t+1}$ となる。また、特殊な行為シェマとして、無知覚行為シェマと言うものを定義する。(α, β はここで不確実さを表す定数である。また $\hat{F}$,F についてハット記号のついているものはシェマ自身を、ハットのついていないものはシェマが持っている関数を指す。)

・無知覚行為シェマ: $\hat{G}_a=(G_a,\gamma): A_t = G_a(S_t) + \gamma\delta_t$

これは外界についてのモデルを参照せずにする行為決定の表現である。いま、主体が知覚シェマ $\hat{F}$、行為シェマ $\hat{G}$ の活性状態にあるとき、外界からの入力 S_t に対して上式から行為ベクトル $A_t=F(S_t,G(S_t))$ を選択する。これより、ピアジェのシェマが「行動のプログラム」と呼ばれるのに対して，双シェマは行為シェマと知覚シェマの組み合わせでもって「行動のプログラム」と呼べるものになる。さらに、ここで知覚シェマは上で定義した、外界に存在する対象の表象としての形式をもっている。すなわち、現在の U_t が知覚シェマの関数 F を満たすかどうかが、シェマが外界を表象する記号として機能するか否か（同化）に相当する。つまりモデル誤差 $(A_t-F(S_t,S_{t+1}))^2$ の値が小さければ、その対象は知覚シェマの $\hat{F}$ カテゴリに属すると考えられる。

次に、各シェマ状態に対して、キュー構造の記憶容量を設ける。ここではそのシェマ状態にあった時に経験した U_t を順に格納していく。そして、F は常にその格納されたサンプルを最小誤差で近似できるように関数最適化を行い続ける（調節)。

上までがシェマ均衡化のプロセスの説明である。次に概念の分化のプロセスについて説明する。まず、時刻ｔにおけるモデル誤差を時刻ｔにおける各シェマ状態のキュー記憶構造に含まれるサンプルのモデル誤差平均で割ったものを信頼変数 R_t と定義する。シェマの均衡化が進んでいった段階（シェマ状態におけるモデル誤差平均が減少していく）で急に対象が変化した場合、知覚シェマはその振る舞いを記述しきれず、大きなモデル誤差を生み、信頼変数 R_t

を増大させる。この誤差はFの調整が十分に進んでいないための誤差ではないかと考えられるかもしれないが、Fの調整が十分でない場合、R_tの分母が一般的に同じ次元で大きくなるので、分子の急激な増加は相殺されR_tの増加の原因としては除外される。こうしてR_tの増加を見ることでシステムは外部系に何らかの変化が生じたことを認識することが出来る。そして、十分な確信を得た段階で他の知覚シェマにシェマ状態を移行すべきかを自律的に判断する。これはシェマで言えば、別のシェマに同化するか、もしくは新しいシェマを作り、そのシェマに同化するかの判断である。この判断によりシェマの分化がトリガされる。その具体的な判断、制御にはAlert-Counterと名づける変数を用いる。Alert-Counterは下の更新則に従い更新される。

- $R_t \geq 3.0 \rightarrow Alert-Counter$に2加算
- $3.0 > R_t \geq 2.0 \rightarrow Alert-Counter$に1加算
- $2.0 > R_t \geq 1.0 \rightarrow Alert-Counter$に1減算
- $R_t \leq 1.0 \rightarrow Alert-Counter$に2減算

そして、Alert-Counterによる知覚シェマの制御は以下の二つのルールで行われる。

- 現存する知覚シェマの中でAlert-Counterがρ_{turn}以下の最も古い知覚シェマ番号が若いものに常に移行する。
- 現在の知覚シェマにおいてAlert-Counterがρ_{max}に達したら新しい知覚シェマを作って、それに移行する。

このAlert-Counterは0からρ_{max}の間の値を変化するパラメータで、R_tが大きくなれば増加、小さくなれば減少する。その大きさが、現在の知覚シェマで外界を記述できていない危険性を知らせる。ここで、ρ_{turn}、ρ_{max}（$\rho_{turn} < \rho_{max}$）は警戒変数(vigilance parameter)と呼ぶものであり、この値を調整することにより、学習主体の学習態度，すなわち既存知識への偏向（バイアス）の大小の程度、を決定する事ができる。

このようなメカニズムで外界に、より正確に言うならば、自らの知覚・行為と言った身体活動を通じて外界とのインタラクションの中で感じられる現象の中に、存在する差異体系を学習主体の判断で切り分け内化することができると考えられる。

5. 実験

前節で紹介した、双シェマモデルを実装した顔ロボットを用いて、青い球を追いかける学習をする中でその運動状態を識別できるようになることを示す。

まず、実験においてはTRACLabs A division of Metrica社製のカメラ制御装置Biclopsに市販のLogicool社製のUSBカメラ二基を取り付けたものを「顔ロボット」と名づけ実験を行った。顔ロボットはPan、Tiltの二方向について合計二次元の自由度を持っている。

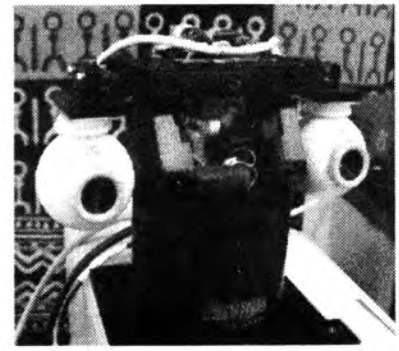


図1 顔ロボット

まず、カメラのRGB値による信号入力を各座標において、HLS値に変換し、次に色相がいかに青に近いかでファジィ真理値化した。次に、青球の中心座標のベクトルを出すために、画面の右上端を(1,1)、左下端を（0、0）としたx、y座標について、上に述べたファジィ値のスカラー場としての重心を求め、それをV(t)=(Vx(t),Vy(t)）として得た。これを10fpsのフレームレートで行った。また、青球が時刻tにおいて画面上に存在しない場合は、その1フレーム前のV(t-1)についてVx(t-1) 0.5ならばVx(t)=1、Vx(t-1)<0.5ならばVx(t)=0、とする。また、Vyについても同様にする。また、時刻tにおける行為ベクトルAtとして$A_t=(Ax_t,Ay_t)$ $1 \geq A_x, A_y \geq 0$の2次元ベクトルとする。そして、行為ベクトルから実際のpan、tiltの角度の変化には以下の式を用いて更新した。

$$\Delta tilt(t) = 32 \times (A_{yt} - 0.5) \quad \Delta pan(t) = 32 \times (A_{xt} - 0.5)$$

また、panとtiltの絶対値の上限は30度とし、それぞれ30度を超えるときは、それ以内に収まる行為ベクトルを選択しなおさせた。

また、時刻tにおける知覚ベクトルS_tとして、V(t),V(t-0.1),V(t-movetime),とA_{t-1}の4つの2次元ベクトルからなる8次元ベクトルを採用した。ここでmovetimeは前回ロボットが動作した時刻から現在の時刻の差である。また、StやAtについてt+1というときはロボットが次の動作を終えた時間をさし、V（t）など括弧がついているもののtは実時間をさす（単位は秒）。

次に、ＰＣ上で青球を動かすプログラムを設計し、プロジェクターを使って壁面に投影することにより、顔ロボットが追うべき青球とした。まず球を２０分間、静止させ、次に横運動、縦運動、円運動と遷移させた。

	行為シェマ	関数
1	Random-mode (無知覚行為シェマ)	$A_t = \hat{G}_{\alpha}(S_t) = \delta_t \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$
2	Search-mode	$I_{t+1} = \hat{G}(S_t) = \delta_t \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$
3	Chase-mode	$I_{t+1} = \hat{G}(S_t) = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{pmatrix}$

表 1 行為シェマのリスト

このあいだ、行為シェマを表 1 のそれぞれを 1→2→3(→1)の順番で一定時間づつ遷移させつづけた。その後に、また 10 分間づつ同じ順で見せた。この結果、顔ロボットは 4 種類の軌道全てについて追跡することが可能になった。またその過程において各 Alert-Counter は図 2 のように遷移した。これより、球の運動状態に相当する概念を獲得できたことを示している。

さらに、この Alert-Counter の値は以下の変換式によってファジィ集合におけるメンバシップ関数として意味を持つ。

$\Psi = (\rho_{max} - \text{Alert-Counter}) / \rho_{max}$

ここで、各時刻においての外部対象を全て異なる元としてサポート集合を定義しておく。このメンバシップ関数を用いることで、図 5 のような包含関係が成立することまで観察された。これは一般に恣意的に決定するより他無いと考えられがちなメンバシップ関数が自律ロボットの身体性に根付いた形で立ちあらわれてきた例であり、非常に興味深い。

6. 考察とまとめ

以上の議論の延長として, 現在我々は学習と認知発達は不可分であり、学習で得られる知識とは常に自らの経験、理解の中に接地されなければならないと考えている。今後はさらに外界に対して受動的な学習のみならず、行為シェマをアプリオリなルールでなく、自らの判断切り替え、能動的な学習を行っていくようなシステムへと進化させていく。また、内的に獲得された記号が他者とのコミュニケーションを通じて、どう変化していくべきかについてもアプローチしていく。

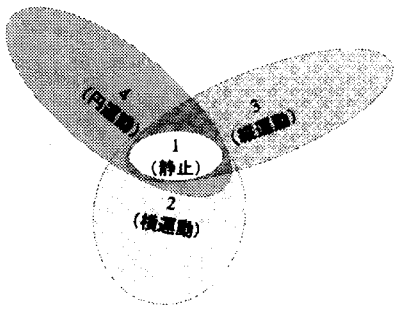


図 5 概念の包含関係

参考文献

[1] R.Pfeifer,C.Scheier:「知の創成」,共立出版(2001)

[2] John H.Flavell:「ピアジェ心理学入門」,明治出版

連絡先

〒606-8501
京都市左京区吉田本町
京都大学工学研究科精密工学専攻
物理工学系校舎 707 室
谷口 忠大
電話: 075-753-5044
FAX: 075-753-5233
Email: tanichu@groove.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

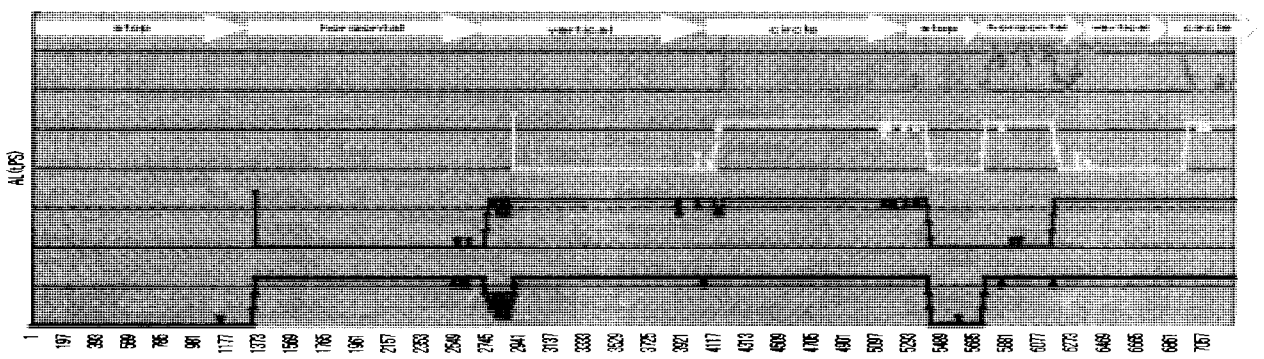


図 4 Alert-Counter の遷移

経営分野英文資料の計量言語学的特徴

Metrical Characteristics of English Materials for Business Management

○伴 浩美[1] 古田 啓[2] 坂元 章[2] Toby Dederick[3] 大藪 多可志[4]
Hiromi BAN Kei FURUTA Akira SAKAMOTO Toby DEDERICK Takashi OYABU

[1]富山国際大学 [2]お茶の水女子大学 [3]北陸大学 [4]金沢星稜大学
[1]Toyama University of International Studies [2]Ochanomizu University [3]Hokuriku University [4]Kanazawa Seiryo University

Abstract : Today, as globalization is progressing, the knowledge of business management has become more and more important. Research of management has been done briskly in the United States, and thus, reading materials in English is indispensable. In this paper, we investigated some English books on management written by Robert C. Newbold and Eliyahu M. Goldratt. In short, frequency characteristics of character-appearance and word-appearance were investigated using a program constructed by C++. These characteristics were approximated by an exponential function: [$y = c \cdot \exp(-bx)$]. Furthermore, we calculated the percentage of Japanese junior high school required vocabulary to obtain the difficulty-level, as well as the K-Characteristic. As a result, it was clearly shown that the values of coefficients c and b for the materials on management are high and they are easier to read than *The Economist* and *TIME*.

1. まえがき

グローバル化が進む今日, 各国の経済・経営は相互依存の度を深めており, 特に経営学分野の知識が必要とされてきている。経営学はアメリカに於いて非常に進歩しており, そのため, 経営学を学ぶ際には, 英文の資料読解が不可欠であると思われる[1]。その分野の英文の特徴をあらかじめ熟知しておくことにより, 文章の読解が容易になると考えられる。

本研究では, Robert C. Newbold 氏による, 発行部数が多い *Project Management in the Fast Lane* を中心に, 経営学の英文にはどのような特徴が見られるのか, 有力な経済誌である *The Economist* と比較しながら, 計量言語学的な分析を行ってみた。

2. 解析方法と結果

本研究において解析した試料は以下の通りである。

試料 1: Robert C. Newbold, *Project Management in the Fast Lane: Applying the Theory of Constraints* (1998)
試料 2: *The Economist* (Jan. 4th-10th, 2003)

なお, 解析プログラムは C++で構成されている[2]。

まず, 使用頻度の高い文字と単語の種類とそれらの頻度を調べた。上位 50 位までを頻度の高い順に, 縦軸は頻度の度合い, 横軸は順位で, 片対数でプロットした。各頻度特性曲線を,

$$y = c \cdot \exp(-bx) \qquad (1)$$

で指数近似を行った[3]。得られた係数 c, b の値を, 文字については Fig. 1 に, 単語は Fig. 2 に示す。以前報告を行った Eliyahu M. Goldratt 氏による *The Goal* (1992) と, その続編の *It's Not Luck* (1994), さらに, 著者らが種々比較の基準としている *TIME* 誌の 2003 年 1 月 13 日号の解析結果も併せて記す[2]。

まず, 文字の場合, 経営学の 3 試料, 続いて経済誌の c と b が共に *TIME* 誌より高くなっている。前報において著者らは, 係数 c と b には正の相関が見られ, ジャーナリズムは係数の値が低く, 文学作品は高い傾向にあることを示した[3]。従って, 経営学の試料, 特に Newbold の著書には文学作品に近い傾向があると言える。一方, 単語について見てみると, c の値については経済誌が最も高く, 経営学の試料は *TIME* 誌より若干高い値を取っている。経済誌は b の値も *TIME* よりやや高くなっているが, 経営学の英文では b の値は *TIME* よりも低い値を取っていることが明らかとなった。

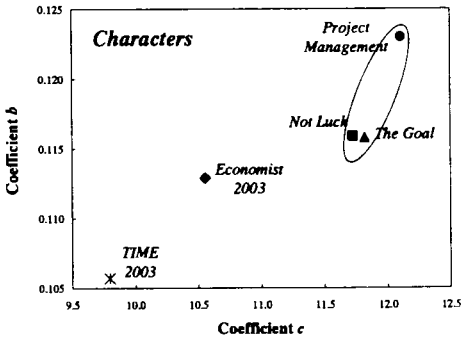


Fig. 1 Dispersions of coefficients c and b for character-appearance.

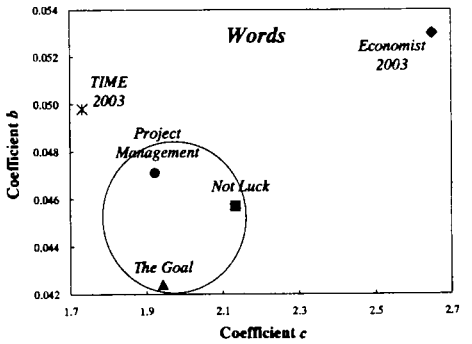


Fig. 2 Dispersions of coefficients c and b for word-appearance.

その他の計量的数値を調べてみた。その結果を Table 1 に記す。まず, 平均単語長は経営学の試料が 5.261 字～5.830 字と, 経済誌 (5.937 字) や *TIME* (5.853 字) より若干短くなっている。一文当たりの単語数も Goldratt 氏の 2 作品が 12 語程度, Newbold 氏は 18 語程度と, 20 語を超

Table 1 Metrical characteristics of each material.

	Project Management	*The Goal*	*Not Luck*	*Economist 2003*	*TIME 2003*
Total num. of characters	359,804	633,036	435,861	297,739	163,880
Total num. of character-type	85	80	79	80	82
Total num. of words	61,715	120,333	80,354	50,150	27,998
Total num. of word-type	4,798	7,484	5,859	8,665	7,083
Total num. of sentences	3,406	9,440	6,459	2,313	1,123
Total num. of paragraphs	709	4,610	2,795	599	284
Mean word length	5.830	5.261	5.424	5.937	5.853
Words/sentence	18.119	12.747	12.441	21.682	24.931
Repetition of a word	12.863	16.079	13.715	5.937	3.952
Commas/sentence	0.876	0.796	0.741	1.271	1.389
Sentences/paragraph	4.804	2.048	2.311	3.861	3.954
Freq. of prepositions	13.902	14.235	12.808	16.006	14.641
Freq. of relatives	2.823	3.033	3.846	2.341	2.404
Freq. of auxiliaries	2.792	1.180	1.681	1.404	1.125
Freq. of personal pronouns	5.174	11.807	12.462	3.496	5.375
Difficulty (*Dws*)	0.925	0.938	0.924	0.952	0.941
Difficulty (*Dwn*)	0.444	0.376	0.377	0.504	0.516
Difficulty (prin. comp. score)	-0.0006	-0.0668	-0.0673	0.0620	0.0727
K-Characteristic	89.605	82.263	82.720	81.589	70.269

える *TIME* や *The Economist* よりかなり少なく，これらの点から考えると，経営学の資料の方が読み易いものと思われる。また，経営学の 3 試料いずれも，*The Economist* と *TIME* よりも前置詞の頻度が若干低く，関係詞の頻度がやや高い傾向が見受けられた。

英文の難易度を日本の中学校必修単語 508 語を基に求めてみた。難易度を表すパラメータには，単語種数からの難易度(D_{ws})と単語数からの難易度(D_{wn})を考慮する。これらは，全単語数(n_t)，全単語種数(n_s)，日本の中学校での必修単語数(n_{rs})，各必修単語数($n(i)$)とすると，

$$D_{ws} = (1 - n_{rs} / n_s) \qquad (2)$$

$$D_{wn} = \{1 - (1 / n_t \cdot \Sigma n(i))\} \qquad (3)$$

より求められる。表中の値は 1 に近づくほど難易度が高くなることを示している。さらに適切な指数を得るために，D_{ws}, D_{wn} を変量として主成分分析を行い，主成分得点を求めた。その結果，*TIME* が最も難しく，*The Economist* がそれよりも若干易しく，比較的易しい経営学の試料の中でも Goldratt 氏の *It's Not Luck* が最も難易度が低いことが明らかとなった。

単語の特徴を表す方法として，統計学者の Undy Yule が 1944 年に，作家の語彙量を測る K-Characteristic（K 特性値）と呼ぶ指標を提案した[4]。この K 特性値は，或る作品の中に x_i 回使用された単語が f_i 個あるとすると，$S_1=\Sigma x_i f_i$, $S_2=\Sigma x_i^2 f_i$ として，次のように定義される。

$$K = 10^4 (S_2 / S_1^2 - 1 / S_1) \qquad (4)$$

表より，*TIME* が 70 程度で最も低く，*The Economist*, *The Goal*, *It's Not Luck*, *Project Management* の順に高くなっている。この順序は先述の文字の係数 b の値の順序と一致しており，K 特性値と文字の係数の関連性については今後の課題である。

次に，経営学辞典を用いて，各試料に含まれている専門用語を調べてみた[1]。その結果，試料 1 では PROJECT (0.706%), TASKS (0.538%), RESOURCE (0.429%) が上位 3 語であり，試料 2 では BUSINESS (0.116%), FIRMS (0.104%), POLICY (0.096%) の順となっている。高等教育等の現場に於いて，この様な頻度の高い専門単語を事前に教示することにより，英文が読み易くなるものと思われる。

3. まとめ

経営学の専門書として発行部数が多い Robert C. Newbold 氏の *Project Management in the Fast Lane* を中心に，*The Economist* 誌等と比較しながら，経営分野英文資料について統計的な解析を行った。結果として，文字の係数 c, b の値が比較的高く，難易度は経済誌や *TIME* 誌より若干低いことが明らかとなった。

今後は，解析結果の高等教育等の教育現場への応用の実践を行う予定である。

参考文献

[1] 伴，古田，坂元，T. Dederick，大藪："経営学専門書の計量的解析と教育への応用" 平成 14 年度日本設備管理学会秋季研究発表大会論文集, pp. 69-72 (2002.12)

[2] H. Ban, T. Dederick and T. Oyabu: "Linguistical Characteristics of Eliyahu M. Goldratt's "The Goal" " Proceedings of the Fourth Asia-Pacific Conference on Industrial Engineering and Management Systems, pp.1221-1225 (Dec. 18-20, 2002, Taipei, Taiwan)

[3] 伴，古田，坂元，T. Dederick，大藪："テクニカル・コミュニケーション能力評価テストの計量的解析" 平成 15 年電気学会全国大会講演論文集，第 1 分冊, p.6 (2003.3)

[4] Yule, G.U.: The Statistical Study of Literary Vocabulary, Cambridge University Press (1944)

[問い合わせ先]

〒930-1292 富山県大山町東黒牧 65-1
富山国際大学・人文社会学部
伴 浩美
Tel: (076)483-8000 Fax: (076)483-8008
E-mail: je9xvp@yahoo.co.jp

シナリオを対象とした構文解析規則記述法

A Description Method of Syntactic Rules on Filmscripts

黒澤 義明　　市村 匠　　相沢 輝明
Yoshiaki KUROSAWA, Takumi ICHIMURA, Teruaki AIZAWA
広島市立大学　情報科学部
Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University

Abstract: The purpose of this paper is to propose a description method of syntactic rules, particularly, to manage manually. Certainly, statistical approaches for analyzing syntax have developed to aim the decrease of our analysis cost, but they do not consider modifying some errors and handling many fashions of speech. Therefore, we adopt the traditional rule-based approach allowing us to describe regular expressions, and focus on the appropriate decrease of the number of rules and the definition of their optimal structures.

1 はじめに

近年，統計による学習を用いた研究の進展により，形態素解析・構文解析等，自然言語処理技術の向上が著しい．統計的手法による利点は，人的あるいは時間的コストが小さく，高精度の解析が期待できることである．このため構文解析では，括弧付き等様々なコーパスから，規則の自動学習が進められている．

一方，人手によって規則の修正を行う伝統的なアプローチは，個別の例文に対して規則を導入することが出来る反面，規則収集，パラメータ調整などに時間がかかる等，人的コストの観点から現在ではあまり行われていない．しかし，話し言葉などのようにコーパスが整備されていない分野での初期作業では，人的コストから逃れることが出来ない．そこで，本研究ではコストを減らす規則記述法について検討を加える．

2 構文解析

近年，構文解析に必要な規則を自動で獲得する研究が多く行われている．文脈自由文法（以下，CFG）で記述される規則を自動で獲得することを目指す研究である．さらに，このCFGを用いて，コーパス中の出現確率を計算することにより，確率的文脈自由文法に拡張する．こうした自動獲得の利点は，人的コストが低いことであり，多くの研究がこの枠組みで行われている[1]．

しかし，研究の多くは書き言葉に対してなされており，話し言葉についてはタグつきコーパス等が統計学習に十分なだけ整備されていない[2]．したがって，規則の手動構築等が，コーパス整備に必要となる．

規則手動構築アプローチは，パラメータ調整に時間がかかる等，人的コストがかかる．例文「来るらしい」を品詞で表現すると「動詞/助動詞」となる．更にテンス，モダリティなど，様々に文末要素が付加されると，品詞列が変化する．例えば，「来たらしいよ」は，「動詞/助動詞/助動詞/終助詞」と表現され，「来なかったですよね」は，「動詞/助動詞/助動詞/助動詞/終助詞/終助詞」と表現される．したがって，これらの品詞列を満たす規則は，異なる別の規則となり，これらの規則の重み等を考慮する必要が生じるため，コストが増す．

しかし，上述の規則は，次のように言い換え可能である．「動詞の後ろに，助動詞や終助詞が繰り返されている」．こうした直感的な書き方が出来れば，上に挙げた品詞列を全て満たし，規則を減らすことが出来るため，人的な管理コストを下げることが可能となると考えられる．

そこで本研究では，規則数を減らすと同時に，構造化を行うことで人的コストを減らす記述法を提案する．また，この記述法に従った規則を作成し，考察を加える．特に話し言葉にも対象を広げるため，シナリオを用いた検討を行う．

3 規則記述

前章に挙げたように,本研究は,「動詞の後ろに,助動詞や終助詞が繰り返されている」等の表現を用いて,規則数を減らすことを試みる.具体的に言えば,生成規則に正規表現記述を導入する.

3.1 規則記述

Fig. 1に示す形式で記述する.規則は 3 行より構成されており,1 行目より"主規則部","副規則部","効果部"と呼ぶ.なお,本研究の規則は,形態素解析器"茶筅"[3]の出力に対して実行することを前提とする.

```
動詞-自立/(助動詞|助詞-終助詞)+        \
        \
        0/1->{*,*,*,0,0,0,0,0,0}
```

Fig. 1 規則例 1

3.2 主規則部

主規則部には"/"区切りにより,品詞の並びを記述する.Fig. 1は,先述の「動詞の後ろに,助動詞や終助詞が繰り返されている」という品詞列に適用される.

指定可能な正規表現記述を示す (Table 1).

Table 1 指定可能な正規表現

意味	記述例
0 個以上繰り返し	(名詞-一般)*
1 個以上繰り返し	(名詞-一般)+
N 個の繰り返し	(名詞-一般){N}
選択	(名詞-一般|名詞-サ変接続)*
任意	(名詞*)* (格*)* [1]
排他	([^名詞*])*

このような記述により,規則数を減らすことが可能となる.すなわち,Fig. 1の例は,「来るらしい」「来たらしいよ」「来なかったらしいですよね」等の,様々な例文に適用される.日本語のような,様々な要素の組み合わせを許す言語に対しては,ここで述べた正規表現を用いた表記法が,規則数を減じることに貢献すると考えられる.

[1] 名詞* := 名詞-一般 | 名詞-サ変接続 | ...
格* := 格-が | 格-を | ...

3.3 副規則部

副規則部では,細かな照合条件を記述することが出来る.また,黒橋ら[4]が示した,並立構造を検出する命令を指定することも可能である.ただし,主規則を減じる本稿の目的と一致しないため,詳述しないこととする.

3.4 効果部

効果部では,主規則・副規則の両規則に適合した場合に行う処理を記述する.先の例 (Fig. 1) は 2 品詞を 1 品詞に還元することを示している.具体的には"->"の両側に操作対象と,操作内容を記述する.すなわち,"0/1"は操作対象を示し,0 番目の品詞と 1 番目の品詞に対して操作を行うことを示す.また,"{...}"内は,形態素解析器が出力するフィールド数と同一であり,それぞれのフィールド毎に操作を記述する.なお,数字については,操作対象をそのまま転記するため,「動詞-自立」として還元される.また,"*"については合成した結果を出力することを示している.

これまでに説明した書き方は,通常の還元操作と同一である.しかし,このような詳細な書き方をする利点は,文脈に依存した記述が出来る点にある.例を示す.

```
動詞-自立/(助動詞|助詞-終助詞)+/EOS   \
        \
        1->{*,*,*,文末,NUM,1,1,1,1}
```

Fig. 2 規則例 2

なお,"文末"は,本研究独自の非終端記号であり,NUM にはその品詞の管理番号が入る.

この規則には主規則中に 3 品詞が見られる.しかし,効果部で指定された品詞は"1"のみであり,還元の対象は「助動詞または終助詞」である.すなわち,主規則中に記載された全てを効果部で指定する必要がないため,前置または後置された品詞 (文脈) により,操作を変更することができる.

本研究は,この還元操作以外に,分割等の操作や,特定の規則へのジャンプ等,制御系の操作命令を導入している.

4 規則の構造化

前章では，規則数を減らす記述法について述べた．しかし，規則数が増せば，管理のためのコストは大きくなる．そこで，規則を構造化し，管理を容易にすることを目指す．

今回，規則を7段階に構造化（以下，フェイズと呼ぶ）した．各フェイズは，典型的には次の処理を行う（PHと略述）．

PH1　形態素解析結果の修正
PH2　形態素の結合
PH3　連体修飾句，連用修飾句への還元
PH4　文末接尾辞の同定
PH5　文節化（格要素への還元）
PH6　連体修飾節，引用節等への還元
PH7　文同定

4.1　形態素解析結果の修正

PH1では，形態素解析結果の修正を行う．"茶筅"は高精度な形態素解析器である．しかし，本研究が対象とするシナリオには，台詞に話し言葉が含まれるため，未登録の音便等を持つ等，一部の例文に対しては誤りを含んだ出力がなされる．PH1は，この出力を正しく修正するための役割を持つ．

4.2　形態素の結合

PH2では形態素の結合を行う．ここでいう結合とは，規則に基づいて，特定の還元操作を行うことである．例えば「日本語」という単語は，形態素解析の結果，「日本」「語」という二つの形態素に分割される．この二つの要素を単語化する還元操作を，結合と呼ぶことにする．結合の多くは，名詞同士の組み合わせによる．ただし，一部の接尾辞を纏め上げる操作も行う．日本語では多くの場合，文末に様相・モダリティ等を示す形態素列が出現する．例えば，「（～し）ている」等の形態素列が，ここでの操作対象となる．通常，形態素「て」「いる」の共起により，継続様相を示す．しかし，単独で用いられた場合には，様相の意は含まれない．したがって還元操作の結果が，いわゆる単語と見なせない場合でも，結合を行う．

4.3　連体修飾句，連用修飾句への還元

PH3では修飾句に対する還元を行う．例えば，「A の B」などの表現が，このフェイズでの操作対象となる．

4.4　文末接尾辞の同定

日本語は文末にモダリティ等が多く含まれる．例えば「～ていたそうだ」という表現は，「～てい/た/そう/だ」と分かち書きされる．この例を品詞列で表記すると，「動詞-非自立/助動詞/名詞-非自立-助動詞語幹/助動詞」となる．日本語では，モダリティを示す文末の品詞種が多いため，全ての組み合わせを記述すると，文に還元する規則の記述の組み合わせ数が多くなる．したがって，このフェイズで，一旦「末尾」という非終端記号に変換する．

4.5　文節化（格要素への還元）

基本的に日本語の格は「名詞＋助詞」の形式で表されるため，助詞に着目して，この還元処理を行う．しかし，日本語では，助詞が省略されることもある．この省略が日本語の処理を困難にしている要素でもある．したがって，省略にも対応した規則を記述する必要がある．

4.6　連体修飾節，引用節等への還元

「こんなのあったらいいなって思ってたんだ」等の引用節を解析する場合は，まず引用部「こんなのあったらいいな」が先に還元される．そこで，最終的な文同定の前に，この処理を行う．

4.7　文同定

最終的に文としての同定を行い，還元を行うフェイズである．

ここで述べた処理は，あくまで典型例である．また，本研究では暫定的に7フェイズを採用した．しかし，フェイズ数は可変であるため，さらに細分化が可能である．

5 規則作成

前章までの考察に基づき，シナリオ20作品中の例文（38377文）を参考にし，規則を作成した．以下に，本研究で作成した規則数を示す（Table 2）．表中「本手法」とは，本手法による表記法を用い

た規則数を示す．ただし，規則は順序付けて並べられており，還元可能な形態素列が出現した際に，一意に還元を行う操作を繰り返した．また，「CFG」とは，CFGを用いた場合に必要な規則数を示す．例えば，Fig. 1の規則によって，「動詞-自立/助動詞」「動詞-自立/助詞-終助詞」「動詞-自立/助動詞/助詞-終助詞」の3種を還元できた場合に，CFGに必要な規則数は3となる．さらに，「表現力」とは，CFGにより必要な規則数を，本手法による規則数で除した値であり，本手法の記述力を表す．

Table 2　本手法による表記とCFGの比較

	PH1	PH2	PH3	PH4	PH5	PH6	PH7	合計
本手法	1276	380	104	293	190	339	228	2810
CFG	2737	1326	806	4993	928	10192	6467	27449
表現力	2.14	3.49	7.75	17.04	4.88	30.06	28.36	9.77

合計の欄を見れば明らかなように，2810の規則により，28000相当の品詞列に適用出来，およそ10分の1の規則で記述出来ることがわかる．このことから，本研究の手法は，規則数削減に一定の効果があると言える．

5.1　フェイズと表現力についての考察

PH1では，表現力が2程度に過ぎず，正規表現記述が有効に作用していないことがわかる．PH1は形態素解析の誤りを修正するため，形態素列がほとんどそのまま指定されているからである．一方，PH6やPH7では，30程度の表現力を有しており，効果が非常に大きいことがわかる．両フェイズは，形態素列を連体修飾節や文に還元する．日本語は語順の制約から比較的自由な言語であるため，「(格＊|記号-読点)*/動詞-自立」等の，文に還元する規則が有効に機能したためであると考えられる．

5.2　還元回数についての考察

次に本研究で作成した規則の還元回数について検討を加える．フェイズ毎，還元回数別に表に示す（Table 3）．

Table 3　フェイズ毎，還元回数比較（規則数）

還元回数	PH1	PH2	PH3	PH4	PH5	PH6	PH7	合計
0	253	56	20	70	43	114	98	654
1	437	74	22	65	35	57	29	719
2 ～	406	114	26	65	48	76	35	770
10 ～	147	92	23	61	40	58	42	463
100 ～	29	35	9	23	17	27	18	158
1000 ～	4	9	4	8	6	7	6	44
10000 ～	0	0	0	1	1	0	0	2

還元回数が10000回を超える規則も存在する．しかし，規則のおよそ半数（654+719）が，1回以下の還元回数に過ぎないため，本研究の規則は，特定の例文に対し，個別に対処した規則であると言える．新聞等のコーパスと異なり，シナリオには作者独特の言い回し等があるため，このような傾向を示すと考えられる．1回程度の還元では，規則の自動獲得は困難であり，こうしたコーパスに対して，本研究の手法が有効であると言える．

6　まとめ

本研究は，構文解析規則の手動管理を容易にするため，正規表現を使用した規則記述を行い，規則数の削減に一定の効果があることを示した．また，規則の半数は個別の事例に対処する規則であり，多くの言い回しに対処することを示した．

今後は，実行時の精度等をもとに，改良点を明らかにする必要がある．

7　参考文献

[1] 白井清昭，徳永健伸，田中穂積：括弧付きコーパスからの日本語確率文脈自由文法の自動抽出，自然言語処理，4(1)，125-146 (1997)．

[2] 松本裕治，伝康晴：話し言葉の形態素解析，情報処理学会研究報告，2001-NL-143，49-54 (2001)．

[3] 松本裕治，北内啓，山下達雄，平野善隆，松田寛，高岡一馬，浅原 正幸：日本語形態素解析システム『茶筌』 version 2.2.7 使用説明書，奈良先端科学技術大学院大学(2001)．

[4] 黒橋禎夫，長尾眞：並列構造の検出に基づく長い日本語文の構文解析，自然言語処理，1(1)，35-57(1994)．

連絡先：

〒731-3194　広島市安佐南区大塚東3-4-1

広島市立大学 情報科学部 知能情報システム工学科

黒澤 義明

Tel：082-830-1581

Email：kurosawa@its.hiroshima-cu.ac.jp

シナリオを対象とした構文解析規則記述法の評価実験

Experimental Evaluation for a Description Method of Syntactic Rules on Filmscripts

黒澤 義明　　市村 匠　　相沢 輝明
Yoshiaki KUROSAWA, Takumi ICHIMURA, Teruaki AIZAWA
広島市立大学　情報科学部
Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University

Abstract: In this paper, we report the evaluation for our previously proposed method of syntactic rules with some experimental results. We developed a syntactic analyzer with 2,810 rules made from 20 filmscripts. Although some kinds of errors occur, all precisions are more than 90% in closed test and more than 80% in open test. These results show that our method can widely adjust and handle many fashions of speaking.

1　はじめに

近年，統計による学習を用いた，構文解析研究の進展が著しい．一方，人手によって規則の修正を行う伝統的なアプローチは，個別の例文に対して規則を導入することが出来る反面，規則収集等，人的コストが必要とされる．

黒澤ら[1]は，こうしたコストを減らすことを目的とした記述法を提案した．しかし，精度や実装した上での問題点が検討されていない．

そこで，本研究ではコストを減らす規則記述法を利用した実装を行い，実験結果について検討を加える．

2　規則記述

黒澤ら[1] [2]が提案した規則記述法を使用する．規則は，以下の形式で記述されている（Fig. 1）．本稿では2行目の"副規則部"の説明を行う．

```
名詞-一般/名詞-サ変接続/助詞-格助詞　\
    0/(規則)/1/(記述)　　\
        0/1－>{*,*,*,0,0,0,0,0,0}
```

Fig. 1　規則例 1

副規則部では，条件を記載することが出来る．Fig. 1では，0番目の品詞（名詞-一般）が「規則」であり，1番目の品詞（名詞-サ変接続）が「記述」であるときに，効果部の操作が行われる．指定は，基本形だけではなく，読みや活用形などでも行うことが出来る．

さらに，本研究ではいくつかの照合命令を用意している．

1.　本がある、辞典がある。

例えば，例文 1 は，『節「本がある」が，名詞「辞典」に係る』と解釈出来る．しかし，この解釈は誤りである．両文に動詞「ある」が含まれているため，並立構造を有していると判断する必要がある．したがって，2 形態素が同一かどうかを照合する命令を用意すればよいと考えられる．本研究は，こうした考えから"eq"や"inc"等の命令を用意した．これらの命令は，黒橋ら[3]の並立構造の抽出と同等の機能を実現する．

3　規則強度

本研究が使用する規則には，正規表現が含まれているため，一般的な解析手法を適用することが出来ない．すなわち，LR 法に見られるような先読みトークンを使うことは出来ない．そこで本研究では，文法規則に手動で強度を設定し，その順に照合を行うことにより，解析を行う．

ただし，すべての規則に対し，手動で強度を設定することはコストの面で問題がある．したがって本研究では，デフォルトの自動強度設定規則を使用し，規則の順位付けを行う．そして，自動順位付けの結果，解析が失敗に終わった場合にのみ，手動での順位設定を可能にする．

3.1 自動設定

自動強度設定規則を以下に示す．

・主規則中の品詞数が多ければ，順位上

・主規則中に正規表現があれば，順位下

例えば，Fig. 2の A では品詞数が 3 であり，B では 2 である．したがって，A に示した規則の順位を上げる．また， C は，B と同じ品詞数 2 の規則である．しかし，正規表現を含んでいるため，C に示した規則の順位を下げる．

名詞-一般/名詞-一般/名詞-一般	... A
名詞-一般/名詞-一般	... B
(名詞-一般)*/名詞-一般	... C

Fig. 2 主規則 3 例

上記の操作で順位を決定できない場合には，定義ファイル中の上方に出現する規則を，上位の順位とする．これらの操作により，規則の照合順が一意に決定される．

3.2 手動設定

自動設定により，多くの文に正しく対処可能と考えられる．しかし，一部の入力に対しては，当然誤りを起こすことが予想される．したがって，手動で強度を変更する枠組みを用意する．

1 0/(名詞-一般)+/名詞-一般

Fig. 3 手動強度を持つ主規則例

記述は上記のように，簡単である．この記述により，品詞数 10 の規則として順位付けされる．

なお今回は，単位を全て品詞数で表現している．また，この値を全て手動で記述している．しかしながら，この値を何らかの統計指標に書き換えることも可能である．

4 実験

前章までの議論に基づき，実装を行った．使用言語は日本語 Perl5(いわゆる Jperl)である．したがって，本研究で述べた正規表現は Perl の実装に従う．なお，本研究で実装した構文解析器は，単純なボトムアップパーサである．また，動作は全て“first match wins basis”に基づいており，規則の適用は一意に行われ，最終的に文として受理されるまで，照合が繰り返される．このため，効率はよくないと考えられる．しかし，最終的には唯一の解が得られると同時に「どの規則が適用された結果，誤りが生じたか」等が容易に判断可能であるため，規則管理が容易という利点を持つ．

4.1 入力と前処理

本研究で入力として扱う対象は，テキスト形式で記述されており，一切のタグを必要としない．この入力に対し，前処理として，以下の 3 処理を行う．

・未登録の形態素を登録

本研究は，未知語の特定を目指した研究ではないため，予め新規の形態素を登録する．

・文分割

文への分割を行う．ただし，ここでいう文とは，句点や記号（ex. “！”“？”）によって，自動分割される単位のことであり，文法に言う単文ではない．例えば，「まずいよ。おい」という入力は，句点により 2 文に分割される一方，「太郎と花子が入って来て、店内を見回す」という入力は，句点等が存在しないため，1 文として数える．

・形態素解析

形態素解析を行う．本研究で用いる形態素解析器は，“茶筅 2.2.7”である[4]．

4.2 解析

規則に基づき，構文解析を行い，その評価を行う．ここで用いる規則は，シナリオ 20 作品，38377 文を参考に生成された．生成された規則数を以下に示す（Table 1）．

Table 1 フェイズ毎規則数（個）

PH1	PH2	PH3	PH4	PH5	PH6	PH7	計
1276	380	104	293	190	339	228	2810

4.3 実験対象

規則作成に用いた 20 作品から 4 作品，及び新規 5 作品を評価に用いる．なお，新規 5 作品については全て作者が異なり，また，規則作成に使用した作品の作者とも異なる．このため，本研究の実験対象は，作者独自の言い回しを含んでいると考えられる．

4.4 結果

人手による正解判断結果を示す（Table 2）．

Table 2 解析結果

	シナリオ									
	クローズド				オープン					
	A	B	C	O	U	V	W	X	Y	
誤解析数(不受理数)	78	96	112	104	191	(9) 240	(14) 260	(18) 196	(8) 266	(12)
全文数	2357	2003	2400	1638	1855	1635	2335	1744	1568	
正解率(%)	96.69	95.21	95.33	93.65	89.70	85.32	88.87	88.76	83.04	

なお表中，不受理数とは，最終的に「文」として受理されなかった入力を示す．本研究の受理条件は，“BOS/(文*){1}/EOS”である．

正解と判断した事例を挙げる（Fig. 4）．この例は先にあげた照合命令（eq）が正しく行われた例である．一部冗長な還元が見られる．しかし，3 文から構成された重文であることは正しく解釈している．このため本研究では，正しく解析が行われていると判断した．

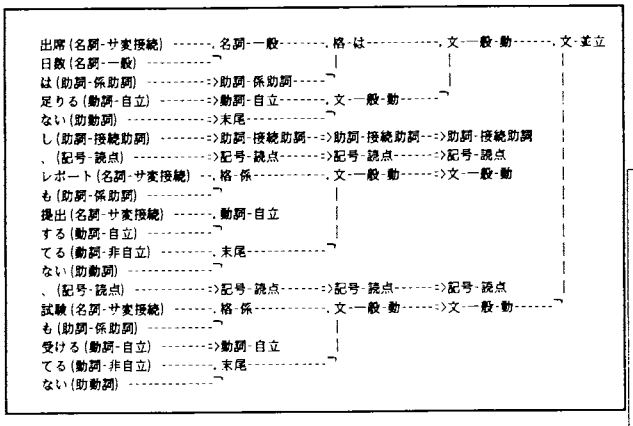


Fig. 4 正解事例

5 考察

「正解率」「誤解析原因」「実行時間」「機械学習との比較」の観点から，考察を行う．

5.1 正解率

Table 2に示したように，オープンテストにおいても，80%強の正解率であり，様々な言い回しに対処していると言える．

5.2 誤解析原因

誤解析の原因については，形態素解析誤り，一般的曖昧性，呼びかけ，規則作成ミス等が挙げられる．ここでは，2 種のみ説明する．

・一般的曖昧性

本研究は，規則の適用順指定により，一意の解析を行う．したがって，解釈の曖昧性がある構造には対処できない．すなわち，品詞列 ABC が二通りの解釈「A(BC)」「(AB)C」を持つ場合，どちらかの解釈を行う規則を作れば，もう一方の解釈が誤りとなる．主規則の記述を工夫し，副規則を文脈として用いることで解消は可能である．しかし，手動ですべて記述するのは困難であり，今後，統計的支援の枠組みが必要である．

・規則作成ミス

規則作成時の例文吟味が不十分な場合に起こる．手動で規則を作成する以上，必ずこの問題が起こる．インタフェースを構築するなど，誤りを減らす枠組みが必要であると考えられる．

5.3 実行時間

シナリオ毎の解析時間(一部)を Fig. 5 に示す．

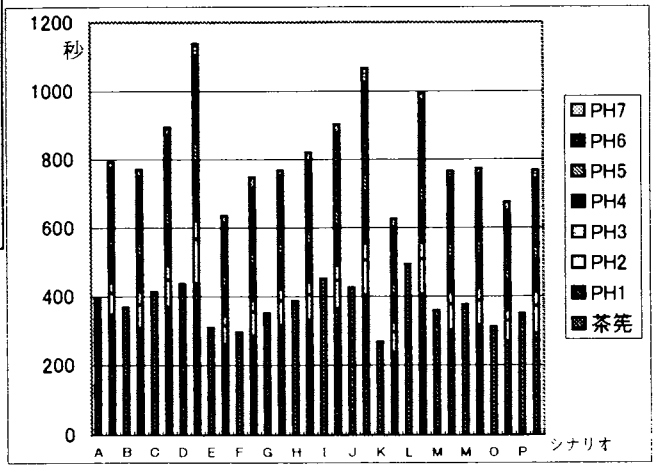


Fig. 5 解析時間

実行時間は，形態素解析に要する時間のほぼ 2 倍である．また，PH1 の処理に形態素解析とほぼ同程度の時間が必要である．規則数（Table 1）からも明らかなように，全規則の半分を PH1 の規則が占める．このため，実行時間に占める PH1 の割合が高い．しかし，話し言葉に対す精度向上の試みがなされている[5]ため，今後，このフェイズの処理負荷は減少されるはずである．

5.4 機械学習との比較

白井他[6]は，機械学習の利点について，人手による知識作成と比較して，次の 4 点を挙げている．「人間の主観に影響されにくい」「コストが低い」「適用範囲が広い」「統計情報を容易に組み込むことが出来る」である．本研究の提案がこれらの利点を満たしているかどうか検討を加える．

・人間の主観に影響されにくい

主観性の問題については，本研究の手法は問題が残る．例えば，「～する時，～した」という例文では，形態素"時"は名詞となる．本研究は，この形態素"時"を接続助詞として解釈する．英語への翻訳を考えた場合，訳文「when ～，～」に適用させやすいからである．しかし，このような操作は研究対象によっても異なると考えられる．したがって，主観性の問題は依然残されている．インタフェースを構築する等，複数の人間が作成する規則を調整し，主観性を減じることが課題となる．

・コストが低い

コストについては，規則数が削減されたことにより，低下したと考えられる．しかしながら，実際の管理に対するコストを定量的に表現していない．何らかの定量化が必要であると考えられる．

・適用範囲が広い

本研究の手法は，デフォルトの連結規則を持たないため，規則作成がなされていない場合には，確実に不受理となる．統計的手法であれば，デフォルトの連結も可能である．しかし，本研究ではこのような処置は不可能であり，不受理が頻発するタスクやコーパスの存在を否定出来ない．

・統計情報を容易に組み込むことが出来る

本研究は，統計情報を組み込むことが可能である．そして，手動規則管理による手法との組み合わせで，正解を導くことが出来る．これまでの研究は，修正等を個別に行う枠組みは用意されていない．したがって，組み合わせを容易に実現できる点は，本研究の手法の利点であると考えられる．ただし，実際の検討については今後の課題とする．

6 まとめ

本研究は，正規表現を用いた規則を用いた解析器を実装し，実験を行った．オープンテストでも 80%を超える正解率を示しており，様々な言い回しに対処した，有用な解析器であると考えられる．

今後は，インタフェースを構築し，また統計的手法の利点を取り入れて，より扱いやすく，高精度な解析器の作成を目指す．

7 参考文献

[1] 黒澤義明，市村匠，相沢輝明：シナリオを対象とした構文解析規則記述法，第 19 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，(to appear in 2003).

[2] Yoshiaki Kurosawa, Takumi Ichimura, Teruaki Aizawa : A Description Method of Syntactic Rules on Japanese Filmscript, Proc. of the 7th International Conference on Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems & Allied Technologies(to appear in 2003) .

[3] 黒橋禎夫，長尾眞：並列構造の検出に基づく長い日本語文の構文解析，自然言語処理，1(1)，35-57(1994).

[4] 松本裕治，北内啓，山下達雄，平野善隆，松田寛，高岡一馬，浅原 正幸：日本語形態素解析システム『茶筌』 version 2.2.7 使用説明書，奈良先端科学技術大学院大学(2001).

[5] 松本裕治，伝康晴：話し言葉の形態素解析，情報処理学会研究報告，2001-NL-143，49-54 (2001).

[6] 白井清昭，徳永健伸，田中穂積：括弧付きコーパスからの日本語確率文脈自由文法の自動抽出，自然言語処理，4(1)，125-146 (1997).

連絡先：

〒731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1

広島市立大学 情報科学部 知能情報システム工学科

黒澤 義明

Tel : 082-830-1581

Email : kurosawa@its.hiroshima-cu.ac.jp

キーフレーズ抽出辞書を利用したテキストの自動分類

Automatic Classification of Textual Data based on Key Phrase Pattern Dictionary

櫻井 茂明, 酢山 明弘
Shigeaki SAKURAI and Akihiro SUYAMA

(株) 東芝 研究開発センター
Corporate Research & Development Center, Toshiba Corporation

Abstract: This paper proposes a new method that classifies textual data by using lexical analysis, a key phrase pattern dictionary, and a key phrase relation dictionary. The key phrase pattern dictionary is created using linguistic knowledge and is composed of parts of speech and words. The key phrase relation dictionary is generated by a fuzzy inductive learning algorithm and is composed of relations, which describe a combination of key phrases and text classes. This paper applies the method to two kinds of e-mail classification tasks. The results of numerical experiments indicate that the method gives more highly precise ratios than the method based on words does.

1 はじめに

コンピュータ環境の進展に伴って、膨大な量のテキストデータが蓄えられるようになった。しかしながら、これらのデータを持て余すことが多く、必ずしも有効に活用されてはいない。このような背景の下、テキストデータを分析するテキストマイニング法が研究されている [1] [3]。我々のグループにおいても、形態素解析及び 2 種類の知識辞書を利用することにより、テキストデータを分析する方法 [2] を提案している。本手法は、日本語のような分かち書きされたテキストデータに対しても、その意味を考慮した分析を行うことができる。しかしながら、タスクに依存した知識辞書を生成しなければならないため、本手法を多数の問題に展開することは難しかった。

本論文では、タスクに依存した知識辞書を利用しないテキストマイニング法として、キーフレーズに基づいた方法を提案する。また、提案法をコールセンターメールの 2 種類の分類タスクに適用し、その有効性を検証する。

2 テキストマイニング法

2.1 テキストマイニングの流れ

本論文では、形態素解析、キーフレーズ抽出辞書、キーフレーズ関係辞書を利用した、テキストマイニング法を提案する。提案法においては、形態素解析を利用することにより、テキストデータを単語の集合に分割する。この単語の集合に対して、キーフレーズ抽出辞書に格納されているキーフレーズ抽出ルールを適用することにより、キーフレーズを抽出し、対応するキーフレーズグループへの割り当てを行う。また、キーフレーズ関係辞書により、抽出したキーフレーズの組み合わせと一致する関係を抽出し、その関係に対応するテキストクラスをテキストの推論結果として出力する。ただし、キーフレーズ抽出辞書、キーフレーズグループ、キーフレーズ関係辞書に関しては、以下の節で順に説明する。利用者は、これらの推論結果に基づいて、テキストデータを分析することができる。図 1 は、上記の処理に従ってテキストデータが分類される様子を示している。

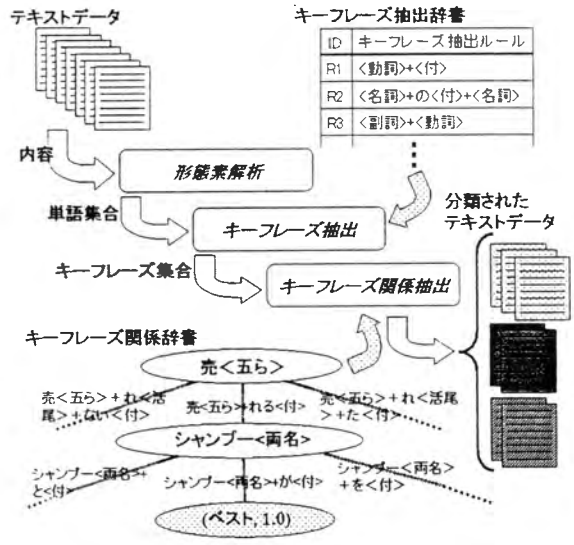


図 1: テキストデータ分類の流れ

以上に示すキーフレーズに基づいた分類では、単語間の関係を反映した分類を行っており、単語に基づい

た分類よりも高い分類精度を得ることが期待できる。

2.2 キーフレーズ抽出辞書

キーフレーズ抽出辞書は形態素解析されたテキストデータからキーフレーズを抽出するためのルール(キーフレーズ抽出ルール)を格納した辞書である。各ルールは品詞及び単語から構成されており、ルールに一致する単語の組み合わせをキーフレーズとして抽出する。本辞書は、言語学的な知識に基づいて記述されており、タスクにそれ程依存することなしに、記述することができる。このため、本辞書は汎用性が高く、種々のタスクに適用することができる。キーフレーズ抽出辞書に基づいたキーフレーズの抽出例として、キーフレーズ抽出辞書が、図1の右上に示すように与えられているとする。このとき、「シャンプーが売れた。」というテキストデータが与えられているとすれば、形態素解析により、「/シャンプー<両名>+が<付>/売<五ら>+れ<付>+た<付>/。<句読>」といった結果を得ることができる。このため、キーフレーズ抽出ルールR1を適用することにより、「売<五ら>+れ<付>+た<付>」をキーフレーズとして抽出することができる。

このようなキーフレーズは、テキストデータが種々の形式で記述されているため、スパースな特徴量となる。そこで、中心となる単語を決定し、中心となる単語が同一なものをキーフレーズグループとし、キーフレーズをある程度まとめて扱えるようにする。また、キーフレーズグループを属性、キーフレーズの部分集合をその属性値とみなすことにする。このように扱うことにより、特定のキーフレーズに偏った特徴量になる危険性をある程度回避することができる。一方、中心となる単語として、特定の単語を指定するならば、その単語の指定自体がタスクに特化したものになる。そこで、中心となる語を直接指定する代わりに、テキストデータの分類にとって重要と考えられる、「動詞」、「名詞」といった品詞を指定し、指定した品詞を持つ単語を中心となる単語とする。このような指定により、タスクに依存することなしに、キーフレーズによってテキストデータを特徴付けることができる。

2.3 キーフレーズ関係辞書

通常、テキストデータはひとつのキーフレーズによって特徴付けられる訳ではなく、複数のキーフレーズによって特徴付けられている。このため、キーフレーズに基づいてテキストデータを分類するためには、キーフレーズの組み合わせと分類結果との間の関係を記述する必要がある。キーフレーズ関係辞書は、このキーフレーズの関係を辞書として記述している。本辞書においては、各キーフレーズ関係を、複数のキーフレーズを条件部に持ち、確信度付きのテキストクラスを結論部に持つルールとして記述する。このとき、テキストクラスとはテキストデータをある観点で分類した場合における分類結果を表している。例えば、キーフレーズ関係辞書が図1の左下に示す木構造形式で与えられているとする。木構造を用いた表現では、木の最上位のノード(ルートノード)から、末端のノードまでがひとつのルールを表している。このため、図の中央に表わされているルールは、属性「売<五ら>」の属性値が「売<五ら>+れる<付>」、属性「シャンプー<両名>」の属性値が「シャンプー<両名>+が<付>」ならば、確信度1.0で「ベスト」であるというルールを表している。

3 キーフレーズ関係辞書の学習・推論

テキストデータの利用者は、テキストデータを読むことにより、自分の興味に基づいたテキストクラスを付与することができる。また、キーフレーズ抽出辞書を利用することにより、テキストデータを特徴付けるキーフレーズを抽出することができる。そこで、このキーフレーズとテキストクラスから訓練事例を構成し、キーフレーズ関係辞書を学習する。このとき、生成される訓練事例では、属性を構成する属性値がキーフレーズの集合として与えられる。このため、キーフレーズ関係辞書を学習する帰納学習法は、集合を属性値に持つ訓練事例を扱う必要がある。ファジィ帰納学習法IDF[4]は、基本属性値(ひとつの要素からなる属性値)に対して、メンバーシップ関数を定義することにより、集合として与えられる属性値を扱うことができる。そこで、訓練事例に対して、IDFを適用することにより、キーフレーズ関係辞書を学習する。

一方、新たに与えられたテキストデータに対しては、キーフレーズ関係辞書を利用することにより、そのテキストクラスの推論が行われる。本推論法では、はじめに、訓練事例の生成と同様な処理を行うことにより、キーフレーズを抽出する。このキーフレーズを、対応するキーフレーズグループへ割り当てて、属性だけからなる評価対象を生成する。この評価対象が、ファジィ決定木形式のキーフレーズ関係辞書に適用され、対応する分類クラスが推論される。

4 電子メール分類タスクへの適用

近年、顧客満足度の重要性が高まっており、顧客の要望や不満を受け付けるカスタマーセンターの重要性が高まっている。一方、電子メールの普及とその気軽さから、カスタマーセンターに寄せられる電子メールの数は急速に増大している。これらの電子メールには、顧客満足度の向上へと繋がる情報が埋もれているものの、その分析は必ずしも十分には行われていない。それればかりか、電子メールの増大に伴って、その分析はより困難なものになっており、電子メールの分析を支援することが望まれている。

電子メールに記述されている情報の多くは、テキストデータから構成されており、電子メールを分析する方法として、提案法を適用することができる。すなわち、コールセンターのオペレータが付与したテキストクラス及び電子メールのタイトル、本文を入力とすることにより、キーフレーズ関係辞書を学習し、新たな電子メールが与えられた場合に、学習したキーフレーズ関係辞書を利用して電子メールの分類を行う。実験においては、日本語向けに作成した37のキーフレーズ抽出ルールを利用する。

5 数値実験

5.1 実験データ

社内のカスタマーセンターで収集しているお客様から送られてきた電子メールのうち、466件の電子メールを実験では利用する。当該電子メールには、オペレータによって2種類の分類基準が与えられており、この分類基準をテキストクラスとみなすことにする。ここで、ひとつの基準は、製品に関する分類基準であり、もうひとつの基準は、内容に関する分類基準である。各分類基準とも、5種類のクラスに分類されている。

5.2 実験方法

与えられた電子メールに対して、10重交差検定法に基づいた実験を行い、提案法の効果を検証する。すなわち、電子メールを10個の部分集合に分割し、9個の部分集合を合わせた電子メールを用いてキーフレーズ関係辞書を学習する。一方、残りのひとつの部分集合の電子メールを、学習したキーフレーズ関係辞書を利用して評価する。以上の実験を、評価に利用する部分集合を順次切り替えることにより、合計10回の実験を行って、推論したテキストクラスの正解率を評価する。ただし、実験においては、出現頻度が3以上のキーフレーズに対して、動詞を中心単語としたグループ化を行う。このため、本データの場合、3,821個のキーフレーズが存在し、1,949個のキーフレーズグループが存在する。

また、比較実験として、電子メールに含まれる単語に基づいた分類も実施する。すなわち、形態素解析を実施することにより、電子メールを単語に分割し、各単語に対して、$tfidf$ 値を計算する。このとき、$tfidf$ 値がしきい値以上となる単語を電子メールから抽出し、その単語を属性、単語が出現するかどうかを属性値とみなして訓練事例を生成する。生成した訓練事例に対して、IDFを適用して、単語とテキストクラスとの間の関係を学習し、学習に利用しなかった電子メールのテキストクラスを推論する。比較実験においては、予備実験の結果から得られたしきい値0.005を利用することにより、2,098個の単語を電子メールの特徴付けに利用する。

5.3 実験結果

表1は10回の実験における平均正解率を示している。表1においては、「キーフレーズ」がキーフレーズ関係辞書に基づいた方法、「単語」が単語に基づいた方法の結果を示している。また、「製品」が製品分類タスク、「内容」が内容分類タスクにおける結果を示している。

表 1: 平均正解率

	キーフレーズ	単語
製品	80.0	79.6
内容	64.4	59.7

一方、表2は実験において学習されたファジィ決定木の平均サイズを示している。ただし、ファジィ決定木のサイズとは、ファジィ決定木を構成する分岐ノードの数と末端ノードの数を合計した値のことである。

表 2: ファジィ決定木のサイズ

	キーフレーズ	単語
製品	69.0	72.4
内容	113.8	124.4

5.4 考察

正解率:

表1に示すように、キーフレーズ抽出辞書に基づいた方法が高い分類精度を与えている。当初予想したように、キーフレーズ抽出辞書の場合、単語の関連性を考慮することができ、単語よりもテキストデータを適切に特徴付けられたため、正解率が向上したと考えられる。

獲得されたファジィ決定木のサイズ:

表2に示すように、キーフレーズ抽出辞書に基づいた方法は小さなファジィ決定木サイズを与えている。キーフレーズ抽出辞書の場合、キーフレーズによっては、ひとつの属性で複数の単語をまとめて扱うことができるため、ファジィ決定木が小さくなったと考えられる。

分類タスク:

製品分類タスクの場合、形態素解析が抽出する製品の型番や製品名等が、テキストクラスと直接結び付く傾向にある。一方、内容分類タスクの場合、疑問文であるとか否定文であるとかの文の種類を識別することが重要である。日本語の場合、文の最後にある形態素の組み合わせが、このような文の種類を決定する傾向にある。このため、単語間の連続性を考えるキーフレーズにとっては、内容分類タスクの方がより効果が表れやすいタスクとなっている。従って、内容分類タスクの場合の方が、分類精度が向上したと考えられる。

分類器:

論文では、属性値として集合を扱うため、分類器としてIDFを採用している。しかしながら、テキストデータの分類器として、SVMを利用した方法が有効であるとの研究成果[3]も報告されており、属性値に集合を扱えるようにSVMを拡張できれば、より高い分類精度を得られる可能性がある。また、IDFの場合、可読性の高いキーフレーズ関係辞書を学習することができるので、本辞書を利用者が修正することにより、より高い分類精度が得られる可能性がある。

辞書構築の容易性:

キーフレーズ抽出辞書は、品詞と接続詞、前置詞、付属語のような単語の組み合わせを記述したキーフレーズ抽出ルールで構成されており、特定のタスクにそれ程依存した辞書にはなっていない。このため、本辞書を多くのタスクに適用することができ、より簡便にテキストマイニング法を利用することができる。

以上のような考察により、キーフレーズ抽出辞書を利用した方法は、タスクに依存しないテキストマイニング法として、効果的な方法であると考えられる。

6 まとめと今後の課題

本論文では、キーフレーズ抽出辞書を利用した新たなテキストデータ分類法を提案した。また、本論文では、2種類のコールセンターメール分類タスクを取り上げて、提案手法の有効性を検証した。これにより、単語に基づいた方法よりも高い分類精度が得られることを確認できた。

キーフレーズ抽出辞書を利用する方法は、タスク向けに専門家が生成したキー概念辞書を利用する方法に比べれば、分類精度は改良する余地が残されている。このため、今後の課題として、キーフレーズの生成法の見直しを含めて、キーフレーズ抽出辞書を改良していきたい。また、テキストマイニング法の発展として、テキストマイニング法とデータマイニング法を組み合わせることにより、離散データ、数値データ、テキストデータが混在するデータの分析も可能と考えており、その具体的な方法を検討していきたい。

参考文献

[1] R. Feldman I. Dagan, and H. Hirsh: "Mining Text using Keyword Distributions", *J. of Intelligent Information Systems*, 10, 281-300 (1998).

[2] 市村 由美, 鈴木 優, 酢山 明弘, 折原 良平, 中山 康子: 「日報分析システムと分析用知識記述支援ツールの開発」, 電子情報通信学会論文誌, 86-D-II, 2, 310-323 (2003).

[3] B. Raskutti, H. Ferrá, and A. Kowalczyk: "Combining Clustering and Co-training to Enhance Text Classification using Unlabelled Data", *Proc. of KDD2002*, Edmonton, Canada, 620-625 (2002).

[4] 櫻井 茂明, 酢山 明弘: 「ファジィ帰納学習におけるキー概念集合を含む属性値の扱い」, 日本ファジィ学会誌, 14, 6, 640-647 (2002).

[5] S. Sakurai, A. Suyama, and K. Fume: "Acquisition of a Concepts Relation Dictionary for Classifying E-mails", *Proc. of AIA2003*, Innsbruck, Austria, 13-19 (2003).

連絡先:
櫻井 茂明
〒 212-8582 神奈川県川崎市幸区小向東芝町 1,
(株) 東芝 研究開発センター 知識メディアラボラトリー
E-mail: shigeaki.sakurai@toshiba.co.jp

概念ファジィ集合を用いた キーボードマウスレス 次世代型ビジュアル的画像検索

Conceptual Fuzzy Sets for Picture Reference System with Visual User Interface and Command Recognition System without Keyboard and Mouse

齋藤 毎至*
Maiji Saito
山口 亨* **
Toru Yamaguchi
*東京都立科学技術大学 大学院工学研究科 システム基礎工学専攻
Systems Engineering Science, Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan Institute of Technology
**科学技術振興事業団さきがけ研究 21
PRESTO, Japan Science and Technology Corporation (JST)

Abstract: This paper proposes a picture reference system. The picture reference system consists of the associative picture database, the visual user interface and the command recognition system. The associative picture database searches pictures by using conceptual fuzzy sets. The command recognition system, without keyboard and mouse, captures user's hand and informs it to the system as a command. To show pictures attractive, the visual user interface provides some visual effect functions. We implement and evaluate the picture reference system.

1. はじめに

コンピュータネットワークは進歩し、我々は知りたい情報を、インターネットを通じて調べるようになった。画像検索サイトはgoogleやyahooなどいくつかあるものの、検索ヒット数が多すぎたり少なすぎたりして、いつもよい結果を得られるものではない。そこで本稿では、概念ファジィ集合を用いてユーザーの満足する画像検索結果を得ることのできる画像検索エンジンを作成し、キーボードとマウスを使わないフレンドリーユーザーインターフェースと、画像を美しく見せる効果を持つビジュアル的な画像検索システムを提案する。

2. 概念ファジィ集合を利用した連想画像データベースエンジン

この連想画像データベースエンジンの概要を図1に示す。

全ての画像には、その画像の持つ風景や人物などの情報がテキストで与えられていて、この情報は画像データベースに保存されている。連想ユニットは、画像に付随するテキストと概念ファジィ集合[1][2]を用いて、似た意味を持つテキストを出力する。

まず初めに、連想画像データベースはユーザーに何枚かの画像をランダムに提示する。ユーザーは提示された画像の中から検索目的の画像に似ているものを選択する。ユーザーが画像を選択したとき、その画像の番号が画像データベースに送信される。画像データベースは、受け取った番号を用いて、ユーザーの選択した画像に付随するテキストを抽出し、連想ユニットに送信する。連想ユニットでは、概念ファジィ集合を用いて類似度の高いテキストを推論し、これを画像データベースに送信する。画像データベースでは、受け取ったテキストを用いて適合度の高い画像を検索し、上位の何枚かを再びユーザーに提示する。

概念ファジィ集合を利用した連想ユニット部の概要を図2に示す。

本稿で利用した画像は、美術館で展示されているような絵画である。画像に与えられたテキストは、絵画の作者に直接尋ねることで決定した。これらのテキストは、下位概念集合に分類され、そのテキストの関係は、双方向連想メモリ(Bi-directional Associative Memory)[1][2]を用いて定義した。また、抽象的な単語の集合である上位概念も設定した。上位概念内のテキストは、下位概念内のいくつかのテキストと関係を持っているので、ホップフィールドネットワーク(Hopfield Neural Network)[1][2]を用いて関係を定義した。

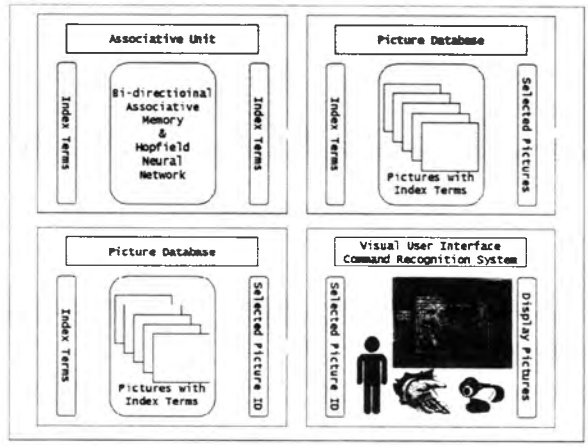


図1 連想画像データベースエンジン

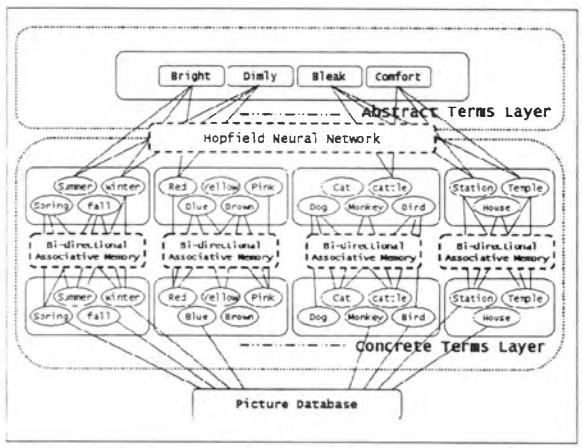


図2 概念ファジィ集合を利用した連想ユニット部

3. 画像を美しく見せるビジュアル的なユーザーイ

ンターフェース

ビジュアル的なユーザーインターフェース[3]は連想画像データベースエンジンからユーザーに提示するための画像を受け取ると、それらを画面に表示する。ビジュアルインターフェースの画面は図 3 のようになる(斜め上から見ている映像)。4 枚の画像が同時に並べられ、一つは手前に、もう一つは奥に、残りは左右に一枚ずつ並べられている。ビジュアル的なユーザーインターフェースはユーザーに画像を提示するとき、ビジュアル的な効果を行う。その効果とは、ユーザーを次の部屋に移動をしているような気分にさせるようなものである。

ユーザーは表示されている 4 枚の画像を回転させることができる。回転が行われるとき、手前の画像は画面から消え、左右に並べられていた画像が画面の中に入ってくる。ユーザーが表示されている画像の中から一枚画像を選択すると、その画像の番号が連想画像データベースに送信され、次に表示すべき新しい画像を取得する。

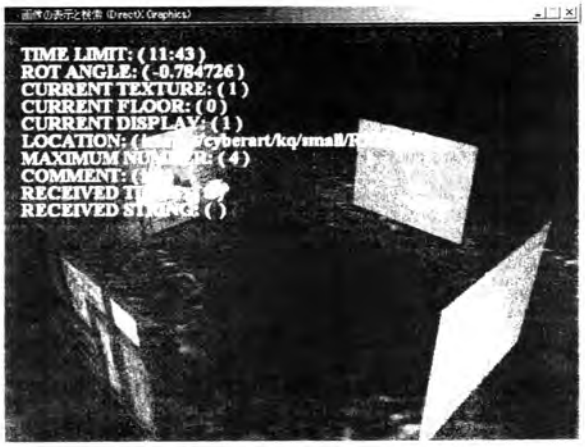


図 3　画像を美しく見せる
ビジュアル的なユーザーインターフェース

4. キーボードマウスレス操作による動作命令認識システム

動作命令認識システムは、ユーザーにキーボードもマウスも使わずに操作を行えるようにすることを目的とし、ビジュアル的なユーザーインターフェースを遠隔操作する。このシステムの概要を図 4 に示す。

このシステムは、USB カメラと画像処理ソフトウェアと認識ユニットで構成されている。

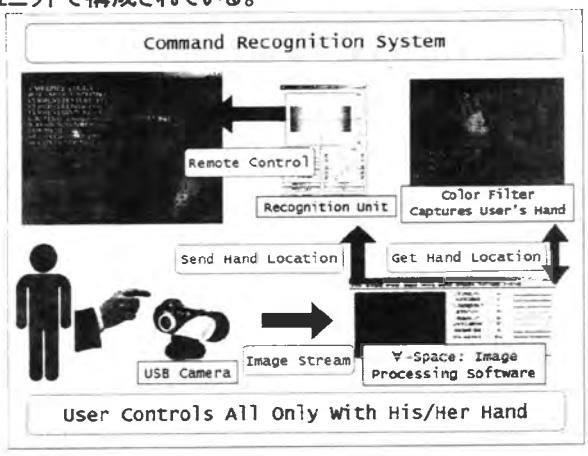


図 4　動作命令認識システム

画像処理ソフトウェア(∀-Space)はユーザーの手をカメラで撮影し、得られた映像を CrCb 色フィルタで処理し、ユーザーの手の位置情報を得る。得られた位置情報は認識ユニットに送信され、動作命令として認識される。動作認識ユニットは、ユーザーの手の位置によって右に回転、左に回転、画像の選択という 3 つのコマンドを認識し、ビジュアル的なユーザーインターフェースを遠隔操作する。

5. 実験と結果

実験時の様子を図 5 に示す。64 枚の画像がシステムに登録され、連想画像データベースとビジュアル的なユーザーインターフェースは LAN で接続されている。

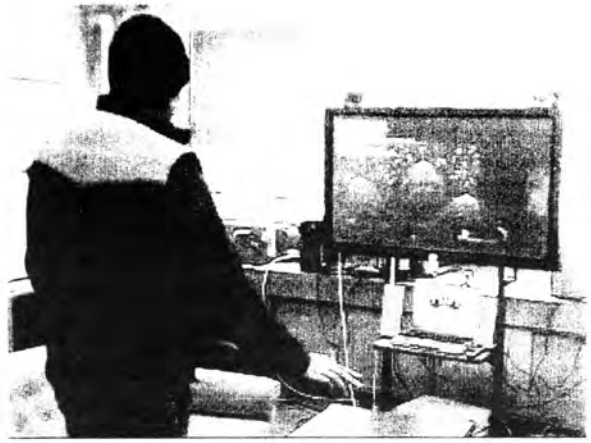


図 5　実験時の様子

5.1 素早く目的の画像を得ることができたかどうか

まず検索目的とする画像を決定した。そして、画像の検索を行い、目的とする画像に近い類似画像を選択して画像検索を行っていき、目的の画像を得た時点で操作を終了した。線形探索を用いた場合、30 枚以下で目的の画像が見つかる確率は計算により 46%(=30÷64)となることが解るが、本稿で提案した概念ファジィ集合を用いた画像検索方法の場合 75%となり、検索効率は 29%増加し、目的の画像を素早く得ることができるという結論を得た。

5.2 動作命令認識システムの認識率は高いかどうか

動作指示認識システムが正しく認識を行えた回数は 54 回中 52 回で 96%となり、ユーザーはキーボードとマウスを全く使わず、キーボードマウスレス操作による画像検索を快適に行うことができたという結論を得た。

参考文献

[1] 山口亨、谷萩隆嗣、萩原将文:“ニューラルネットワークとファジィ信号処理”、コロナ社、1998

[2] 技術研究組合 国際ファジィ工学研究所-研究報告書:“ファジィ思考による知的情報処理”、株式会社 コンピュータ・エージ社、1995

[3] 土井淳、大澤文孝、成田拓郎:“DirectX8 実践プログラミング”、株式会社 工学社、2002

連絡先

〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6
東京都立科学技術大学 大学院
システム基礎工学専攻 山口研究室
電話: 042-585-8641
齋藤 毎至 maiji@fml.ec.tmit.ac.jp

データベースに対するウェブからのファジィ検索(その2)
—ファジィ集合の処理をブラウザ上で行う場合—

Retrieval from databases by fuzzy queries in the Internet with fuzzy operations in the browser

馬野 元秀　松尾 岳明　瀬田 和久　岡田 真　宇野 裕之
Motohide UMANO　Takeaki MATSUO　Kazuhisa SETA　Makoto OKADA　Yushi UNO

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
Department of Mathematics and Information Sciences
College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

Abstract A number of Internet web sites use databases for answering some queries. We, however, want to use fuzzy words such as "warm" and "cold" in queries. The problem can be solved by using fuzzy queries. We proposed a retrieval from ordinary databases by fuzzy queries in the Internet. In this paper, we implemented a prototype of the system that manipulates fuzzy queries in the browser. And we consider this system from view points of the system load, network traffic and client facility to excute fuzzy operations.

1. はじめに

ウェブ技術の進歩により様々なものがウェブ上でやりとりされるようになった。そして、それらの中にはデータベースに対して操作を行うものが非常に多い。しかし、データベース検索を行う場合、ユーザが要求している内容とデータベースに対して要求する内容を一致させることが難しい。それは、自然言語のもっているあいまいさをうまく伝えることができないからである。

これを解決する方法としてファジィ理論を応用することが考えられる。そこで、前回の発表では、従来型のデータベースに対してウェブからファジィ検索を行う方法を提案した [1]。この中で、我々はメンバーシップ関数の定義をどこに保存しておくか、ファジィ集合の処理をどこで行うかについて考察するとともに、すべてをウェブサーバ上で処理する試作したシステムについて述べた。

本発表では、ファジィ集合の処理をブラウザ上で行うことによって負荷を分散するシステムの報告と、これまでの結果に基づいて実際的な処理方法の提案を行う。

2. ウェブからのデータベース検索

この節では、ウェブからデータベースを検索する方法について述べるとともに、ファジィ検索について述べる。

2.1 一般的なデータベース検索方法

現在、クライアント/サーバモデルのデータベースが多く用いられている [2]。このモデルでは、直接データベースを扱うサーバと、データの入出力等を行うクライアントに分けて処理をしている。このデータの入出力等を行うアプリケーションをウェブサーバ上に置くことによって、ウェブブラウザ等を用いてデータベースに対する処理を、どこからでもグラフィカルに行うことが可能となる(図 1)。

この方法では、通常のデータベースシステムが用いられるため、処理できるものはSQLなどデータベース操作言語の範囲に限られる。例えば、気温の数値データを持っているデータベースに対して、ユーザは "10℃ 以下" や "15℃以上25℃以下" といった形でしか検索を行うことができない。この

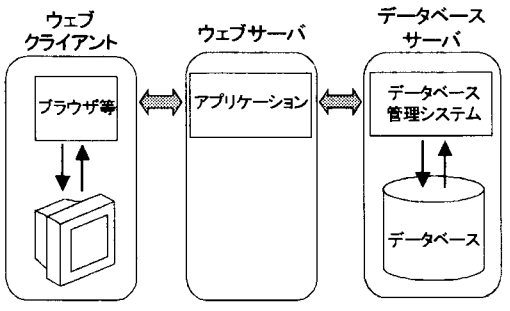


図 1: ウェブ上でデータベースを扱う方法

方法では、"寒い日" というデータが欲しかったとすると、"寒い" とは "10℃ 以下" であるとユーザが考え、入力する必要がある。また、この方法で検索しても、10℃ のデータは検索されるが 10.1℃ のデータは検索されないという問題が生じる。

これらの問題を解決する方法として、我々はデータベース検索に対してファジィ理論を用いる。

2.2 ファジィ検索を行う方法

あいまいな問い合わせの処理については以前より研究が行われており、いくつかのファジィ・データベースシステムが提案されている [3]。ここでは、通常のデータベースに対して、ウェブからのファジィ集合を含む問い合わせによるファジィ検索を実現すること考える。そこで、データベースを用いるアプリケーション側にファジィ検索を行う機能を組み込み、データベースサーバでは一般的なデータベースと同じ処理を行うようにする。この方式よるファジィ検索処理の全体は次の処理を行うことによって実現できる。

(i) 検索条件を入力する。

(ii) 入力された情報からデータベースに対する問い合わせを作成する。ファジィ集合は、そのメンバシップ値が正の部分の区間に変換される。

(iii) 作成された問い合わせをデータベースに対して行う。

(iv) データベースは問い合わせに対する結果を返す。

(v) 検索結果の答えを受け取る。

(vi) 返ってきた検索結果に対してメンバシップ関数を適用し、メンバシップ値をそれぞれのデータに付加し、その値によって降順にソートする。

(vii) ソートした結果を画面などに出力する。

2.3 どこでファジィ検索の処理を行うか

上記のようにしてファジィ検索を行うときに、(i) と (vii) についてはウェブクライアント上でブラウザが行い、(iii) と (v) はウェブサーバ上のアプリケーションが行い、(iv) はデータベースサーバ上のデータベース管理システムが行う。しかし、上記の (ii) と (vi) の処理 (ファジィ集合の処理) をどこで行うか、また、その処理に用いるメンバシップ関数をどこで定義し保持するかについては、いくつかの方法が考えられる。

ファジィ集合の処理を行う場所については、サーバ側とクライアント側が考えられる。前回、我々はファジィ集合の処理をウェブサーバ上で行うシステムを試作した。しかし、多くのユーザがシステムにアクセスすることによって負荷が集中した場合は、クライアント側でファジィ集合の処理を行う方が有利であると考えられる。

また、処理に用いるメンバシップ関数をどこで保持するかに関しては、同一のユーザが異なったクライアントからシステムを利用した場合でも同一の結果を得ることができるという点からサーバ側で保持する方が有利であると考えられる (図 2)。

そこで、今回はウェブサーバ側からファジィ集合の処理を行うアプリケーションとメンバシップ関数の定義をダウンロードすることによって、ウェブブラウザ上でファジィ集合の処理を行うシステムを試作した。

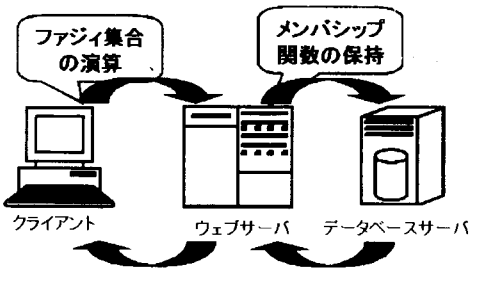


図 2: ファジィ集合の処理を行う場所

3. ブラウザ上で処理を行うシステム

今回、ファジィ集合の処理をウェブブラウザ上で行うシステムを試作するにあたり Java Applet を用いた。また、Java Applet とデータベース管理システムとの間のデータのやりとりをウェブサーバ

上で仲介するアプリケーションにPHPを用いた。

3.1 具体的な方法

データベースには日付、天気、気温、雨量のデータを定義しておき、ユーザは気温に関して、“暑い(hot)”、“寒い(cold)”、“ふつう(middle)”といったデータや、日付に関して、“春(spring)”、“夏(summer)”、“秋(fall)”、“冬(winter)”といったデータを検索したいとする。このとき、具体的には次のような処理を行う(図3)。

(i) データベースを検索するページにアクセスすると、サーバ側からファジィ集合の処理を行うアプリケーションとメンバシップ関数の定義がダウンロードされる。

(ii) ユーザは図4のように条件を入力する。

(iii) ブラウザ上のアプリケーションは条件として指定されたファジィ集合名に対して、あらかじめ定義されているメンバシップ関数からメンバシップ値が0より大きい範囲を求め、その範囲のデータを求めるSQL文を作成しウェブサーバに送る。

(iv) ウェブサーバ上のアプリケーションは送られてきたSQL文を用いてデータベースサーバに対して問い合わせを行う。

(v) データベースサーバは問い合わせに対する結果を返す。

(vi) ウェブサーバ上のアプリケーションはその結果を受け取り、ブラウザ上のアプリケーションに返す。

(vii) ブラウザ上のアプリケーションはウェブサーバから帰ってきたデータについてメンバシップ値をそれぞれのデータに付加し、その値によって降順にソートする。

(viii) ブラウザ上のアプリケーションがこの結果を

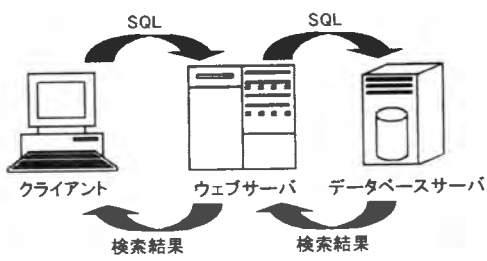


図3: ブラウザ上で処理を行うシステム

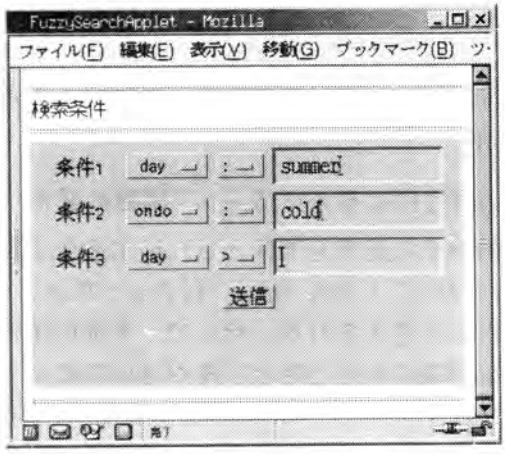
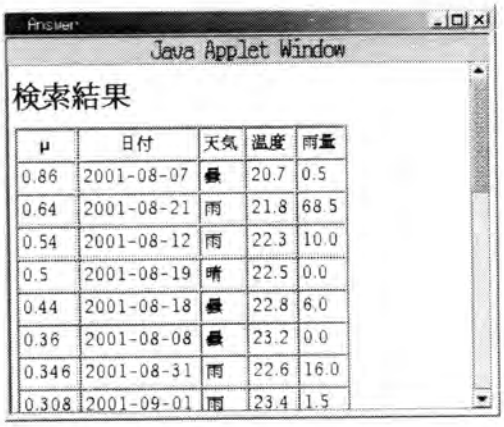


図4: 検索画面



μ	日付	天気	温度	雨量
0.86	2001-08-07	曇	20.7	0.5
0.64	2001-08-21	雨	21.8	68.5
0.54	2001-08-12	雨	22.3	10.0
0.5	2001-08-19	晴	22.5	0.0
0.44	2001-08-18	曇	22.8	6.0
0.36	2001-08-08	曇	23.2	0.0
0.346	2001-08-31	雨	22.6	16.0
0.308	2001-09-01	雨	23.4	1.5

図5: 検索結果

画面に表示することによって、ユーザは先に行った問い合わせに対する回答を図5の形式で得ることができる。

3.2 複数の検索条件

データベース検索に対する、複数の条件によるand検索についてはファジィ集合における積演算を用いることによって可能である。例えば、“夏の寒い日”という検索を行うときには、“夏”と“寒い”のメンバシップ値が0より大きい範囲についてデータベースサーバにデータを要求し、返ってきたデータに対して次のような演算を行うことによってそれぞれのデータの検索条件に対する一致度($\mu_{summer \cap cold}$)が計算できる。

$$\mu_{summer \cap cold} = \min\{\mu_{summer}(d), \mu_{cold}(t)\}$$

ここで、μ_{summer}、μ_{cold}はそれぞれ“夏”と“寒い”のメンバシップ関数で、d、tはそれぞれ日付、温度である。

また、それぞれの検索条件に対して重みづけを行うことによって、よりユーザが求めている検索結果に近いデータを得ることが可能になると考えられる [3]。

3.3 他の属性によるメンバシップ関数の変化

上記の季節と温度を条件とした検索を行うときに、夏の "寒い" と冬の "寒い" は異なったファジィ集合であると考えられる。そこで、季節の条件において夏が選ばれたときと、冬が選ばれたときに異なる "寒い" のメンバシップ関数 (図 6) を用いるというような方法を用いると、さらにユーザの要求に近い検索結果を導き出すことが可能となる。

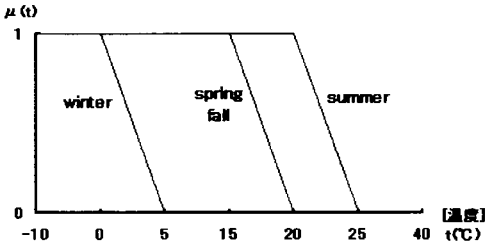


図 6: それぞれの季節における "寒い"

4. 状況に応じたシステム

今回の方法を用いることによって、ファジィ集合の処理によって生じる負荷の集中は避けることが可能である。しかし、この方法には以下の問題点が考えられる。

- クライアント側で Java Applet などのアプリケーションを実行できる環境が必要である。
- サーバ側からクライアント側へのデータの通信量が多くなる可能性がある。

そこで、実際に検索を行うときの状況に応じた処理方法を用いることが必要である。

具体的には、次のように状況に応じてファジィ集合の処理を行う場所を決めれば良いと考えられる。

- サーバ側の処理能力に余裕がある場合はサーバ側でファジィ集合の処理を行う。また、ネットワークが混雑していると考えられる場合にはサーバ側で処理を行うことを考慮する。
- そうでない場合は、クライアント側でファジィ集合の処理を行う。
- ただし、クライアント側でファジィ集合の処理を行うことが難しい場合はサーバ側で処理を行う。

また、サーバ側で処理を行うときに、データベース管理システムの機能によって、すべての検索結果のデータをウェブサーバ上のアプリケーションで扱うことなくメンバシップ値によるソートを行うことが可能であると考えられる。

5. おわりに

本論文では、ウェブ上でのデータベース検索に対してファジィ検索を行う方法の 1 つとして、ファジィ集合の処理をブラウザ上で行うシステムを試作した。今後、別々のユーザに対してそれぞれに適したメンバシップ関数を用いることができる機能を組み込むとともに、将来的には、メンバシップ関数をそれぞれのユーザに合うようにチューニングするシステムを実現したい。

また、システムの状況に応じて最も適した場所でファジィ集合の処理を行うシステムと、サーバ側で処理を行うときにデータベース管理システムの機能を利用するシステムについても研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

[1] 馬野 元秀, 松尾 岳明, 瀬田 和久, 岡田 真,"データベースに対するウェブからのファジィ検索", 第 18 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.29-32, 2002

[2] C.J. Date, *An Introduction to Databese Systems 6th edition*, Addison-Wesley, 1995 (藤原 譲 監訳, 原書 6 版 データベースシステム概論, 丸善, 1997)

[3] 日本ファジィ学会 編, ファジィ・データベースと情報検索, 講座ファジィ 9, 日刊工業新聞社, 1993

[問い合わせ先]

〒599–8531
堺市学園町 1 – 1
大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
馬野 元秀
TEL: 072–254–9675
FAX: 072–254–9930
E-mail: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

ニュースサイトにおける一般性の高い記事の抽出

Extraction of common articles in news sites

北川　寛，大道寺　聡，大栢　良介，高木　友博
Kan Kitagawa, So Daidoji, Ryosuke Ohgaya, Tomohiro Takagi
明治大学大学院 理工学研究科
Graduate School of Science-and-Engineering, Meiji University

Abstract: We proposed a system that navigates a user to find common articles in complex news websites. It is achieved by extracting common articles comparing several news sites, highlighting them and eliminating advertisements. Experimental results using four major Japanese web news showed that the system performed very well and achieved high precision and recall to find important articles.

1．はじめに

現在、Webにおける情報発信の容易性から多くのニュースサイトが存在するが、そこには多くの問題がある。

まず、電子化された文書では文字やレイアウトなどの自由度がこれまでのメディアより大きい。そのため、各ニュースサイトはそれぞれに異なったレイアウトをとり、それらのトップページは多種・多量の情報によって、非常に煩雑になりがちである[1]。それはユーザを不快にするだけでなく必要な情報を埋没させてしまう恐れがある。

次に、各ニュースサイトの個性の問題がある。ニュースの一般性や重要度などを量る絶対的な基準はないので、掲載されるニュースには偏りが存在する恐れがある。

以上の問題から、ニュースサイトに対する均一的な見方ができず、ユーザは困惑してしまうことが多い。

そこで、

- 全てのサイトに適応可能な見やすいレイアウトは存在しない[2]
- どこまでがユーザにとって有益な情報かを見極めずに必要な情報まで奪ってしまうのは逆効果で、一画面にすべての情報を表示する方がユーザにとっては情報空間を認識しやすい [3]

ことを考慮し、本研究では、ニュースサイトのトップページにおいて、ニュース記事が書かれている箇所を同定し、変形を加えた後で再表示するシステムを提案する。再表示に際しては、複数のニュースサイトに共通している記事は一般性の高い記事であるという考えに基づいて、該当箇所をハイライト表示する。

2．システム

本システムは、HTML解析、ニュースの抽出・比較、HTML修正の三つの処理から構成される。以降で詳細の説明をするにあたって、HTMLの各要素を次のように呼んでいる。

- font　：タグ名
- /font　：終タグ
- color=#000000　：パラメータ
- size=5　：パラメータ
- タグ名と終タグの間　：コンテンツ

2.1 HTML解析 (①読み込み)

まず、対象となるページのHTMLソースコードを、タグ名、パラメータ、コンテンツと分けて先頭から順にタグ表に格納していく。

2.2 ニュースの抽出・比較 (②解析)

次に、タグ表のコンテンツ部から全てのコンテンツを抽出する。この際、“ ”などのHTMLにおける特殊文字は除き、文字数が極端に短いメニューなどを表すコンテンツを対象としないことで、ニュースを表すコンテンツを区別する。

茶筌[7]を利用して、抽出されたコンテンツに形態素解析を行い、解析結果から名詞のみを抽出する。例外として、“人”や“発売”といった一般的過ぎる名詞、“速報”や“特集”のようなニュース以外のものを表すと思われる名詞に関してはストップワードとみなして抽出しない。

ページ内の全ニュースの名詞を抽出し終えたら、ニュース毎に生成されるキーワード集合に対してマッチングを行うことでサイト間でのニュースの比較を行う。ニュース同士の比較には、共通する名詞の数を基に計算した一致度（式2.1）を用いる。

$$\frac{AB}{A+B-AB} \qquad (2.1)$$

- A　：ニュースaの名詞の数
- B　：ニュースbの名詞の数
- AB　：a、bに共通する名詞の数

サイトAのニュースaとサイトBの全ニュースとで求めた一致度の中で、最も値の大きいものをニュースaの一致度とし、更に、一致度が予め定めた閾値を超えるニュースを、

一般性が高いニュースとみなす。

具体的な比較例を（図2.1）に示す。

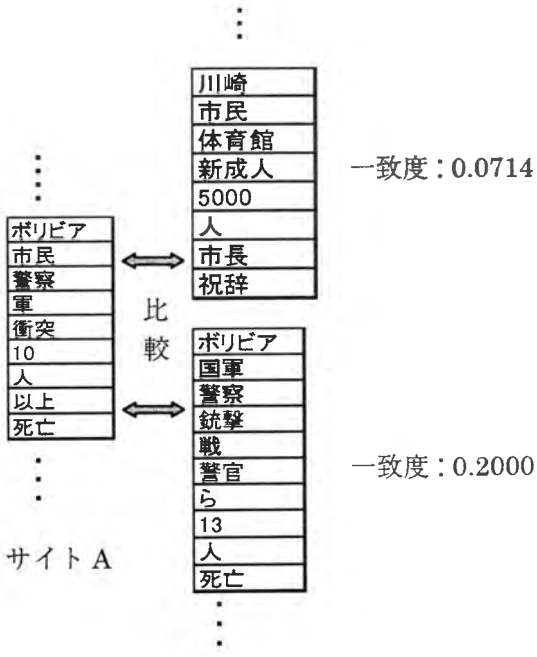


図 2.1 サイト間のニュースの比較

この例では、サイトAの『ボリビアで市民・警察と軍が衝突、１０人以上死亡』というニュースと、サイトBの『川崎市民体育館に集まった新成人５０００人に市長が祝辞』、『ボリビアで国軍と警察が銃撃戦、警官ら１３人死亡』というニュースを比較している。

2.3 HTML修正（③レイアウト変更）

タグ表の中身を順番に出力すれば元のレイアウトとなるが、新たにタグを加えて、A）一般的なニュースのハイライト表示、B）ニュースエリア（ニュースを表す箇所全体）のハイライト表示、C）広告の排除、を実現する。

A）一般的なニュースのハイライト表示

ニュース同士の比較により一般的であると判断されたニュースに対して、その背景をハイライト表示する（図2.2）。

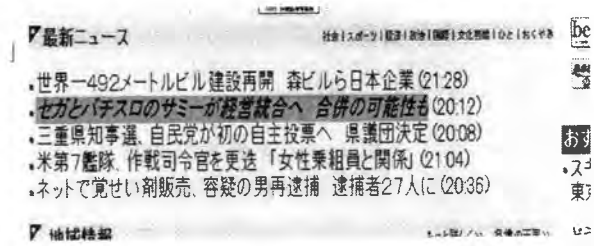


図 2.2 ニュースのハイライト

B）ニュースエリアのハイライト表示

ニュースサイトの中には、table タグを用いてページ全体の構成を決めているサイトが多い。一つには、table の列数を決める td タグのパラメータとして単位セルの大きさを決める書式がある。他には、メニュー部やニュースのカテゴリ部などのエリアを表す大きなセルを、縦（rowspan）または横（colspan）にまたぐ単位セルの数で表す書式がよく用いられる（図2.3）。

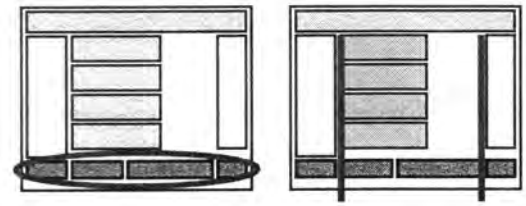


図 2.3 colspan、rowspan によるレイアウト

これを踏まえ、本システムが採用した手法では、td タグによってニュースが「政治」や「スポーツ」などにカテゴライズされたサイトを想定している。カテゴリを表す td の高さはニュースの数によって変化するが、幅は colspan を利用して統一されることが多い。この特徴を利用してニュースエリアを同定する。つまり、どれかひとつの td タグの colspan 値を特定することが出来れば、その他のカテゴリについても予測することが出来る。これによりニュースエリア全体の同定が可能になる。

表示の際には、colspan 値によって特定された各カテゴリをハイライトする。全てのカテゴリがハイライトされれば、結果的にニュースエリア全体がハイライトされることになる（図2.4）。

図 2.4 ニュースエリアのハイライト

C）広告の排除

多くの画像付き広告はリンク先の URL を保持するが、その URL は非常に長い場合が多い。これは、リンク先への参照がその広告によってもたらされたことを特定するための ID 番号や、多数の広告を整理するための ID 番号が付加されているからである。この特徴を利用して、リンク先の URL が極端に長いものを広告とみなし、画像を表示させないよう

にする。

尚、上記 A)、B)、C)の処理を適用する対象ページは、最初に読み込んだ方のサイトのトップページとしている。

システムの概略を（図 2.5）に示す。

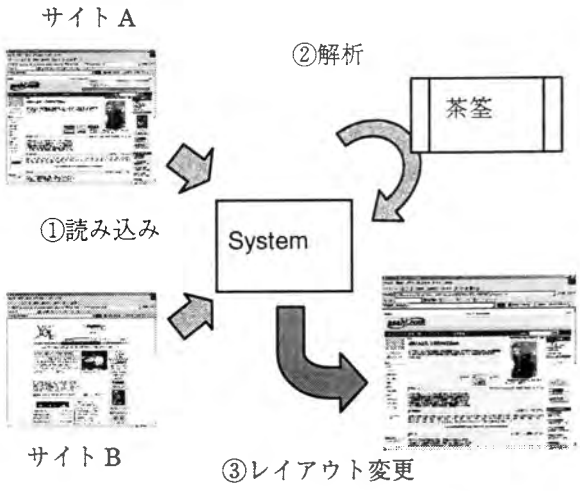


図 2.5 システム構成

3．検証

読売、毎日、産経、東京の各新聞社が運営するニュースサイトを対象とし、これらの全ての組み合わせに対して 7 日間分のデータを集め、筆者の主観との比較を行った。

具体的には、1）システムの精度、2）システムの再現率、3）対象とするニュースサイトによる差、について検証を行った。

尚、今回用いる値は次の通りである。

- X ：システムも筆者も一般性の高いニュースと判断したもの
- Y ：システムは一般性の高いニュースと判断したが、筆者はそうではないと判断したもの
- Z ：システムは提示しなかったが、筆者は一般性の高いニュースと判断したもの

1） 提示されたニュースの精度

システムがハイライト形式で提示したニュースのうち、一般性の高いニュースがどれだけ含まれているかを検証する。式（3.1）を用いて精度を表す。

$$\frac{X}{X+Y} \qquad (3.1)$$

この結果、全比較の平均値は 0.906 を示した。これは、本システムが非常に高い精度で一般性の高いニュースを提示していると言える。

2） 一般性の高いニュースの再現率

次に、ニュースサイトに含まれる一般性の高いニュースを本システムがどれだけ提示することが出来るか（再現率）を検証する。式（3.2）によって再現率を求める。

$$\frac{X}{X+Z} \qquad (3.2)$$

検証した結果、再現率の平均値は 0.951 となった。この結果、本システムは対象ニュースサイト内の一般性の高いニュースを、ほぼ漏らすことなく提示していると言える。

3） 対象とするニュースサイトによる差

上記 1）、2）においてシステムの精度、再現率を検証したが、ここでは比較に用いたニュースサイトにおける精度、再現率の差を検証する。

サイト毎に求めた精度、再現率を次の（表 3.1）、（表 3.2）に示す。

尚、表中（ ）で括られたものが比較対象のニュースサイトである。

表 3.1 サイト毎の精度

	（読売）	（毎日）	（産経）	（東京）
読売		0.922	0.929	0.94
毎日	0.956		0.868	0.935
産経	0.938	0.999		0.868
東京	0.862	0.914	0.914	

表 3.2 サイト毎の再現率

	（読売）	（毎日）	（産経）	（東京）
読売		0.984	0.958	0.859
毎日	0.967		0.99	0.958
産経	0.972	0.984		0.972
東京	0.851	0.936	0.98	

表から、比較に用いたニュースサイトによって多少の差は見られるものの、どのニュースサイトでも高い精度と再現率で一般性の高いニュースを抽出することが出来たと言える。

4．考察

本研究は、一般性の高いニュースのハイライト表示、ニュースエリア全体のハイライト表示、広告の排除を行い、どのニュースサイトでもある程度均一な見方ができるようにユーザをナビゲートしようと試みた。

一般性の高いニュースの特定に関しては、ニュースの内容まで踏み込まずとも高い精度を得ることが出来た。

これにはニュースサイトの特性が大きく影響していると思われる。ニュースサイトはたくさんのニュースが集まって構成されているが、限られたスペースに多くのニュースを掲載する必要があるため、ヘッドラインのみがトップページに表示され、詳細な記事はハイパーテキスト化されている。そのため、ヘッドラインには短い文章で記事の内容をよく表す

単語のみが用いられ、余分な情報は盛り込まれない傾向がある。こうしたことから、名詞の比較だけで一般性が高いニュースを選ぶことが出来たと考えられる。

以下に、ニュース同士の比較、ニュースエリアのハイライト、広告の排除、システム全体における各課題を示す。

ニュース同士の比較： 本システムでの一致度の計算方法は非常に単純なものであった。また、比較に名詞を用いるにしても、固有名詞や数詞に重みをつけるなど様々な方法が考えられる。

更に、抽出された単語を辞書で拡張して比較する手法やストップワードの厳密な同定によっても精度が上がる可能性が考えられる。

ニュースエリアのハイライト： 今回はtableを用いてページを構成しているものを対象としたが、table タグや colspan を用いないレイアウトのニュースサイトも少なくない。

今後は、幾つかのサイトに共通する特徴を見つけ出し、その特長に適用できる手法を増やしていくことが必要であると思われる。

広告の排除： ニュースエリアの特定と同様、URL から広告かどうかを判断することは非常に難しいため、このシステムの手法では、全ての広告を排除することは出来ない。ニュースエリアの特定と同様、完全な手法は存在しないので少しずつ精度を上げる検討が必要である。

システム全体： 現在は、2つのサイト間でニュースの比較を行っているが、今後は、同時に比較するサイトの数を3つ以上に増やすことで、より一般性の高いニュースを同定できるようにすることが望ましい。

参考文献

[1] Jakob Nielsen: Marginalia of Web Design, http://www.useit.com/alertbox/9611.html

[2] Jakob Nielsen: Predictions for 1996 Revisited, http://www.useit.com/alertbox/9601.html

[3] 山岡俊樹, 岡田明: ユーザインタフェースデザインの実践, 海文堂 (1999)

[4] Yahoo! Japan NEWS: http://headlines.yahoo.co.jp/hl

[5] asahi.com: http://www.asahi.com/

[6] Yomiuri On Line: http://www.yomiuri.co.jp/

[7] 茶筅: http://chasen.aist-nara.ac.jp/

B. Suh, A. Woodruff, R. Rosenholtz, and A. Glass: Popout Prism: Adding Perceptual Principles to Overview + Detail Document Interfaces, SIG-CHI (2002)

Hao Chen, Susan Dumais: Bringing Order to the Web: Automatically Categorizing Search Results: SIG-CHI, pp.145-152 (2000)

Ben Shneiderman: Designing the User Interface 2nd edition, Addison-Wesley (1992)

連絡先：

〒214-8571

神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

明治大学 理工学部 情報科学科 ヒューマン・インターフェース研究室

電話： 044 934 7483

北川 寛

Email： kan@cs.meiji.ac.jp

大道寺 聡

Email： daidohji@cs.meiji.ac.jp

異種メディア相互検索システムに関する検討

A Study on Inter-Retrieval Systems among Different Media

生山 知 Tomo IKUYAMA 関西大学 Kansai University
林坂 享祐 Kyosuke RINSAKA 関西大学 Kansai University
梶川 嘉延 Yoshinobu KAJIKAWA 関西大学 Kansai University
野村 康雄 Yasuo NOMURA 関西大学 Kansai University

Abstract In this paper, we study a KANSEI inter-retrieval system among different media. We have already proposed KANSEI retrieval systems for music and pictures. Therefore, we have combined these KANSEI retrieval systems on a basis of some problems of conventional KANSEI inter-retrieval systems. The conventional KANSEI inter-retrieval systems use common KANSEI words or common main factor for KANSEI words, e.g. brightness for pictures and brightness for music. However, two media with different impressions may correspond, e.g. a night view (a dark picture) and pleasant music. Therefore, this paper proposes a method that combines KANSEI words suitable for pictures and music. Furthermore, this paper shows new evaluation results of the proposed KANSEI inter-retrieval system.

1. はじめに

近年，計算機技術の発達により，マルチメディア情報をコンピュータで扱う事が技術的にもコスト的にも特別な事ではなくなってきた．ここで言うマルチメディア情報とは，映像と音響が中心である．マルチメディア機器の普及により，演出効果に関する専門家でないエンドユーザが，マルチメディア作品を自分で創る機会が増加してきている．マルチメディア作品は画像や音楽といったマルチメディア情報を効果的に用いて相手に訴えかける事を目的とするので，それら演出効果の品質は作品の良し悪しを決める重要なものである．ところが，エンドユーザにとって，効果的にマルチメディア情報を用いた高品質の作品を制作する事は非常に困難である．従来，これらの作品は，監督(ディレクター)，デザイナー，音楽家等の視覚・聴覚演出効果に関する専門家が，多くの資金と時間を費やし，共同作業をする事によって創られてきた．

そこで，画像に見合う音楽を自動的に選定する事ができるならば，作品の制作に費やしていた多くの資金と時間を軽減する事ができる．またエンドユーザも，効果的にマルチメディア情報を用いた高品質の作品を制作する事ができる．この事は，音楽に見合う画像を自動的に選定する場合についても同様の事が言える．

そこで本研究では，異種メディア間における相互検索を可能にするシステムの構築を行っている．先行研究として文献 [1],[2],[3] が報告されている．文献 [1],[2] では，画像の自然性と音楽の自然性というように同様に解釈した主因子を共通するものとして結び付けを行っている．しかし，例えば，夜景の町並み（暗い画像）と楽しい音楽というように画像と音楽の印象が異なっても見合うものもあるにも関わらず，印象の一致度だけで結び付けをするだけでは，必ずしもユーザが求める結び付けが得られるとは限らない．また，文献 [3] では，動画と音楽を同じ感性語で評価を行い，それらの一致度を求める事により検索を行っている．しかし，動画，音楽を評価する際，それらの感性語は言葉としては同じでも各々の印象において意味合いが必ずしも一致するとは限らない．そこで本研究では，画像と音楽各々に適した感性語を用意し，画像と音楽の結び付けを行った [4]．また，構築した相互検索システムの評価を行った [5]．

2. システム概要

ここでは，本研究で構築を行っている検索システムの概要について示す．検索システムの構成図を図 1 に示す．図 1 に示すように，このシステムは大きく分けて「画像感性空間生成部」,「音楽感性空間生成部」,「検索システム部」の三つの部分から構成されている．

画像感性空間生成部は，画像の印象（明るい，暖かいなど）の度合いによって，画像印象の心理的相関を表す画像感性空間においての画像の位置を決定する部分である．SD 法を用いて画像印象を求め，因子分析を用いて感性空間上の位置を決定する．ここで，画像を登録する度に SD 法による評価実験を行うのは手間がかかる．そこで，評価実験を行っていない画像の画像感性空間座標値を自動的に求める「画像自動インデクシングシステム」を用意する．画像自動インデクシングシステムは画像から抽出することのできる特徴量（色情報 etc.）を用いて画像の感性空間座標値を

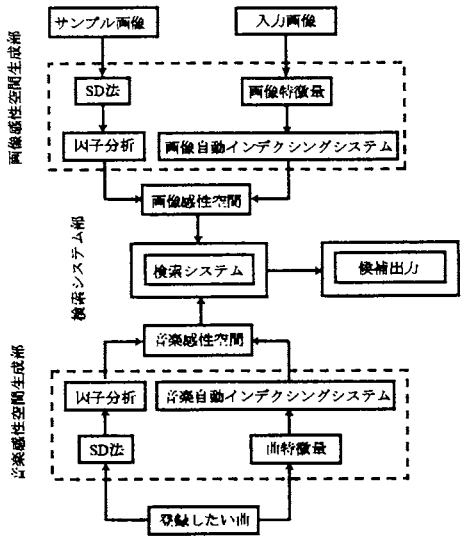


図 1: システム概要

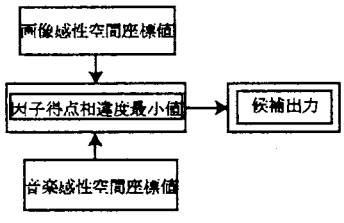


図 2: 検索システム部概要

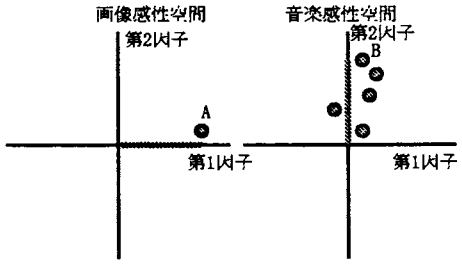


図 3: 候補選択例

求めるシステムである．また，音楽感性空間の生成方法も，画像感性空間の場合と同様である．我々はこれまでに音楽感性空間生成部に関して文献 [6] で提案している．

検索システムは，画像感性空間と音楽感性空間を結び付け，画像に見合う曲，曲に見合う画像を検索する部分である．検索システム部の概要を図 2 に示す．印象が結び付いている軸それぞれの因子得点の差（距離）をとり，差が最も小さいものを異種メディアに見合う候補とする．画像に見合う音楽を検索する例を図 3 に示す．画像感性空間において，ある画像 A が第 1 因子における因子得点が最も高いとする．そして，画像の第 1 因子と音楽の第 2 因子が結びついているとすれば，画像 A の因子得点と音楽感性空間の第 2 因子における因子得点の差が最小のものを画像 A に見合う音楽と考える．この場合は音楽 B が画像

表 1: 画像に用いた感性語

にぎやか・活気のある	静かな・寂しい
暖かい	冷たい・涼しい
陽気・明るい	陰気・暗い
さわやか	鬱陶しい・重苦しい
雄大	小ぢんまり
重々しい・威厳のある	貧弱・みすぼらしい
モダン・現代的	レトロ・伝統的
沈静的・穏やか	躍動感・迫力のある
派手・豪華	地味・質素
潤いのある	渇いた
自然な	不自然な

表 2: 音楽に用いた感性語

明るい	暗い
重い	軽い
かたい	やわらかい
安定	不安定
澄んだ	にごった
滑らか	歯切れのよい
激しい	穏やか
厚い	薄い

A に見合う音楽となる．また，因子得点は以下に示す関係式から求めることができる．

$$\mathbf{F} = \mathbf{ZA}\left(\mathbf{A}^T\mathbf{A}\right)^{-1} \tag{1}$$

ここで，$\mathbf{Z}$ は正規化された評価データ，$\mathbf{A}$ は因子負荷量である．

画像には写真（風景），音楽にはピアノ曲（ジャズ，クラシック，etc.）を用いて感性空間を構築している．画像に用いた感性語は文献 [7] を参考にした．表 1 に画像に用いた感性語対を示す．音楽についての感性語対は表 2 の通りであり，文献 [6] と同じである．また，因子分析によって抽出された主因子を表 3，表 4 に示す．表 3 は画像における主因子，表 4 は音楽における主因子を示す．表 5 は，画像と音楽を結び付けるために行った適合実験の結果で，表 3 と 4 に示す形容詞対をそれぞれ「明るい」,「暗い」などの単語に分解し，2 点試験法において危険率 5 % で有意と判定されたものを示している．今回は各対象につき 14 人の評価を得ているので，11 人以上の回答で有効となる．表 5 をみると，画像と音楽の印象が対応していないところがあるのがわかる．そこで，検定による有意差は出ないが，10 人以上の回答で有効とすると表 6 が得られた．表 6 の結果ではすべての印象が結び付いていることがわかる．ここで，本研究の目的は実際に

表 3: 画像における主因子

主因子	感性語（解釈）
第 1 因子	陽気・明るい - 陰気・暗い（明暗性）
第 2 因子	自然な - 不自然な（自然性）
第 3 因子	暖かい - 冷たい（冷暖性）
第 4 因子	雄大 - 小ぢんまり（景観性）
第 5 因子	重々しい - 貧弱（威厳性）
第 6 因子	沈静的 - 躍動的（静動性）

表 4: 音楽における主因子

主因子	感性語（解釈）
第 1 因子	明るい - 暗い（明度）
第 2 因子	激しい - 穏やか（力量性）
第 3 因子	安定 - 不安定（安定性）
第 4 因子	重い - 軽い（質量性）
第 5 因子	滑らか - 歯切れのよい（躍動性）

表 5: 画像を対象とした検定による適合実験結果

画像	音楽
陽気・明るい	安定
暗い	暗い
不自然な	重い
自然な	穏やか
暖かい	
冷たい	重い，暗い，滑らか
雄大	
小ぢんまり	
重々しい	重い，暗い
貧弱	
躍動感	重い
沈静	

ユーザがシステムを使って満足するものを目指しているので，この結果を用いてユーザが満足すれば問題はないと考えられる．この結果を見ると，例えば，画像における「明るい」に音楽における「安定」が結び付いていることから共通の主因子以外の印象も結びつくことがわかる．よって，今回の実験により，画像と音楽の印象が異なっても見合うものもあるということがわかった．

3. システム評価

3.1. 評価実験

表 6 の結果を用いて構築したシステムの評価を行う．評価を 5 段階評価で行い，5：合っている，4：どちらかといえば合っている，3：どちらでもない，2：

表 6: 画像を対象とした適合実験結果

画像	音楽
陽気・明るい	安定，明るい
暗い	暗い，重い
不自然な	重い
自然な	穏やか
暖かい	明るい，安定
冷たい	重い，暗い，滑らか
雄大	滑らか
小ぢんまり	暗い，不安定
重々しい	重い，暗い，滑らか
貧弱	滑らか
躍動感	重い
沈静	穏やか

どちらかといえば違う，1：違うとする．また，評価システムは，提案法を用いて構築したシステム（システム 1），ランダムに音楽を選択するシステム（システム 2），画像と音楽が全く適合していないシステム（システム 3）の 3 つのシステムを用意する．システム 3 はこれまでの画像および音楽の評価実験を参考にし，実際に自分で視聴して設定した．なお，実験は因子分析によって求めた 6 因子を代表する画像（12 枚）に絞って行う．被験者は 20 名で，順序効果を考慮するためシステムを数種類用意した．また，システムの内容については被験者に一切の情報を与えなかった．

3.2. 実験結果

3.1. の条件で行った実験結果を表 7，表 8 に示す．表 7 は 240 試行における適合評価結果，表 8 は各被験者における 12 試行の評価の平均である．表 7，表 8 からシステム 1 は，他の 2 つのシステムに比べ，良好な結果が得られていることがわかる．また，システム 3 の結果より本システムのデータベースにはどのような画像に対しても適合するような音楽ばかりが登録されているわけではないこともわかる．

次に，システムの有意差を χ^2 検定により求める．システム 1 と 2，システム 2 と 3 およびシステム 1 と 3 の評価 5 に関して有意差を求めた結果，いずれにおいても 0.05 を下回り有意差が存在した．よって，提案システムはランダムシステムより有効である．また，表 9 に示すシステムの総合満足度より，提案システムが満足できるものであったことがわかる．

4. まとめ

本稿では，感性を用いた異種メディア相互検索システムの評価を行い，システムの有効性を検討した．その結果，ランダムで検索するシステムより有効であることがわかった．しかし，心理的に画像と音楽が合っ

表7: 適合評価

	system1		system2		system3	
適合度	評価数	割合[%]	評価数	割合[%]	評価数	割合[%]
5	75	31.3	51	21.3	8	3.3
4	96	40.0	88	36.7	47	19.6
3	53	22.1	52	21.7	50	20.8
2	15	6.3	39	16.3	79	32.9
1	1	0.4	10	4.2	56	23.3

表8: 人別評価

	system1		system2		system3	
適合度	人数	割合[%]	人数	割合[%]	人数	割合[%]
5.0-4.5	4	20.0	0	0	0	0
4.5-4.0	4	20.0	2	10.0	0	0
4.0-3.5	7	35.0	7	35.0	0	0
3.5-3.0	5	25.0	10	50.0	5	25.0
3.0-2.5	0	0	1	5.0	4	20.0
2.5-2.0	0	0	0	0	7	35.0
2.0-1.5	0	0	0	0	3	15.0
1.5-1.0	0	0	0	0	1	5.0

表9: 総合満足度

	system1	system2	system3
満足度	人数	人数	人数
5	8	0	0
4	9	8	0
3	3	10	6
2	0	2	8
1	0	0	6

ているような気になる傾向も事実であるので，この点についてさらに検討する必要がある．また，画像によってはデータベース内に適した音楽が無い場合があるので，データを増やす必要がある．さらに，文献[8]のように音楽によって画像，映像にどういう効果を与えたいのかという観点からの検討も考えられる．以上の課題を改善し，本システムの更なる性能向上を目指す．

謝　辞

本研究の一部は関西大学重点領域研究ならびに関西大学学術研究助成基金の援助のもとで行われた．

参考文献

[1] 宝珍輝尚，高田真介，都司達夫，“感性に基づくマルチメディアの相互アクセスについて”，情報処理学会データベースシステム，Vol.124，No.3，pp.17-24，May 2001.

[2] 宝珍輝尚，都司達夫，“感性に基づくマルチメディアデータの関連付けに関する一考察”，信学技報，CS2000-113，pp.19-24，Dec. 2000.

[3] 古賀広昭，下塩義文，小山善文，“画像に合った音楽の選定技術”，信学技報，HCS99-34，pp.25-32，Sep. 1999.

[4] 林坂享祐，梶川嘉延，野村康雄，“異種メディア相互検索システムに関する検討 - 画像に見合う音楽について -”，信学技報，HIP2002-41，Vol.102，No.533，pp.33-38，Dec. 2002.

[5] 林坂享祐，梶川嘉延，野村康雄，“異種メディア相互検索システムに関する検討 - システムの評価 -”，DEWS2003 6-P-01，Mar. 2003.

[6] 池添剛，梶川嘉延，野村康雄，“音楽感性空間を用いた感性語による音楽データベース検索システム”，情処学論，Vol.42，No.12，pp.3201-3212，Dec. 2001.

[7] 椋木雅之，田中大典，池田克夫，“対義語対からなる特徴空間を用いた感性語による画像検索システム”，情処学論，Vol.42，No.7，pp.1914-1921，Jul. 2001.

[8] 岩宮眞一郎，“映像作品における視聴覚コミュニケーション”，信学技報，HIP36-42，pp. 39-46，Dec. 2002.

問い合わせ先

〒 564-8680
大阪府吹田市山手町 3-3-35
関西大学 工学部 電子工学科
梶川 嘉延
TEL: 06-6368-0528
E-mail: kaji@joho.densi.kansai-u.ac.jp

インテリジェント遠隔監視・制御システム

Intelligent remote monitoring and control system

藤吉誠、○福島龍太郎、桝屋道治*)
Makoto FUJIYOSHI , ○Ryutaro FUKUSHIMA , Mitiharu MASUYA*)
Hitz 日立造船株式会社、*)両津市クリーンセンター
Hitachi Zosen Corporation , *)Ryotsu Clean Center, Niigata

Abstract : We have developed an "Intelligent Remote Monitoring and Control System". The system consists of an on-site plant control system, mobile monitoring center, and data storage drive connected to the Internet by ISDN, ADSL, and wireless mobile phone line etc. After the plant's operating data are automatically downloaded to the data storage drive, it is routinely uploaded to the PC, mobile phone or other mobile PC. The data is used to monitor operational status, analyze daily process reports, optimize conditions, and evaluate our new intelligent control method based on fractal theory. We have evaluated the system's practicality, safety, and cost performance with monitoring and new intelligent control experiments with on-site PCs at the Ryotsu City Clean Center of Niigata and monitoring PCs at our Maizuru Environmental Development Center and various other types of mobile PC.

1　緒言

弊社では遠隔地から各種プラントの運転状況監視、制御にいたるまでを実施可能とした「インテリジェント遠隔監視・制御システム」を開発し、3Any（Anywhere, Anybody, Anytime）状態で、多プラントの集中管理をしている。これにより、通常時間がかかる Fuzzy 制御によるチューニング操作等を遠隔地から実施可能となり、実験効率が飛躍的に向上した。(1),(2)本報ではシステム全体の概要、特徴と遠隔収集したデータの活用事例を報告する。

2　システムの概要と特徴

Fig.1 は本システム概要を示す。図中、監視、制御 PC、Fuzzy コントローラは新潟県両津市クリーンセンターのごみ焼却炉に設置してあり、監視センターPC は弊社環境総合開発センター（舞鶴）、技術研究所（大阪）に設置してある。焼却炉は DCS で集中制御されており、監視、制御に必要な入出力点のみを DCS から直接 Fuzzy コントローラに取込んでいる。Fuzzy コントローラは監視、制御用 PC に直接接続し、PC 側から各種監視、制御、チューニング等が実施可能である。また監視、制御用 PC は ISDN,ADSL 等の常時接続インターネット回線を用いて監視センターPC と接続している。監視センターでは無線 LAN 経由の PC を含めて、複数の PC から監視、制御、チューニング、データ収集等を行っている。常時接続のインターネット回線を利用することで、専用線、固定 IP、ダイアルアップ費用などが発生しない安価な接続を実現している。監視、制御用 PC を直接遠隔監視、制御する手法は Windows_XP_Professional 搭載のリモートデスクトップ機能を活用し、コストミニマムなシステムとしている。日常の運転データはインターネット上のデータストレージ X_drive に保存する手法を用いている。一定時間ごとの運転データを一定間隔ごとに X_drive に自動転送し、監視センターPC 側では自動ダウンロードするプログラムを常駐させている。また、無線回線を使用することで移動型 PC、携帯端末等からも接続可能であり、ユビキタス社会に対応したシステムである。現在これらシステ

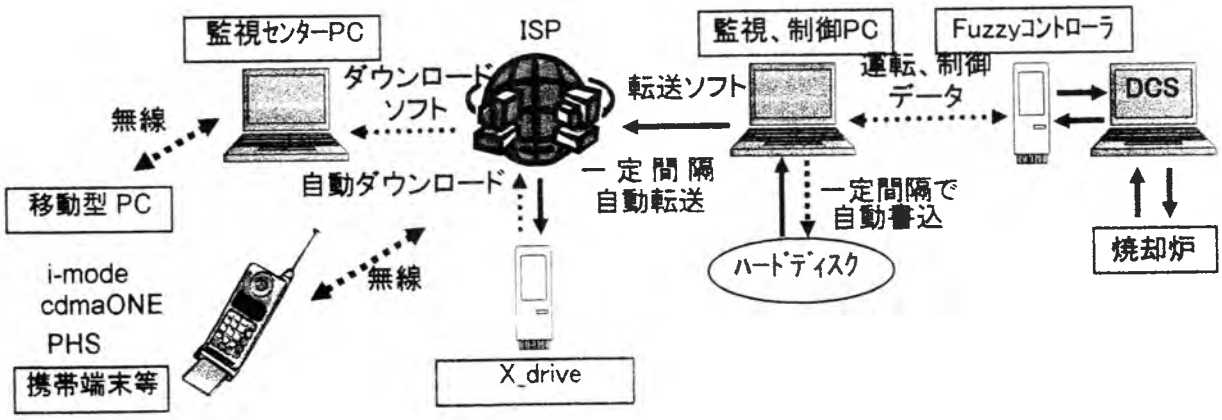
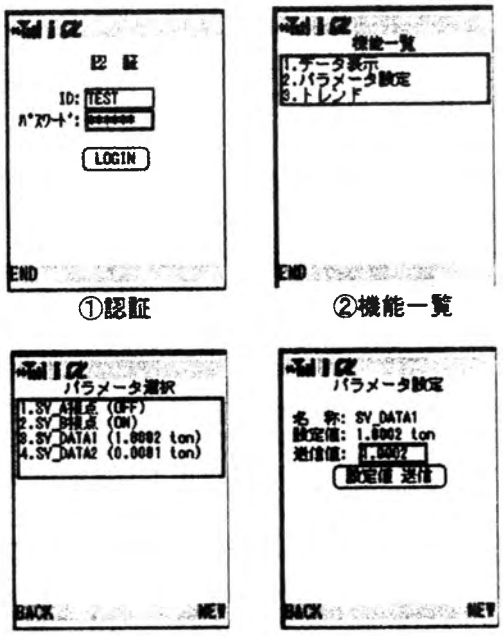


Fig.1　インテリジェント遠隔監視、制御システム概要

ムを稼動して6ヶ月が経過しているが大きな問題はなく遠隔監視、制御が行われている。尚、制御方法等に関しては前報[3]~[6]と同様である。

3 携帯電話による遠隔監視、制御

Fig.2 に i-mode 型携帯電話による遠隔監視、制御画面の一例を示す。①では ID、パスワードを入力することでセキュリティを保っている。②では運転データ表示、制御パラメータの設定、トレンド表示が可能である。③では各種 SV 値、Fuzzy 制御パラメータの設定、メンバーシップ関数の位置変更などが可能である。④では、③で選択したパラメータ設定値を変更し、送信ボタンを押すことで設定が完了する。



①認証　②機能一覧

③設定パラメータ選択　④パラメータ設定

Fig.2 i-mode 携帯電話による遠隔監視、制御

4 遠隔データの活用例

日々の遠隔採取データは①データ間の相関分析、②燃焼状況の未来予測、③GA による自動学習、④新規 Fuzzy 制御方式開発、などに活用している。このうち、フラクタル次元解析を活用した Fuzzy 制御手法の一例を紹介する。焼却炉内の採取データのうち、酸素濃度、フラッパー開度、一酸化炭素濃度の経時変化[3]~[6]はコッホ曲線に相似した幾何形状を示しているように思われる。そこで酸素濃度、フラッパー開度曲線 X（U_i:閉曲線）が同じ長さ d の折れ線 N(d) 個で近似できたとする。このとき X のハウスドルフ k 次元速度 $M^k(X)$ は

$$M^k(X) \fallingdotseq \liminf_{d\to 0}\left\{\sum_{i=1}^{N(d)} d^k \mid d(Ui)=d, X \subset \bigcup_{i=1}^{N(d)} i\right\}$$
$$= \lim_{d\to 0}\left\{N(d)\times d^k\right\} \quad \cdots \quad ①$$

で表せる[7]。ここである定数 k_0 においていろいろな直径 d に対して個数 N(d) を測定したところ、

$$N(d) = \mu \cdot d^{-k0} \quad \cdots \quad ②$$

の関係があったとすれば、

$$\lim_{d\to 0}\left\{N(d)\times d^{k0}\right\} = \mu > 0 \quad \cdots \quad ③$$

となる。よって X のハウスドルフ k 次元測度 $M^k(X)$ は $k=k_0$ において、

$$M^{k0}(X) \fallingdotseq \mu \quad \cdots \quad ④$$

となり有限確定な値を持つことになる。このとき②式を変形して

$$\log N(d) = -k_0 \log d + \log \mu \quad \cdots ⑤$$

とすることで、グラフの傾きから k_0 が算出可能である。ここで定義した k_0 を図形 X のフラクタル次元と定義することで酸素濃度、フラッパー開度の変動具合を定量的に表現できることになる。これにより、(1)酸素濃度変動のが激しさ、(2)ごみ投入量変動の激しさを経時的にとらえることができ、制御に応用可能となる。現在遠隔採取したデータに本手法を導入することで、下記のような Fuzzy ルールを検証中である。

IF $0<k_0<1$ THEN(2 次空気)ZR
IF $1 \leqq k_0 \leqq 2$ THEN(2 次空気)PB、(給塵量)NB

5 結言

・本システムにより 3Any 状態でのプラント監視、制御が可能となった。
・各種手法により遠隔採取データを活用することで、現場へのフィードバックが期待できる。

参考文献

(1)M.Fujiyoshi, R.Fukushima et al., 第 24 回全国都市清掃研究発表会論文集, 東京(2003)
(2)M.Fujiyoshi, R.Fukushima et al., 日立造船技報,vol63,no3,p20-23(2003)
(3)M.Fujiyoshi, R.Fukushima et al., Proc. of the7th SCEJ Symp. on Fluidization, Awaji, p40(2001)
(4)M.Fujiyoshi, R.Fukushima et al., 第 23 回全国都市清掃研究発表会論文集, 京都(2002)
(5)M.Fujiyoshi, R.Fukushima et al., Proc. 18th Fuzzy System Symosium, Nagoya, p25(2002)
(6)M.Fujiyoshi, R.Fukushima et al., Proc. of the 2nd i-CIPEC, Cheju, Korea, p129(2002)
(7)「フラクタル数学」石村貞夫、石村園子著、東京図書

連絡先：
〒625-8501 京都府舞鶴市余部下 1180
Hitz 日立造船(株) 環境事業本部
環境総合開発センター
福島龍太郎
電話：0773-62-8791、FAX：0773-62-4450
Email：fukushima_r@hitachizosen.co.jp

造水プラントにおける遠隔機器診断システム

Remote Diagnosis System for Desalination Plant Machine

堅多　達也
Tatsuya Katada
Hitz 日立造船株式会社
Hitachizosen Corporation

藤吉誠
Makoto Fujiyoshi
Hitz 日立造船株式会社
Hitachizosen Corporation

Abstract : The continuous normal operation without trouble is required for the fabricator of desalination plant. A remote monitoring system is introduced into the plant, and data collection and monitoring support the good operation of the plant. In addition, preventive maintenance technology such as prediction of trouble is required. The development of the remote diagnosis system that evaluates the condition of the equipment is being promoted, and the system is being tested. The current state of the system and the summary of the diagnosis algorithm are shown. Through the experiments, we confirmed the algorithm is effective.

1　はじめに

プラントの運転においては、運用管理上故障などによるアイドル時間の短縮は重要課題であり、構成する主要機器の設備異常の早期発見による予防保全技術が重要となる。当社では造水プラントにおいて、知覚情報（音、振動、画像など）から設備を構成する機器の運転状態を診断し遠隔で診断結果を配信する遠隔診断システムの開発に着手し、離島の造水プラントで実証試験を行っている。この開発を通じてプラントにおけるAOM（After-service, Operation & Maintenance）のあり方を検討し、ユーザーに役に立つ仕組み作りを始めている。

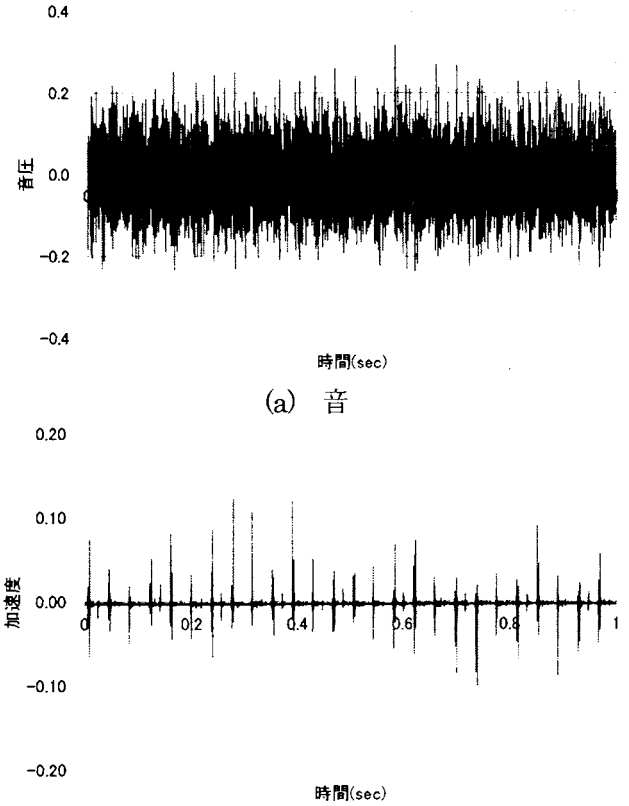
本稿では、この遠隔診断システムのコア技術である機器診断アルゴリズムについて報告する。

2　遠隔診断システム

システムの開発にあたり、診断対象は比較的故障が多く効果が大きいと予想される高圧ポンプとした。高圧ポンプについては、点検者は稼動している装置を手で触れ、音を聞き状態の診断を行っている。これをヒントに診断に使う知覚情報を音と振動とし、これら2つの異種情報を融合する手法にファジー推論を応用して、運転状態を診断するアルゴリズムを開発した。

2．1　知識（データ）の蓄積

診断アルゴリズムの開発にあたり、最初に高圧ポンプの音・振動データの収集を実施した。収集したデータの一例を図1に示す。このようなデータから通常運転時に関する音データと振動データの特徴として平均値、分散、最大値、最小値、差分平均値、差分分散値、差分最大値などのパラメータを計算し、それらを知識DBに蓄積している。



(a)　音

(b)　振動

図1　収集データの一例

2．2　診断アルゴリズムの構築

運転状態の診断は前記知識DBを基準として行う。

予防保全実現という観点から、診断は現在の状態だけでなく、未来の状態予測・診断も行う。診断アルゴリズムの概念図を図2に示す。

① 運転状態推定

音、振動それぞれについて、平均値パラメータの計算結果から、現時刻の運転状態の推定を行う。

② 未来値予測

運転状態推定の結果が稼動状態であった場合、音、

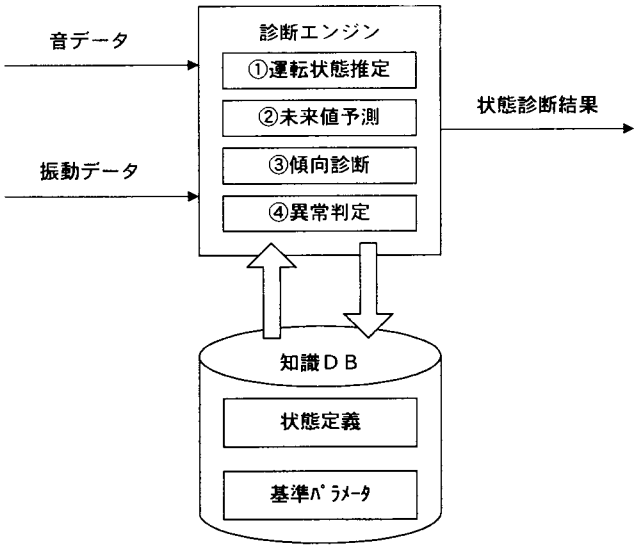


図2　診断アルゴリズム概念図

振動それぞれについて、各パラメータの未来値推定を行う。未来値の推定式は次の通り。

$$p(k+1)=\sum_{n=0}^{N}\mu_n p(k-n)$$

$p(k)$: 現時刻のパラメータ値

$p(k-n)$: n時刻前のパラメータ値

$p(k+1)$: 1時刻前のパラメータ値

μ_*: 重み係数

重み係数はデータが入力されパラメータが計算されるごとに、所定の評価関数が最小になるように更新する。

③　傾向診断

音、振動それぞれについて、算出された各パラメータから現在と未来の傾向診断を行う。傾向診断は各パラメータについて、以下のルールに基づき正常、異常傾向、異常のいずれかに振り分ける。

If	$P < S_{2L}$	*Then*	異常
	$S_{2L} \le P \le S_{1L}$	*Then*	異常傾向
	$S_{1L} \le P \le S_{1H}$	*Then*	正常
	$S_{1H} \le P \le S_{2H}$	*Then*	異常傾向
	$P > S_{2H}$	*Then*	異常

P: 診断するパラメータ

S_{**}: 各パラメータごとのしきい値

傾向診断の基準となるしきい値は図3に示すパラメータ C*，D**により決まる。

パラメータ C*，D**は、現しきい値による傾向診断結果と教師データとを比較し、データマイニングの考え方によりパラメータの学習に有益なデータかどうかの判定に合格したデータのみを使って、学習・更新される。

④　異常判定

最終的な運転状態の異常判定は各パラメータの

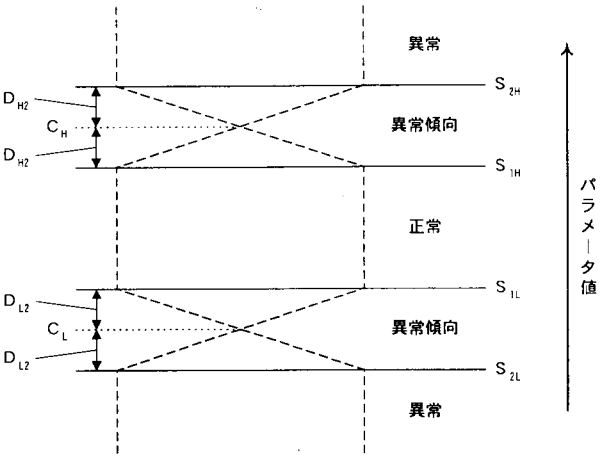


図3　しきい値の設定

傾向診断結果を統合的に判断し行う。現状は、次のような条件で判定している。

・異常、異常傾向がなければ正常
・異常が1つでもあれば異常
・異常なしで異常傾向が1つでもあれば異常傾向

3　結言

造水プラントの高圧ポンプをターゲットとし、以下の機能をもつ遠隔診断システムの開発した。

(1) 知覚情報を収集しフュージョン・診断するという人の判断に近い機器の異常予測診断方式
(2) ファジー推論、データマイニング手法を応用した実データの自動学習および診断パラメータを自動更新する機能

現在、沖縄県南大東島造水プラントにて実証試験中であり、異常時はインターネットを通じて特定の端末や携帯電話に異常通知の自動配信を行っている。また、インターネットを利用した遠隔メンテナンスが可能であるため、現場での常時監視は不要である。

今後長期間の運用を通じて診断の精度を向上させると共に他のプラントへの応用展開を予定している。

参考文献

[1] 藤吉誠ほか:RO海水淡水化設備の遠隔診断システムの開発，日立造船技報，Vol.63，No.3，pp.12-15（2003）

連絡先：
〒551-0022
大阪市大正区船町2-2-11
Hitz日立造船(株) 技術本部 技術研究所
要素技術研究センター 生産技術研究室
堅多　達也
電話：06-6551-9550
FAX：06-6551-9876
Email：katada@hitachizosen.co.jp

インテリジェント・スペースを用いた遠隔教育システムとその応用

The Distance Leaning System for Making Contents by using Intelligent Space and the Application.

梅田大雄
Hiroo Umeda
東京都立科学技術大学
Tokyo Met. Insti. of Tech.

山口亨
Toru Yamaguchi
東京都立科学技術大学
科学技術振興事業団 さきがけ研究21
Tokyo Met. Insti. of Tech.
PRESTO, Japan Science and Technology Corporation

Abstract：This paper proposes the Distance Leaning System for Making Contents that can follow the motion of lecturer automatically and naturally. In order to make Distance Learning Contents(Video Contents), we must follow the motion of lecturer. In the former Systems, a person operates Video-Camera because it's not enough to follow the motion. In this research, we make the systems that can match the motion of lecturer naturally. The systems use Intelligent Space software, so the systems recognize lecturer's motion automatically and order Pan/Tilt-Type Camera to follow the motion. And we made possible to operate an intellectual moving object with application of this system.

1. はじめに

現在の遠隔教育システムで扱われているコンテンツの多くは，Video on Demand などを利用した講義形式である．このような講義形式では，講義を行う講師の方の静止画および動画とその音声を含む映像メディアを基本とし，その講義で用いる資料や板書を HTML などで表示するのが一般的である．

このような映像メディアを基本とした遠隔教育コンテンツの作製においては，現状では様々な問題点があり，その作製に費やす時間と人員は少なくない．

従来の作製方法では，まずコンテンツの基本となる映像メディアの元となるビデオを人間の手で撮影しなければならない．壇上を移動する講師の動きに合わせてカメラを操作し，常に講師の動きに追従しなければならない．

次にその撮影し終えたビデオデータは使用する遠隔教育システムに合わせて，パソコンで扱えるなんらかのフォーマットに変換する必要がある．

次に変換されたビデオデータは講義内容を確認しながら細かく分割しなければならない．このような講義を受講する上では「解らなければ何度でも聴きなおすことができる」というメリットがある．このため講義の段落やまとまりごとに分割することで聴きなおしたい部分の検索が素早くでき，受講者は存分に上記のメリットを受けることができるのである．しかしながらこの作業は，講義を行う講師以外の第三者が行う場合，何度も講義を聴きなおして講義の内容を理解しないと行うことはできない．そのためこの作業に費やす時間が最も長い．またこの作業には専用のソフトウェアとそれを使いこなすだけの技術を必要とする．急速に高年齢社会へと変化しつつある日本においては，コンピュータの扱いに不慣れな方がこの先更に増加することとなり，またそのような方々が講師として教壇に立つことも必然的に増えていくこととなるであろう．そのような方々にとっては，マウスをクリックする，といった動作でも特別気を使わなければいけない動作となってしまうため，誰もが容易に行える作業とは言えない．そのためマウスやキーボードに替わる人間に優しいインターフェイスが必要となる．そのようなインターフェイスとして音声や動作を用いることが考えられる．このように複数手段を用いた複合的インターフェイスをマルチモーダルインターフェイスといい，これにより人間にとって自然なインターフェイスを実現したものが，ナチュラルインターフェイスである．動作による意図認識は，ナチュラルインターフェイスにとって特に重要であると考える．

そこで本稿では，手や顔の動作をインターフェイスとし，より少ない人数で短時間に容易にコンテンツ化できる作製システムを提案する．これにより，コンテンツの作製が容易になることでコンテンツの種類や数が豊富になり遠隔教育の活性化につながると考える．

まず第2章では，システムの提示を行い，使用するソフトウェアの概要を述べる．第3章では，システム各部の機能およびインターフェイスについて述べ，第4章では本システムの動作実験および結果とそれに対する考察と知的移動体操作について述べる．第5章では本論文のまとめと今後の課題を述べる．

2. システム概要

今回のシステムは図2にあるように，PC＋カメラ＋

インテリジェント・スペース・ソフトウェア (Intelligent Space Software, 以下 I-Space) からなる知的インターフェイスエージェントを核とした構成となっている.

この I-Space は我々の研究室にて研究開発を行っているオープンソースのソフトウェアであり, Linux オペレーティングシステム上で動作する. このソフトウェアは大きく分けて次の 2 つから構成されている.

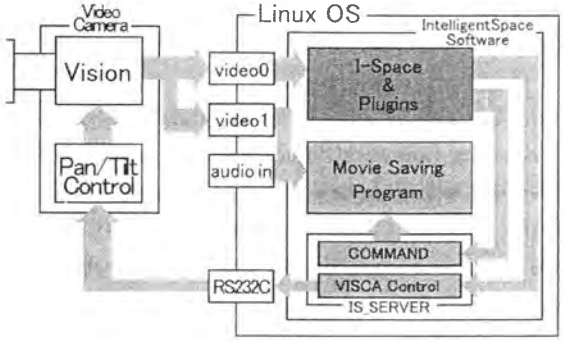


図 1　システム構成図

1)　色情報により物体の位置情報を検出するインテリジェントスペース本体.
(図 1 中: I-Space & Plugins)

2)　1)の情報をもとに様々な処理を行うサーバ.
(図 1 中: IS_SERVER)

またこの本体とサーバ間の通信は TCP/IP プロトコルを用いたソケット通信により行われている. 従来の I-Space ではこの通信を 1 対 1 でしか確立できなかったため、今回システムを構築するにあたり 1 対複数の通信を行えるように I-Space 本体のプログラムに変更を加えた. この変更によりネットワークを介してそれぞれの機能を別々の PC 上でそれぞれ機能させることが出来るため, 大規模な処理が必要な場合は処理を分散させることが可能とした.

また VISCA (Video System Control Architecture) プロトコルを用いてカメラの動きを制御するため, VISCA に対応したカメラを使用する. PC 側には VISCA を出力するためのシリアルインターフェイス (RS232C) が必要である. さらにビデオキャプチャボードを 2 枚, サウンドボードを 1 枚用意し, ビデオカメラの映像をそれぞれのビデオキャプチャボードへ, また講師の音声はサウンドボードへ入力する.

3.　知的インターフェイスエージェント

知的インターフェイスエージェントは, 講師の手や顔の位置や動きから, 録画の開始・停止コマンドの認識および講師の追従を行う.

3.1　入力情報

I-Space は, ビデオカメラから得た画像の色情報を用いて, 手や顔・唇の色を検出し, 重心の座標を算出することで各々の位置を特定する. これをトラッキングと呼ぶ。

このトラッキングされたオブジェクト (手や顔) は, その重心の座標[x,y]のように X 方向, Y 方向の 2 つのデータを持つ. この座標値を図 2 のような時系列のデータとしてとり, その極値を特徴点とする. 手の位置を取ることで, 顔の位置との相対的な位置関係から, 手の動きを得ることができる. また, 相対的な位置をとり正規化することで, カメラと人の距離によらず動作の特徴が抽出可能である.

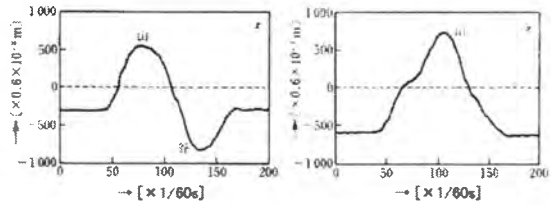


図 2　座標値の時系列データの例

3.2　ファジィ連想推論

人間の動作はその速さや大きさが一定ではない. そこでコマンド認識には, 不安定なノイズに対してロバスト性のあるファジィ連想推論を用いる. 図 3 に I-Space によるコマンド認識の概要図を示す.

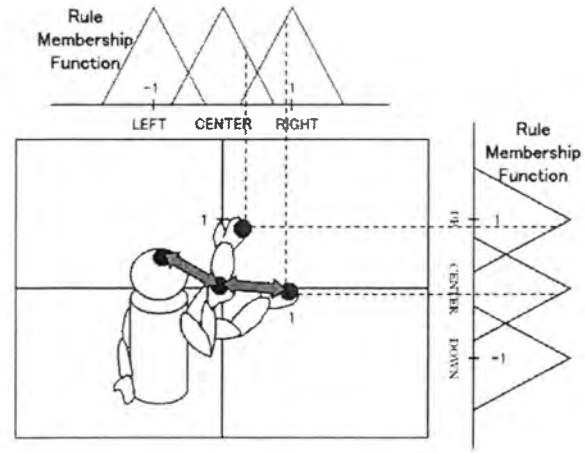


図 3　コマンド認識

メンバシップ関数 (Membership Function) によって特徴点にファジィラベルを割り当て, ルールに基づき双方向連想記憶 (BAM) で構成されたネットワークにおいて伝播処理を行う. そしてルールの活性値の最大のものが一定の値を超えたものをコマンドとして認識する.

3．3　録画の制御

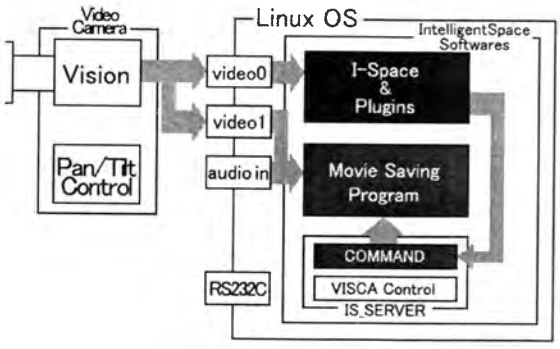


図４　録画制御データフロー

録画の制御のデータの流れは図４に示す通りである．図５は、この制御で用いているコマンド認識で使用したファジィルールを，連想記憶ネットワークを用いて表現したものである．

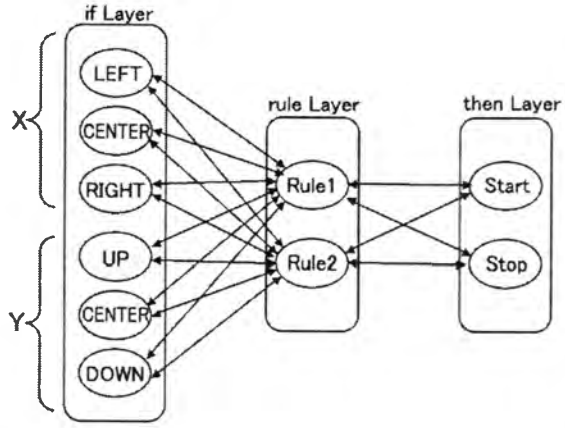


図5　連想記憶ネットワークによるファジィルール

ファジィルールの前件部を代表する層を if 層（if Layer），後件部を代表する層を then 層（then Layer）とし，if 層内のノードは前件部のメンバーシップ関数を，then 層内のノードは後件部のメンバーシップ関数，あるいは入出力関数を代表する．また，前件部と後件部の相関は一般に BAM の記憶できる制約を越えているので，１つのノードが１つのルールを代表する rule 層（rule Layer）を if 層と then 層の間に設定する．

従って，ファジィルールは if 層と rule 層間，rule 層と then 層間に BAM を構成することで表現される．

以上の BAM 間を伝播処理しコマンド認識させることで，録画プログラムの制御を行う．この録画プログラムは AVI 形式で動画を保存する．これにより，講義を行う講師自らが録画の開始と停止を行うため，講義内容に沿って分割することが容易にでき，またビデオデータも PC に合わせたフォーマットで保存することが可能である．

3．4　講師追従

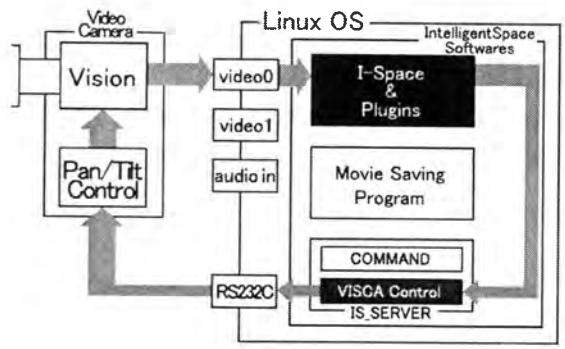


図６　講師追従のデータフロー

講師追従のデータの流れを図６に示す．録画するビデオデータをコンテンツとするためには講師の顔が常に画面上にある必要がある．例として図７中央の部分に示されるように縦横それぞれ 1/2 となるように講師の頭部を収める範囲指定を行う．

図７　指定範囲

この範囲から講師の頭部が外に出たとき，カメラはその動きに追従し，講師の頭部が範囲内に納まるように動く．これは 3.1 章で述べた入力情報（オブジェクトの重心座標情報）をもとに，カメラ制御部（図１中：VISCA Control）が，内部に持つルールに基づきカメラを動かすべき方向を決定する．オブジェクトの重心座標を (x, y)，I-Space が認識しているウィンドウサイズを縦が H，横が W であるとしたとき，このルールを表１に示す．

表１　カメラ制御ルール

Rule	If	Then
1	$x > \frac{3}{4}W$	Pan+
	$x < \frac{1}{4}W$	Pan-
2	$y > \frac{3}{4}H$	Tilt+
	$y < \frac{1}{4}H$	Tilt-

このようにして決定された方向をVISCA信号へと変換し，シリアルインターフェイス（RS232C)からケーブルを介してカメラに出力することで，カメラのパンとティルトを操作する．

これによりカメラが自動的に講師の動きに追従して動くこととなり，カメラマンを必要としない．

4. 実験および考察

4.1 コマンド認識実験

録画をするビデオデータはコンテンツそのものとなる．そのためこのコマンド認識部分が確実に動作しなければならない．コマンド認識の実験とその結果について以下に示す．

カメラから約2メートル離れたところにいる被験者（講師）の頭と手をI-Spaceでトラッキングする．フレームレートは毎秒10フレームである．手を上にあげると録画を開始（START）するコマンドとなり，手を左に動かすと録画を停止（STOP）するコマンドとなる．手を上げる・左に動かすことをそれぞれ100回行い，その認識率を調べた．表2に実験結果を示す．

表2 実験結果コマンド認識実験結果

コマンド	認識率	認識回数
START	98 %	98 / 100
STOP	99 %	99 / 100

4.2 考察

開始および停止ともにかなり高い確率で認識が出来ている．現在2つの動作コマンドのみであるために，このような高い確率で認識できたと考えられなくもない．しかしながらこのI-Spaceによるコマンド認識機構を応用したシステムでは，7種類の人間の自然な動作コマンド入力による知的移動体の操作が可能であり、そのコマンド認識率はどれも高い値を示している．知的移動体の車庫入れ操作実験風景を図8に示し、その認識率を表3に示す．

図8 知的移動体操作実験風景

表3 知的移動体コマンド認識率

コマンド	認識率	コマンド	認識率
前進	94%	後退	92%
右折	88%	左折	90%
停止	100%	システム開始	100%
システム停止	100%	平均値	95%

この認識率からもわかるようにI-Spaceによるコマンド認識率はかなり高いといえる．

また今回の実験および録画に使用した毎秒10フレームというフレームレートは，東京都立科学技術大学遠隔教育センターでのコンテンツ作成において実際に使用されており，ビデオコンテンツとして受講者が視聴する際に違和感を与えることのない値である．実際に録画されたビデオデータを見ても特に違和感無く視聴することが出来る．

5. おわりに

本論文では，より少ない人数で短時間で容易にコンテンツ化できる遠隔教育コンテンツ作製システムについて述べ，ナチュラルインターフェイスによるコマンド認識方法および講師追従機能について述べた．

今後の課題として，フィルタリングの最適化を行いインテリジェントスペースソフトウェアのオブジェクト認識機構の強化，アテンション機構を用いることで複数台カメラの制御，また更なるロバスト性の向上および機能の強化，動作検出機構の強化による講師側インターフェイスの更なるナチュラル化があげられる．またコンテンツの配信も包括したシステムへの発展が挙げられる。

参考文献：

[1] 谷萩隆嗣・萩原将文・山口亨共著，ニューラルネットワークとファジィ信号処理．コロナ社，1998.

[2] T. Yamaguchi, N. Ando : Intelligent Space and Human Centered Robotics Proc. Of Euro Symposium on CI(2002.6)

[3] 東京都立科学技術大学遠隔教育センター http://www.dlc.tmit.ac.jp/

連絡先：
〒191-0065
東京都日野市旭が丘6-6
東京都立科学技術大学 工学部 システム基礎工学専攻
知能情報処理(山口)研究室 梅田 大雄
電話：042-585-8644
E-Mail：umeda@fml.ec.tmit.ac.jp

ファジィモデリングを用いた上水道系の配水量予測

Fuzzy Modeling and Prediction of Water Supply at Water Works System

小川　一泰　　村上　周太　　島川　学
Ogawa Kazuhiro　　Murakami Shuta　　Shimakawa Manabu
九州工業大学
Kyushu Institute of Technology

Abstract　This paper deals with a fuzzy prediction model for amount of water supply at a waterworks. Amount of water supply approximates to customers' water demand, and its prediction is an important reference to generate operation plans in order to keep the water supply stable. Amount of water supply is affected by the various factors: weather, temperature, weekday or holiday, among others. How to define the structure of a fuzzy model and how to choose the input variables are important because the prediction performance has deep relations with them. In this paper, we compare fuzzy prediction models of monolayer-type and multilayer-type consisting of 2, 3 and 4 input variables. From the results, advantage of the multilayer-type fuzzy prediction model is shown.

1. 序論

一般に，上水道系は，水源として複数個のダム，河川とこれらを結ぶ導水管路，水処理設備として浄水場群，配水設備としてポンプ場群，配水池群と需要家へ連なる管網群から構成される．ダム，河川より取水された水は，上水道設備を経て需要要求に応じて供給される．このように，需要要求に応じて決められた水量を，どの水源から取水し，どの浄水場施設や配水池を経て需要家へ供給すればよいかということを考慮しなければならない．その際，取水可能量推定，需要予測，上水道設備の最適処理を考慮したシステム的運用が必要とされる．

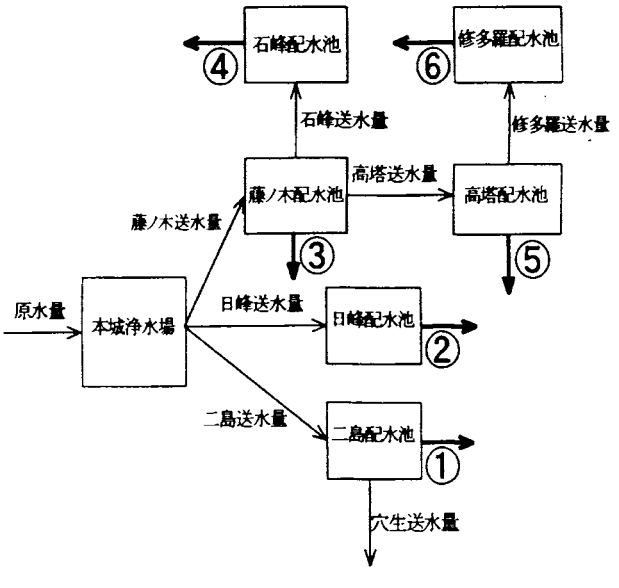


図１　北九州市本城上水道系

本研究では，研究の対象として，北九州市本城浄水道系を取り扱う．本城浄水道系には，二島・日峰・藤ノ木・石峰・高塔・修多羅の６カ所の配水池がある．この上水道系を図１に示す．この図の中で，①～⑥が各配水池から需要家への配水である．また各配水池には一日ごとに以下に示されるデータが観測されている．

S(k)　：配水量（m^3）
T(k)　：気　温（℃）
W(k)　：天　候（０：晴れ，１：曇り，２：雨）
D(k)　：曜　日（０：平日，１：休日）

これまでに，同上水道系における各配水池から需要家への配水量を予測するファジィモデルとして，３入力のモデルを構築し配水量予測を行った [1]．また，各配水池によって評価値を最良とする入力変数が異なることが分かっている[2]．本研究ではまず，２入力・３入力・４入力のモデルを構築する．このとき，モデルの入力変数は，可能な組み合わせの中から最も評価値の良かったものを採用する．その結果を踏まえ，モデルを階層化し，それぞれの特性を調べることを目的とする．

2. ファジィモデリング

2.1 ファジィモデルの構成

ファジィモデリングを行う際に重要なことは入力変数の選択である．現実のシステムは多くの状態変数，制御変数で構成されている．その中から，システムの説明のために重要度の高いと思われる変数を用意する必要がある．本研究では，与えられたデータを元に表１に示す９つの候補変数を用意した．

表 1　候補変数

z_1	前日の配水量	S(k-1)
z_2	前日の配水量の変化	Δ S(k-1)=S(k-1)-S(k-2)
z_3	一週間前の配水量	S(k-7)
z_4	気温	T(k)
z_5	気温の変化	Δ T(k)=T(k)-T(k-1)
z_6	天候	W(k)
z_7	天候の変化	Δ W(k)=W(k)-W(k-1)
z_8	曜日	D(k)
z_9	曜日の変化	Δ D(k) =D(k)-D(k-1)

候補変数の中から入力変数として可能な組み合わせを選択し，モデルの構築を行う．組み合わせの中から評価値が最も良かったものを最終的なモデルとする．構成するファジィモデルは，前件部を三角型メンバーシップ関数の 3 分割とし（図 2），後件部のメンバーシップ関数を実数値（シングルトン型）とする．よってファジィモデルのルール数は，2 入力では 9 個，3 入力では 27 個，4 入力では 81 個となる．また，後件部を前日の配水量との変化分（差分型）とする．例として 2 入力のファジィモデルのルール構成を以下に示す．

$$Rulei : if\ x_1\ is\ A_{i1}\ and\ x_2\ is\ A_{i2}$$
$$then\ \Delta y\ is\ b_i\ (i=1\cdots 9) \qquad (1)$$

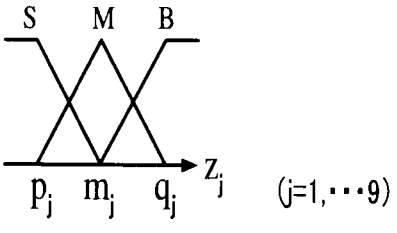


図 2　前件部のメンバーシップ関数

2.2　モデリング手法

ファジィモデルのパラメータは遺伝的アルゴリズム（GA）を用いて求める．したがって，そのパラメータを遺伝子の構造として表現する必要がある．ファジィモデルのパラメータは，前件部のパラメータと後件部パラメータがある．前件部のパラメータは，前件部メンバーシップ関数の形状を決めるためのものであり，図 2 に示した p_j, m_j, q_j がそれにあたる．前件部で候補としている変数は 9 つあるので，前件部のパラメータは 27 個である．後件部のパラメータは，各ルールの後件部の実数値 b_i である．このパラメータ数 n はモデルの入力数によって異なり，各モデルのルール数となる．図 3 にパラメータをコーディングした遺伝子の構造を示す．

候補変数の中には，天候など非ファジィ値を取る変数がある．そのような変数に関するパラメータは固定とし，GA による調整の対象としない．但し，便宜的に遺伝子の構造に含めている．

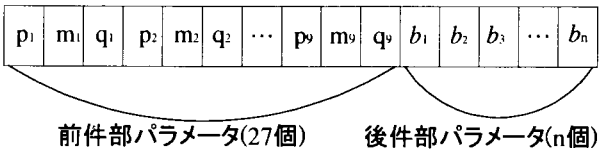


図 3　GA における個体の構造

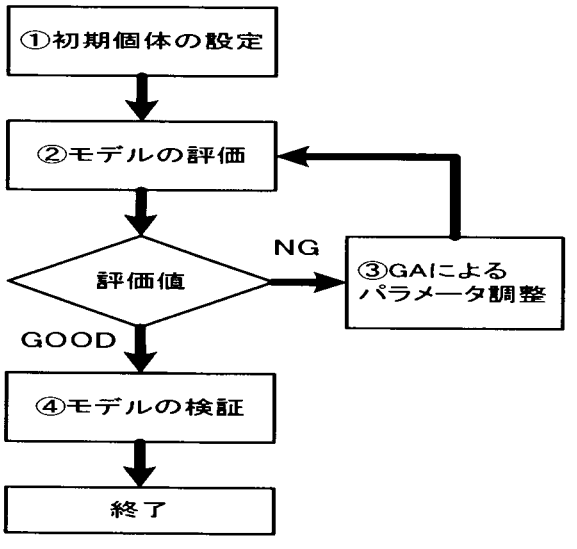


図 4　ファジィモデリングのフローチャート

図 4 に，GA を用いたファジィモデリングのフローチャートを示す．以下にその手順を示す．

①　初期個体の設定

一世代あたり 100 個の個体を用意する．各個体は図 3 に示したように，27＋n 個の遺伝子から構成され，一つの個体が一つのファジィモデルを表す．初期個体の初期値はランダムに与える．

②　モデルの評価

モデル構築用データを用いて，各個体が表すファジィモデルを評価する．評価値として次式で与えられる平均誤差率を用いる．

$$\varepsilon = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}\times 100 \qquad (2)$$

$$\hat{y}_i = y_{i-1} + \Delta\hat{y}_i$$

ここで，εは評価値，y_iが実測値，$\hat{y}_i$が予測値，$\Delta\hat{y}_i$がファジィモデルの推論値である．Nはデータ数とする．

③　GAによるパラメータ調整

選択法にはエリート保存方式とランク方式を組み合わせた方式をとり，また，交叉方法として一点交叉を用いた．具体的にはエリート群である上位 10 個体を選択するという方式である．終了条件は，最も評価値の良かった個体が 300 世代に渡って変化がなかった時に終了するように設定した．

④　モデルの検証

②と③を繰り返し，最終的に 1 つの最良ファジィモデルが求められる．このファジィモデルを検証用データで評価し，検証する．

3.　単純型ファジィモデルによる上水道配水量予測

3.1　単純型ファジイモデル

図 5 に示すような入力数が 2 入力・3 入力及び 4 入力のファジィモデルを構築する．以後，このモデルを単純型ファジィモデルと呼ぶ．配水池ごとに，これら 3 つのファジィモデルの特性を調べる．

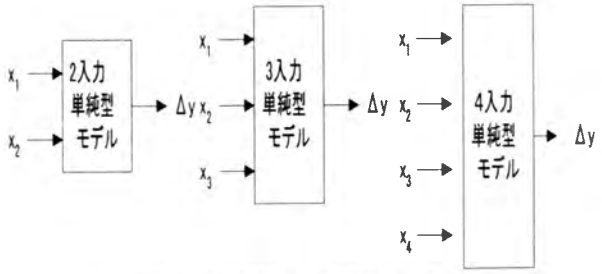


図 5 単純型ファジィモデル

3.2　結果の検討

例として藤ノ木配水池と二島配水池の評価値をそれぞれ表 2 に示す．

モデル構築用データにおいて，入力数が増えると全ての配水池において評価値が良くなる傾向が見られた．一方，検証用データによる評価値も多くの配水池において同様の結果となった．

しかし，二島配水池には，藤ノ木配水池を含む他の配水池と比べて，入力変数が増えた場合，構築用データに対しては評価値が良くなる傾向があるが，検証用データに対しては逆に悪くなる傾向があることが分かる．このことから「過学習」が起きていると考えることができる．過学習とは，学習用データに過度に適合するモデルは実際のデータに適用した時には逆に精度が落ちる現象である．

表 2　単純型ファジィモデルの評価値

(a) 藤ノ木配水池

	評価値		
	構築用データ	検証用データ	入力変数
2 入力単純型	3.437%	3.314%	z_7, z_9
3 入力単純型	3.238%	3.411%	z_1, z_7, z_9
4 入力単純型	**2.978%**	**2.958%**	z_1, z_3, z_7, z_9

(b) 二島配水池

	評価値		
	構築用データ	検証用データ	入力変数
2 入力単純型	2.775%	**2.840%**	z_2, z_7
3 入力単純型	2.702%	3.903%	z_1, z_2, z_7
4 入力単純型	**2.580%**	4.592%	z_1, z_2, z_5, z_7

4　階層型ファジィモデルによる上水道配水量予測

4.1　入力変数の選別

単純型ファジィモデルの結果より，各配水池によって評価値が良い組み合わせになることがほとんどない入力変数が見られた．そのため，その配水池に与える影響が少ないと考えられる入力変数を以降の候補変数から外して考えることにした．

例えば，藤ノ木配水池では 9 つの候補変数から z_2, z_4, z_5 を外すこととした．

4.2　階層型ファジィモデル

階層型ファジィモデルとして，3 入力階層型ファジィモデル(図 6)と 4 入力階層型ファジィモデル(図 7)を構築し，先述の方法で得た入力変数の組み合わせにおけるモデル構築をおこなった．また，GAの遺伝子の数は，階層化することによって，それぞれ個数が減り，パラメータ調整にかかる時間は短くなる．ここで，階層化したモデル間での入出力は $[-1, +1]$ に正規化した実数値を用いる．

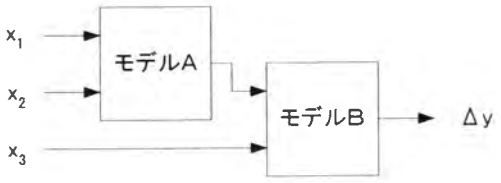


図 6　3 入力階層型ファジィモデル

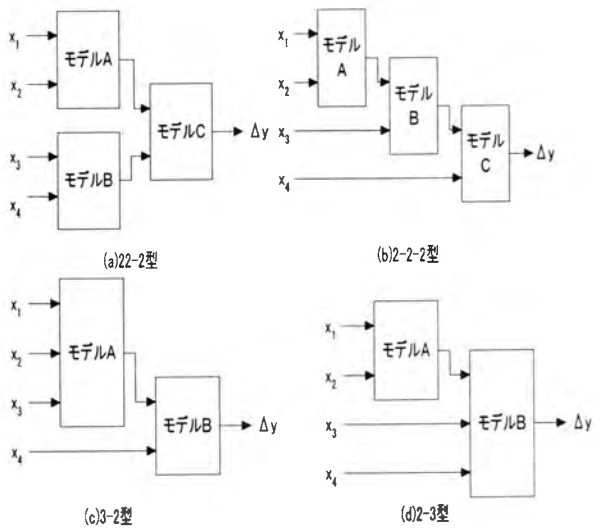


図 7　4 入力階層型ファジィモデル

4.3　結果の検討

階層型ファジィモデルにした場合も，入力数の増加に伴いモデル構築用データによる評価値は良くなる傾向があり，逆に検証用データによる評価値が悪くなる配水池があった．藤ノ木配水池と二島配水池について各モデルを比較した結果を表 3 に示す．各配水値において最も評価値の良かった値に網掛けをしている．

モデル構築用データに対する評価値をみると，4 入力単純型ファジィモデルが最適なモデルであると考えることができる．一方，モデル検証用データに対する評価値に関しては階層型ファジィモデルが単純型ファジィモデルより良い評価値を取る場合が多い結果となった．

また，ここで単純型ファジィモデルにおいて過学習となった二島配水池に着目してみる．階層化した結果，モデル検証用データによる評価値は，2 入力単純型ファジィモデルよりも 4 入力階層型ファジィモデルの方が良くなっている．このことより，階層化することによって過学習に陥りにくくなる傾向があると考えられる．

5.　おわりに

ファジィモデルの性能を良くするために，入力変数を増やすことで，ルール数を増やすことを考えた．しかし，データ数が少なかったこともあり，配水池によっては汎用性に欠けるファジィモデルが求められることがあった．本稿で示した結果から，ファジィモデルを階層化することによって，その傾向を抑える効果があることを確認することが出来た．

また，配水池ごとに，最良な評価を得たファジィモデルの構造や選択された入力変数が異なっている．このことは，住宅地や商業地域，工業地域など，配水地ごとの地域性に関係していると考えられる．それぞれの配水池の特徴を調査し，その特徴を考慮したファジィモデルを構築することが今後の課題である．

参考文献

[1]　村上，島川，石井，ファジィモデルによる上水道系の配水量予測，第 16 回ファジィシンポジウム，pp.493-496(2000)

[2]　村上，島川，稲本，GA を用いたファジィモデルによる上水道系の配水量予測，第 18 回ファジィシンポジウム，pp.311-314(2002)

連絡先

〒804-8550　北九州市戸畑区仙水町 1 － 1
九州工業大学 工学部 電気工学科 情報工学教室
島　川　　学
TEL (093)884-3253
E-mail shima@comp.kyutech.ac.jp

表 3　評価値の比較

(a)藤ノ木配水池

	評価値		入力変数 (x_1,x_2,x_3,x_4 の順)
	構築用データ	検証用データ	
2 入力単純型	3.437%	3.314%	z_7, z_9
3 入力単純型	3.238%	3.411%	z_1, z_7, z_9
3 入力階層型	3.256%	3.322%	z_1, z_7, z_9
4 入力単純型	**2.978%**	**2.958%**	z_1, z_3, z_7, z_9
4 入力 22-2 型	3.085%	3.017%	z_1, z_7, z_3, z_9
4 入力 2-2-2 型	3.018%	3.105%	z_3, z_7, z_9, z_1
4 入力 2-3 型	3.194%	3.312%	z_6, z_7, z_1, z_9
4 入力 3-2 型	3.522%	3.308%	z_1, z_3, z_7, z_9

(b)二島配水池

	評価値		入力変数 (x_1,x_2,x_3,x_4 の順)
	構築用データ	検証用データ	
2 入力単純型	2.775%	2.840%	z_2, z_7
3 入力単純型	2.702%	3.903%	z_1, z_2, z_7
3 入力階層型	2.722%	2.825%	z_4, z_7, z_2
4 入力単純型	**2.580%**	4.592%	z_1, z_2, z_5, z_7
4 入力 22-2 型	2.660%	3.662%	z_1, z_7, z_2, z_3
4 入力 2-2-2 型	2.649%	2.857%	z_1, z_3, z_2, z_7
4 入力 2-3 型	2.611%	3.702%	z_1, z_2, z_7, z_5
4 入力 3-2 型	2.779%	**2.703%**	z_1, z_2, z_5, z_7

明示的なモデル構築のための入力空間の低次元化方法に関する研究

A Study on Projection Method of Input Space for a Construction of an Interpretable Model

山本 康高　古橋 武　吉川 大弘
Kosuke Yamamoto　Takeshi Furuhashi　Tomohiro Yoshikawa

三重大学 工学部
Faculty of Engineering, Mie University

Abstract: Interpretability of a model has become one of the key topics of modeling. Therefore the objective of this study is to establish the methodology that constructs an interpretable model. One of the most important conditions of the interpretability is that the model is visible because we can get the clear image from the visible model. Reduction of input dimensions is needed to visualize the model. This paper proposes a new projection method that considers the visibility of models. The effectiveness of the proposed method is shown through a numerical experiment.

1 はじめに

近年データマイニングの観点から，明示性が高く解釈容易なモデルの必要性が指摘されている．明示的なモデル構築に有効な手法の一つとして，ファジィモデリング [1][2] が注目されている．しかし，多くの入力変数を持つ複雑な対象のモデルを構築する場合には，ファジィルールそのものが多入力となってしまうことにより，必ずしも明示性の高いモデルを得ることができない．これまでに，入力変数選択 [3] やモデルの階層化 [4] による改善手法が提案されているが，変数選択や階層化によっても対象の特性を適切に反映したモデルを構築できない場合がある．

本研究の目的は，データ構造を適切に反映した，明示性の高いモデリング手法の確立にある．明示性を高めるためには，可視空間へのデータの低次元化が有効である．筆者らは，これまでに複数の入力変数を統合した“統合軸”と呼ぶ低次元化射影軸を導入し，その統合軸を用いたファジィモデリング手法を提案してきた [5][6]．統合軸の決定基準として明示性に着目し，明示性を得ることが可能な射影空間の条件として，(i) データ構造を適切に反映していること，(ii) ファジィモデルが構築され得ることを考慮し，射影空間においてデータの適切な分割が可能であることを挙げている．

文献 [6] では，データ構造の発見に Fuzzy C-Means (FCM) を用い，統合軸の決定にファジィ判別分析 (Fuzzy Multiple Discriminant Analysis: FMDA) を用いた．FMDA ではクラスタ間距離を最大とする射影面を形成することができる．ここで，射影面とは 2 本の統合軸によって作られる面である．しかし，FCM が超球のクラスタを構築する手法であること，また FMDA はデータが 2 次元平面に射影されるという情報や，その射影面が分割されるという情報を含んでいないなどの理由のため，常に (i)(ii) を満たす射影面が得られるとは限らないという課題を残していた．

そこで本稿では，これらの課題を克服するために，まず，統計的性質が互いに異なるクラスタを，適応的に構築可能な EM アルゴリズムを用いたクラスタリング手法を用いる．そして，射影面において入力空間が分割されることを考慮した明示性の基準を定式化し，その式を基に適切な統合軸を導出する手法を提案する．数値実験を通して，提案手法により適切な射影を行える統合軸が獲得可能であることを示す．

2 提案手法

本稿中に用いる変数や定数を表 1 に示す．以後文中の記号は，すべてこの表に従っている．本章では，P 入力-1 出力のデータ群を射影面に低次元化 (2 入力-1 出力) することを想定し，提案手法を説明する．

表 1: 本稿で用いた記号の説明

i, i'	クラスタ番号のインデックス
j, j'	入力変数のインデックス
k	データ番号のインデックス
l, l', l''	統合軸のインデックス
t	繰り返し数のインデックス
$\boldsymbol{x}$	入力ベクトル $\boldsymbol{x}_k = (x_{k1}, x_{k2}, \cdots, x_{kP})^t$
$\boldsymbol{X}$	入出力ベクトル $\boldsymbol{X}_k = (x_{k1}, x_{k2}, \cdots, x_{kP}, y_k)^t$
ξ_l	l 番目の統合軸
e_l	l 番目の統合軸の方向ベクトル
C	クラスタ数
P	入力変数の数
N	データ数
μ_k^i	各データの i 番目のクラスタへの所属度
$\boldsymbol{m}^i$	i 番目のクラスタの中心
$\boldsymbol{m}^{all}$	データ全体の中心
Σ^i	i 番目のクラスタの共分散行列
$\sigma_{jj'}^i$	共分散行列の各要素

2.1 EM アルゴリズムによるクラスタリング

クラスタリングの目的は，よく似た特徴を持つデータをまとめることにより，データ構造を明らかにすることである．クラスタリングは出力を含めた $\Re^{P+1}$ 空間で行う．提案手法では，多次元正規分布を基底関数とする

EM アルゴリズムによるクラスタリング [7] を用いる．この手法では以下に示す 2 つのステップを繰り返すことにより，ファジィクラスタを構築する．

1. **Expectation Step:**

まず，初期値 ($t=1$ の時) として，指定したクラスタ数分の $\boldsymbol{m}^i$，Σ^i をランダムに設定する．その後，(1) 式に従い，各データの各クラスタに対する所属度 μ_k^i を求める．$f^i(\cdot)$ は，i 番目のクラスタを規定する多次元正規分布を表している．これにより，$\boldsymbol{m}^i$，Σ^i に従う超楕円体のクラスタが構築される．

$$\mu_k^{i(t)} = \frac{f^i(\boldsymbol{X}_k; \boldsymbol{m}^i, \Sigma^i)}{\sum_{i'}^{C} f^{i'}(\boldsymbol{X}_k; \boldsymbol{m}^{i'}, \Sigma^{i'})} \tag{1}$$

2. **Maximization Step:**

(2)(3) 式に従い，クラスタ中心 $\boldsymbol{m}^i$ と共分散行列の各要素 $\sigma_{jj'}^i$ を更新する．(3) 式は，i 番目のクラスタの共分散行列 Σ^i の各要素を表している．このクラスタリング手法では，共分散行列を考慮することにより，データ構造に適応的なクラスタ構築を可能としている．

$$\boldsymbol{m}^{i(t+1)} = \frac{\sum_k^N \mu_k^{i(t)} \boldsymbol{X}_k}{\sum_k^N \mu_k^{i(t)}} \tag{2}$$

$$\sigma_{jj'}^{i(t+1)} = \frac{\sum_k^N \mu_k^{i(t)} (x_{kj} - m_j^{i(t+1)})(x_{kj'} - m_{j'}^{i(t+1)})}{\sum_k^N \mu_k^{i(t)}} \tag{3}$$

提案手法では，ファジィモデルを構築する際に各クラスタを，後件部がシングルトンのファジィルールにより記述する．シングルトンを用いるのは，明示性を考慮しているためである．そこで，クラスタリングにおいて，入力と出力が相関を持たないクラスタを構築した方がファジィルールに適しているため，出力変数と入力変数との共分散は常に 0 にする処理を施している．

2.2 射影面の決定

(4) 式は，射影面を決定する統合軸を表している．統合軸を線形式としているのは，各入力変数に対する係数が，統合軸の意味付けの手助けになると考えられるためである．ここで，射影面は入力空間を低次元化して得られるため出力変数は考慮しない．

$$\xi_l = \boldsymbol{e}_l^t \boldsymbol{x} = e_{l1}x_1 + e_{l2}x_2 \cdots + e_{lP}x_P \tag{4}$$

EM アルゴリズムで構築されたクラスタは，それぞれ異なる特徴を持っていると考えられるため，各クラスタは射影面において重なりを持たないことが望ましい．直交する統合軸により形成される射影面においては，統合軸の回転が自由となる．これにより，可視化された射影面に対して人が介入することで，入力空間の分割に適した統合軸の決定が可能となる．しかし，直交する統合軸は，射影面におけるクラスタ形状に制限を与える．そこで本稿では，非直交な統合軸を用いて射影面を形成する．

非直交な統合軸により形成される射影面においては，クラスタ分布が変化するため，統合軸の回転は行えない．そのため，あらかじめクラスタ形状を反映する統合軸によって，射影面を形成する必要がある．射影面において，クラスタ形状が統合軸と平行している場合，適切な入力空間の分割が行えると考えられるため，提案手法では，射影面における各クラスタ内のデータの相関に着目する．クラスタ間距離 V_B 及び射影面での相関の指標 C_F として (5) (6) 式をそれぞれ定義する．(5)(6) 式内のクラスタ中心 $\boldsymbol{m}^i$，データ全体の中心 $\boldsymbol{m}^{all}$ は (7) 式で与えられる．

$$V_B = \sum_i^C \sum_l^2 \boldsymbol{e}_l^t (\boldsymbol{m}^i - \boldsymbol{m}^{all})^2 \tag{5}$$

$$C_F = \sum_i^C \Big\{ \sum_k^N \mu_k^i \boldsymbol{e}_1^t (\boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{m}^i) \cdot \boldsymbol{e}_2^t (\boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{m}^i) \Big\}^2 \tag{6}$$

$$\boldsymbol{m}^i = \frac{\sum_k^N \mu_k^i \boldsymbol{x}_k}{\sum_k^N \mu_k^i}, \quad \boldsymbol{m}^{all} = \frac{\sum_i^C \sum_k^N \mu_k^i \boldsymbol{x}_k}{\sum_i^C \sum_k^N \mu_k^i} \tag{7}$$

$$F = C_F - V_B \tag{8}$$

(5)(6) 式より，(8) 式を明示性の定量的な基準として用いる．すなわち，この式を最小化する統合軸の導出は，各クラスタ間距離が大きくかつ，クラスタ形状が統合軸に対して平行となる射影面を与える．(5)(6) 式の統合軸を P 次元に一般化し，統合軸の方向ベクトルの大きさを 1 とする ($\boldsymbol{e}_l^t \boldsymbol{e}_l = 1$) 制約項を加味すると，これを固有値問題に帰着させることができる．固有値問題による解法は 2 次元平面への射影を優先する解を与えるとは限らない．本稿においては可視化のため，2 次元平面への射影を重要視しており，提案手法では，これを制約として適切な統合軸の発見を試みている．統合軸に制約を加え，式を解くと煩雑になるため，統合軸の係数 $e_{l'j'}$ の更新後に $\boldsymbol{e}_l^t \boldsymbol{e}_l = 1$ となるように，正規化することにより，探索アルゴリズム上で統合軸に制約を加えることとする．

(8) 式の $e_{l'j'}$ による微分は (9) 式となる．ここで式の表記を簡略化するため，$\boldsymbol{x'}_k^i = \boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{m}^i$，$\boldsymbol{m'}^i = \boldsymbol{m}^i - \boldsymbol{m}^{all}$ としている．また式中の l'' は，l' が 1 のとき 2，l' が 2

のとき 1 となる統合軸の添字を表している．

$$\frac{\partial F}{\partial e_{l'j'}} = \frac{\partial C_F}{\partial e_{l'j'}} - \frac{\partial V_B}{\partial e_{l'j'}}$$
$$= 2 \sum_{i}^{C} \Big(\sum_{k}^{N} \mu_k^i \boldsymbol{e}_1^t \boldsymbol{x'}^i{}_k \cdot \boldsymbol{e}_2^t \boldsymbol{x'}^i{}_k\Big)\Big(\sum_{k}^{N} \mu_k^i x'^i{}_{kj'} \boldsymbol{e}_{l''}^t \boldsymbol{x'}^i{}_k\Big)$$
$$-2 \sum_{i}^{C} \boldsymbol{e}_{l'}^t \boldsymbol{m'}^i \cdot m'^i_{j'} \qquad (9)$$

$\partial F/\partial e_{l'j'} = 0$ とすることにより，(10) 式を得る．(10) 式中の A^i，B_k^i はそれぞれ (11)(12) 式となる．

$$e_{l'j'} = -\frac{\sum_{i}^{C}\Big\{A^i \sum_{k}^{N} B_k^i \sum_{j\neq j'}^{P} e_{l'j} x_{kj}^i - m'^i_{j'} \sum_{j\neq j'}^{P} e_{l'j} m'^i_j\Big\}}{\sum_{i}^{C}\Big(A^{i2} - m'^i_{j'}{}^2\Big)} \qquad (10)$$

$$A^i = \sum_{k}^{N} B_k^i x'_{kj'} \qquad (11)$$

$$B_k^i = \mu_k^i \boldsymbol{e}_{l''}^t \boldsymbol{x'}^i{}_k \qquad (12)$$

本稿では，各統合軸における各入力変数に対する $e_{l'j'}$ を，(10) 式により順次更新し，これらの値が収束するまで更新を繰り返し行うことで統合軸の最適化を行う．

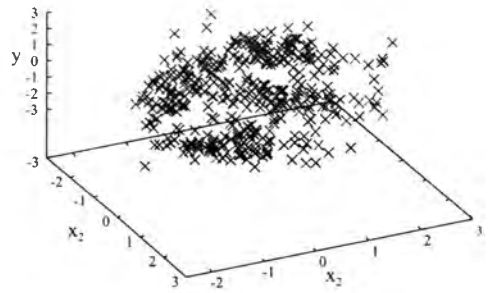
3 数値実験

3.1 実験内容

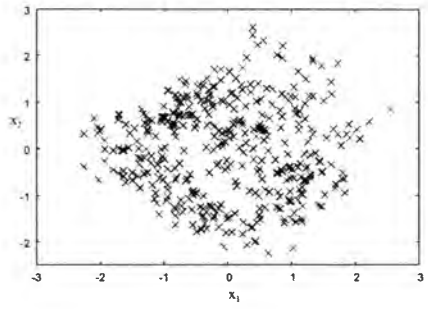
提案手法により適切な射影面が発見可能であることを検証するため，図 1(a) の分布形状を持つ 2 入力-1 出力のテストデータを作成した．提案手法の効果を理解しやすくするため，2 次元から 2 次元への射影を行うこととした．図 1(b) にテストデータを入力空間に射影した図を示す．図 1(a) より，テストデータが大きく 4 つの楕円球型のクラスタを持っていることが分かる．また図 1(b) より，入力空間では各軸により，そのクラスタを適切に分割できないことが分かる．このデータに対して，従来手法 [6] と提案手法を適用し射影面を形成することで，両手法の比較実験を行った．

3.2 実験結果と考察

FCM と EM アルゴリズムによるクラスタリング結果を図 2(a)(b) に示す．図 2(a) より，FCM はデータ全体を 4 当分するクラスタを構築していることが分かる．それに対して EM アルゴリズム (図 2(b)) では，データ構造を反映しそれぞれ形状の異なる楕円球型のクラスタを構築している．この結果は，作成したデータ群に対して適応的なクラスタ構築が可能な EM アルゴリズムの



(a) データ全体の分布



(b) 入力空間に射影した図

図 1: 入力データ

特徴を表している．

次に FMDA 及び提案手法によって得られた射影面を図 3(a)(b) に示す．このとき，データ群は適切なクラスタ (図 2(b)) が構築されたとして実験を行った．また，FMDA 及び提案手法によって得られた統合軸をそれぞれ (13)(14) 式に示す．

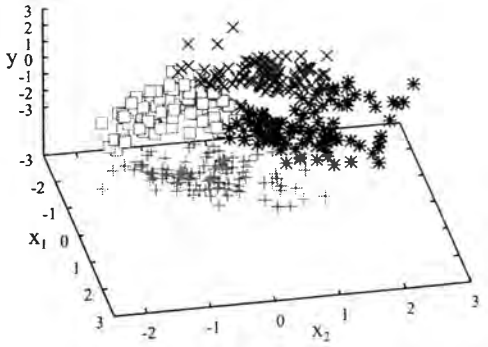
FMDA:

$$\xi_1 = -0.88x_1 + 0.48x_2$$
$$\xi_2 = 0.49x_1 + 0.87x_2 \qquad (13)$$

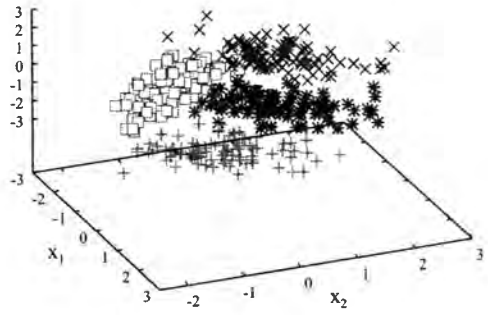
提案手法:

$$\xi_1 = 0.73x_1 - 0.68x_2$$
$$\xi_2 = 0.74x_1 + 0.67x_2 \qquad (14)$$

図 3(a) より，FMDA による射影では，各クラスタが統合軸に対して平行に分布をしておらず，また，データ群全体も少し傾いて射影されていることが分かる．それに対して，図 3(b) の提案手法による射影は，統合軸と平行な直線により，入力空間が適切に分割できることが分かる．また，そのとき得られた統合軸 ((14) 式) はデータ構造を反映し，非直交となっている．これらの結果より，従来法ではデータ構造を適切に反映した射影が困難なデータに対しても，提案手法が有効に働くことが確認された．このような射影面を得ることにより，低次元化空間での適切なファジィモデルの構築が期待される．

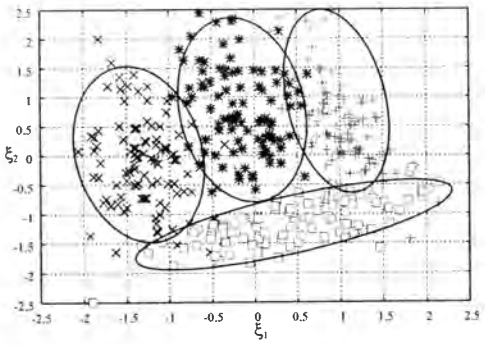


(a) FCM

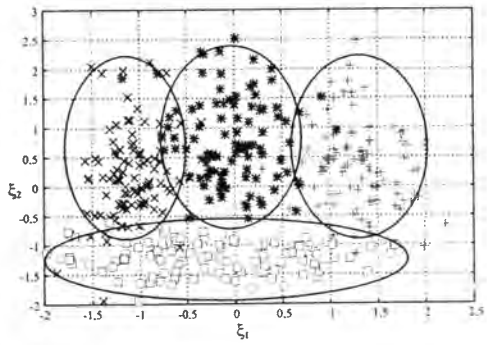


(b) EM アルゴリズム

図 2: クラスタリング結果



(a) FMDA



(b) 提案手法

図 3: 射影結果

4 まとめ

ファジィモデリングにおいて明示性重視の立場をとり，データ群を統合軸を用いた可視空間へ低次元化する手法の有効性について述べ，適切な低次元化射影面を定義した．データ構造を把握するために，データ分布に対して適応的にクラスタリングが行うことが可能な EM アルゴリズムを用いる手法について述べた．射影面の導出基準として明示性を用いることを提案し，2 次元平面に射影されることを前提とし，その射影面において入力空間が分割されることを考慮した明示性の基準を定式化した．この式を基に適切な統合軸発見の探索手法について述べ，数値実験を通して，適切な射影面の獲得が可能であることを示した．

今後の課題として，提案手法の他データへの適用，射影面におけるファジィルールのパラメータの調整方法に関する検討などが挙げられる．

参考文献

[1] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.SMC-15, pp.116-132, 1985

[2] 日本ファジィ学会編集，"ファジィとソフトコンピューティングハンドブック"，2000

[3] K. Tachibana, "A Study on Fuzzy Modeling Using Genetic Algorithm and Its Application to Biomechanics", Ph.D. thesis, Nagoya University, 2002

[4] 中山，古橋，内川，"階層化ファジィモデリング手法の一提案"，日本ファジィ学会誌，Vol.5，No.7，pp.1155-1168，1993

[5] 山本，吉川，古橋，篠木，鶴岡，"簡易表現ファジィモデリングに関する基礎的考察"，FSS2002，pp.557-560，2002

[6] K. Yamamoto, T. Yoshikawa, T. Furuhashi, "A Proposal of Fuzzy Modeling on Fusion Axes Cosidering the Data Structure", FUZZ-IEEE 2003, pp.348-353, 2003

[7] 赤穂，"EM アルゴリズム–クラスタリングへの適用と最近の発展–"，日本ファジィ学会誌，Vol.12，No.5，pp.594-602，2000

問い合わせ先

〒 514-8507 三重県 津市 上浜町 1515
三重大学大学院 工学研究科
システム工学専攻 パターン情報処理研究室
山本 康高 (Yamamoto Kosuke)
TEL. (059)231-9746
FAX. (059)231-9456
E-mail : yamamoto@pa.info.mie-u.ac.jp

部分的条件省略ファジィルールを用いた強化学習によるアフォーダンスの検出

Detection of Affordances via Reinforcement Learning with Condition Reduced Fuzzy Rules

山岸 栄輝
Hideki Yamagishi
京都大学情報学研究科
Kyoto University

塩瀬隆之
Takayuki Shiose
京都大学情報学研究科
Kyoto University

川上 浩司
Hiroshi Kawakami
京都大学情報学研究科
Kyoto University

片井 修
Osamu Katai
京都大学情報学研究科
Kyoto University

Abstract: In this paper, we propose a framework of perception-action system for robots using Q-learning with Condition Reduced Fuzzy Rules. In this framework, the characters of dynamic environment measured by agent's body are considered as "affordances", which enable the agent to detect possible actions. The main point of this paper is that a process of "detection of affordances" is modeled.

1 はじめに

近年、未知環境などのモデル化が困難な環境において、自律エージェントが環境との試行錯誤的なインタラクションを通じて得られる情報をもとに適切な行動を学習する枠組みである強化学習が広く研究されている [1]。強化学習の枠組みでは、自律エージェントの状態が学習器に入力され行為が出力される。

しかし、このような強化学習の枠組みでは、入出力関係が変化する動的環境など複雑な環境に適応することは困難であった。そのため、動的環境においても適切な行為が可能となる知覚行為システムが必要とされている。

そこで、本稿では、環境知覚において自律エージェント（行為主体）の行為と環境の変化が重要な働きをするというアフォーダンス理論に注目し、複雑かつ動的な環境に適応する強化学習の枠組みを提案し考察する。

提案する枠組みは、環境のモデルを学習によって構築するのではなく、環境とのインタラクションを通じて身体を基準として環境を測り、価値付け、それに従って行為することを学習するモデルである。したがって、環境が変化した場合においても、身体を基準として適切に価値づけることができれば、動的環境においても適切な行為が可能な枠組みとなっている。

2 知覚される環境の価値

2.1 アフォーダンス理論の概要

アフォーダンス (affordance) という語は、行為の許可を意味するアフォード (afford) をもとに Gibson が作った造語である [2][3]。アフォーダンス理論において、行為主体は、環境の様子を感覚器から得られる情報をもとに構築し知覚しているのではなく、行為主体と環境との関係において行為による環境の変化をもとに、行為の機会を示す環境の特性として知覚しているとされる。たとえば、歩行は脚を交互に地面につけてただ単に入れ替えれば成立するといったものではなく、脚の着地時に知られる地面の堅さを感覚することで可能になっている。地面がぬかるみであれば、その地面に合った歩行をすることになる。つまり、行為によってはじめて知覚できる環境の特性があり、その知覚された環境の特性をもとに、新たな行為が行為主体と環境によって共同で作り出される。

2.2 アフォーダンスの例

ここで、環境の特性は物理学的な量として同定され知覚されているわけではないことに注意を要する。Gibson はアフォーダンスの例として次のようなものを紹介している。

陸地の表面がほぼ水平で平坦で、十分な大きさがあり、材質が堅いという特性をもっているとすると、その表面は支える (support) ことをアフォードする。それは支えるものの面であり、われわれはそれを土台、地面、あるいは床と呼ぶ。それはその上に立つことができるものであり、四足動物や二足動物に直立の姿勢を許す。(一部省略) この陸地の４つの特性（水平、平坦、広がり、堅さ）は、物理学で用いられる尺度、基本的標準単位で測定されるときには、面の物理的特性である。しかし、ある種の動物にとっての支えのアフォーダンスとしては、これらの４つの特性はその動物との関係で測定されなければならない。これらの特性は、それぞれの動物に固有であり、決して抽象的物理的特性ではない。それらはその動物の姿勢や行動と関連した統一性をもっている。(文献 [2] より引用、一部書き換え)。

つまり、環境の特性は、動作主体の身体的特性（姿勢、行為、物理的制約など）との関係で測定されたとき、アフォーダンスと呼ばれる [2]。このアフォーダンスは、動作主体が行為することによって知覚される、動作主体にとっての環境の価値である。また、あらゆる行為の中から可能な行為を絞り込むものであり、環境変化に適応的な行動を動作主体に示唆するものである。

3 アフォーダンスの検出

3.1 アフォーダンス検出の枠組み

アフォーダンスを検出し、環境に対して適応的な行為を学習する手法として図 1 に示す枠組みを提案する。図中、rule A は行為主体の状態変化と 1 ステップ前の

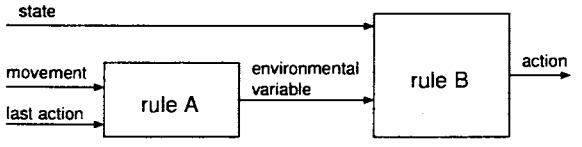


図 1: 提案手法の枠組み

行為を入力とし、注目すべき環境の特性を出力とする。rule B は、現在の状態と rule A からの出力を入力とし、行為主体の行為を出力とする。rule A と rule B は強化学習の一つである Q 学習によって入出力関係を学習する。

本提案手法は、行為主体の行為と状態変化から身体を基準とした環境の特性を知覚し、環境に適した行為を学習する枠組みとなっている。アフォーダンスは、身体を基準として測られた注目すべき環境の特性であり、アフォードされる行為は、アフォーダンスによって変化する。

3.2 部分的条件省略ファジィルールを用いた Q 学習

機械学習の一手法である Q 学習は、試行錯誤を通じて（入力, 出力）の組合せに対する評価値 (Q 値と呼ぶ) を学習する枠組である [4]。ここで、(入力, 出力) の組からその評価値 (Q 値) への写像を Q 関数と呼び、もっとも単純な場合、表形式によって実現される。

われわれは、Q 関数の表現にファジィ推論を導入し連続値入出力を扱うことができるファジィ内挿型 Q 学習 [5] の学習空間を複数に分割する “部分的条件省略ファジィルールを用いた Q 学習” を提案した [6]。部分的条件省略ファジィルール (CRFRs: Condition Reduced Fuzzy Rules) における前件部は、入出力変数の一部に

表 1: 提案手法の学習アルゴリズム

1. すべてのファジィルールにおける（入力変数, 出力変数）の組に対する評価値 C_i を初期化
2. Repeat Forever
   (a) Repeat T times
      i. 出力をランダムに仮定
      ii. （入力, 仮定された出力）の組に対する各ルールの一致度 ω_i を求める
      iii. 入力と仮定された出力の評価値を見積もる
   (b) (after second cycle)
      i. 前回の（入力, 出力）の組に対する評価値 Q 値の更新量 ΔQ を以下の式で求める

$$\Delta Q = \alpha\{r_t + \gamma \max_b Q(x_{t+1}, b) - Q(x_t, a_t)\} \quad (1)$$

      ii. 次の式にしたがって ΔQ を各 CRFR の評価値の更新量 ΔC_i に分配する

$$\Delta C_i = \frac{(\sum_j \omega_j \omega_i \Delta Q)}{(\sum_j \omega_j^2)} \quad (2)$$

   (c) 仮定された出力のうちから一つを選択して出力する。
   (d) 次の入力と強化信号を観測する

関する条件で構成されている。つまり、図 2 に示すとおり、入出力関係を学習するために十分と思われる n 個の変数のうち m 個 ($m < n$) 個の変数の関係を学習するモジュールを ${}_nC_m$ 個用意し、m 個の変数の関係を網羅的に学習するようにモジュールを構成する。本手法の学習アルゴリズムを表 1 に示す。

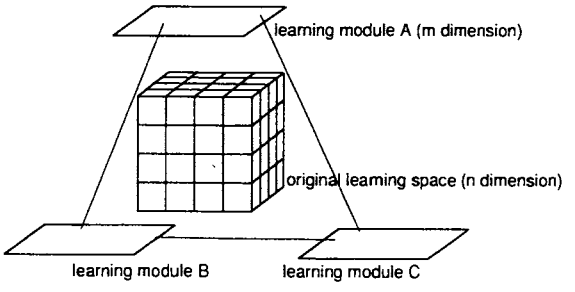


図 2: 学習空間のモジュール化

各モジュールは、1) それぞれの持つファジィルールと（現在の入力, 仮定された出力）の組との一致度、2) その組に対する評価値の 2 つを見積もる。そして、各モジュールから計算された一致度と評価値からファジィ推論によって、(現在の入力, 仮定された出力) に対する最終的な評価値が推論される。このようにして、複数個の仮定された出力に対する評価値を見積もり、実行される出力を確率的に選択する。

4 考察

動的環境において、従来手法と提案手法のアプローチの違いを説明し、比較、考察する。

4.1 問題設定

水の流速が変動するような動的環境中で船の操舵を学習することを考える。ここで、環境の変動が周期的でないとすると従来手法が煩雑になるため、流速が振幅 A、周期 T で周期的に変動しているとする。

4.2 従来手法

従来の強化学習手法では、流速の振幅、周期を同定した後に船の操舵を学習することになる。なぜなら、従来の強化学習手法における環境は、マルコフ決定過程という確率モデルを前提としているため、環境の様子は変動したとしても確率で記述できるという前提があるからである。

つまり、知覚行為学習システムとしては図 3 のようになると考えられる。この図式では、自らの行動は環境変動の計測時にはノイズとなるため、当然、まず最初にある時間ステップを停泊などして費やして環境の周期運動を同定し、そののちに船の操舵を学習するというステップが必要になると考えられる。学習空間の大きさは、状態変数 (S)、状態変数の変化 ($\dot{S}$)、振幅 (A)、周期 (T) を表す変数の数に依存する。

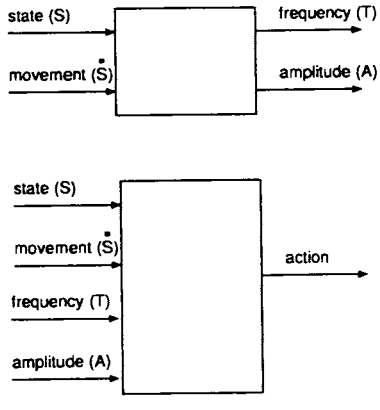


図 3: 従来手法

4.3 提案手法

提案手法における知覚行為システムは図 4 のようになる。提案手法では、動作主体の行為とそれに対する動作主体の動きによって、動作主体にとっての環境の流れを知る。すなわち、水の周期運動を同定するのではなく、オンラインで行為をしながら入出力関係を知覚し行為を決定することができる。したがって、環境の流れの性質（振幅、周期）が多少変化した場合においても、適応することができる。学習空間の大きさは、状態変数、環境の特徴を示す変数の数に依存する。

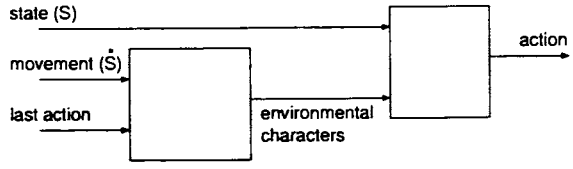


図 4: 提案手法

4.4 手法の比較

従来手法では、環境の性質（振幅, 周期）が変化した場合、再び環境の性質を同定しなければ環境に適応的な行為がとれなくなる。一方、提案手法では、環境に対する状態変化を感覚しながら行為の中から環境の特性も知覚し行為するシステムとなっている。したがって、環境の性質が変化した場合においても、自分の身体がどのように流されているかを環境の特性として知覚することによって、適応的な行為が可能な枠組みであると考えることができる。

以上のことから、学習器内部に構築された環境モデルに基づいて行為するシステムでは、構築された環境モデルとは異なる環境への適応には限界があるといえる。そして、動的で複雑な環境において知的な行為を実現するシステムは、自律エージェント内部で学習する環境に対して閉じている部分と、行為によって環境の特性を知覚するなど、環境に対して開かれている部分を、融合することが重要である。

5 おわりに

本稿では、アフォーダンスを「身体を基準にして測られた環境の特性」と定義し、アフォーダンスは過去にとった行為と感覚される状態変化から知覚されるとした。そして、動的環境など複雑な環境において自律エージェントが知的な行為を学習すると考えられる強化学習の枠組みを、アフォーダンスの概念を導入することによって提案した。

さらに、考察によって従来型の強化学習手法に見られる知覚システムでは動的環境に対して適応的な行為を学習することが困難であることを示し、自律エージェントと環境との関係において行為の中から環境の特性を知覚することの重要さを示した。

参考文献

[1] R. S. Sutton and A. G. Barto: Reinforcement Learning: An Introduction, The MIT Press, (1998)

[2] J.J. ギブソン: ギブソン　生態学的視覚論–ヒトの知覚世界を探る– サイエンス社 (1985)

[3] トマス J. ロンバード: ギブソンの生態学的心理学–その哲学的・科学史的背景– 勁草書房 (2000)

[4] C. Watkins and P. Dayan: "Technical Note:Q-learning", Machine Learning, 8-3/4, pp.279–292 (1992)

[5] 堀内匡, "連続値入出力を扱うファジィ内挿型 Q-learning の提案 ", 計測自動制御学会論文集, Vol.35, No.2, pp.217-279 (1999)

[6] 山岸栄輝, 堀内匡, 川上浩司, 片井修: "部分的条件省略ファジィルールを用いた強化学習", 計測自動制御学会論文集, Vol.37, No.12, pp.1178-1185 (2001)

連絡先：

〒 606-8501 京都市左京区吉田本町
京都大学 情報学研究科 システム科学専攻
山岸栄輝
TEL： 075-753-3592　FAX： 075-753-5042
Email : yama@sys.i.kyoto-u.ac.jp

相関を考慮した削除型ファジィモデルの改良

An Improvement on the Removing Type of Fuzzy Reasoning Models using Correlation

福元 伸也　　宮島 廣美　　長澤 庸二

Shinya Fukumoto　Hiromi Miyajima　Yoji Nagasawa

鹿児島大学 工学部

Faculty of Engineering, Kagoshima University.

Abstract : On the automatic construction technique of the fuzzy reasoning rules, we had reported the method that rules are constructed with deleting fuzzy rules in the process of learning. There was a problem which membership functions are overlapped after learning. Previously, we proposed the technique that was using correlation in order to solve this problem. This model was, however, limited in case of one dimension. In this report, we present the method that can cope with in case of multiple dimensions. We discuss the validity of this technique in the numerical experiments.

1　はじめに

ファジィ推論ルールの自動生成に関する研究が行われている．我々は以前，あらかじめ多くの推論ルールを初期値として与え，学習の過程で不要なルールを削除するモデル [1] を提案したが，この学習方法には構築した推論ルールに重なりが生じてしまう問題があった．そこでこの問題に対し，推論ルール間の相関を取ることにより，さらに推論ルールを減らす手法を提案した [2]．しかしながら，このときは１次元モデルへの適用にとどまった．そこで本報告では，多次元のモデルにおいてルール間の相関を取る手法について報告する．

2　相関型ファジィ推論モデル

ここでは，推論ルールの相関と分散を用いるファジィ推論モデルの考え方について説明する．まず，ルール間の相関についてであるが，１次元の場合，２つのメンバシップ関数がかなりの部分で重なった状態で存在するとルール間の相関が強いとする．すなわち，この重なった状態を表すのに何らかの指標があればよい．また，重なり合ったルールのうち，どちらのルールを取り除くかであるが，それには式 (1) で示される分散度という指標を用いる．

$$s = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1} l(R^{(i)}, R^{n(i)}) \qquad (1)$$

ただし，$l(R^{(i)}, R^{n(i)})$ は，ルール $R^{(i)}$ とこれに最も近いルール $R^{n(i)}$ との距離を表す．この分散度は，学習空間での推論ルールの広がりを表す指標であり，分散度の大きいルールの方が学習に用いていないデータへの適用能力が高いと考えられ，すなわち汎化能力のあるルールと言える．そこで２つのルールのうち分散度の大きいルールを残すこととする．

つぎにルール間の相関を２次元のモデルに拡張して考える．２つの変数を持つ場合のルールを真上から見ると図１のように表される．

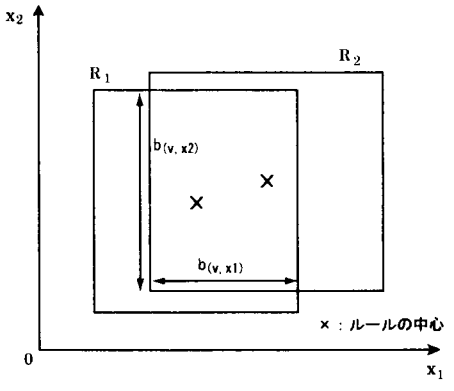


図 1: ２次元の推論ルール

ここで x_1 軸上の平面から x_2 軸方向を見た場合のメンバシップ関数は，図２のように表される．
図中のメンバシップ関数 M_1 は中心座標 c_1，底辺の幅 b_1 を持ち，M_2 は c_2,b_2 を持つものとする．ただし，メンバシップ関数は次式で表される三角型のメンバシップ関数とする．

$$M_i(x) = \begin{cases} 1 - \frac{2\cdot|x - c_i|}{b_i} & (c_i - \frac{b_i}{2} \le x_j \le c_i + \frac{b_i}{2}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \qquad (2)$$

つぎに図２のメンバシップ関数が重なった部分の高さ h_{x_1} を算出する式を導く．図２において重なった部分の高さ h_{x_1} は次式により表される．

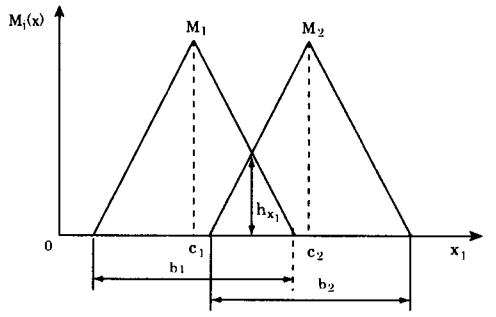


図 2: メンバシップ関数の重なり

$$h_{x_1} = 1 - \frac{2|c_2 - c_1|}{b_1 + b_2} \tag{3}$$

同様にして，x_2 軸における高さ h_{x_2} を算出する．

つぎに重なり部分を立体として考えた場合の高さ h は，

$$h = \min\{h_{x_1}, h_{x_2}\} \tag{4}$$

を取ることとする．

2次元の場合，2つのルールの重なりが大きいということは，重なっている部分の体積がルール R_1 やルール R_2 の四角錐がもつ体積に近い値になるということである．ここで，四角錐の体積を求めるのにカヴァリエーリの法則を利用する．カヴァリエーリの法則とは，「同じ高さを持つ角錐の体積は同じ水準高の断面積に比例する」というものである．この法則により，基準体積 V_0 を $1 \times 1 \times 1 \times \frac{1}{3} = \frac{1}{3}$ とすると

$$V_{R_1} = V_0 b_{(R_1,x_1)} b_{(R_1,x_2)} = \frac{1}{3} b_{(R_1,x_1)} b_{(R_1,x_2)} \tag{5}$$

と表される．ただし，ルール R_1 が持つ x_1 方向の底辺の幅を $b_{(R_1,x_1)}$ のように表すことにする．同様に V_{R_2} も算出される．

また，重なり部分の基準体積 V_{v_0} は，重なり部分の高さ h を含む式 $1 \times 1 \times h \times \frac{1}{3} = \frac{h}{3}$ で表されるので，重なり部分の体積 V_v は，

$$V_v = V_{v_0} b_{(v,x_1)} b_{(v,x_2)} = \frac{h}{3} b_{(v,x_1)} b_{(v,x_2)} \tag{6}$$

ただし，$b_{(v,x_1)}, b_{(v,x_2)}$ は，図1で表されるメンバシップ関数の重なった部分の長さである．

以上よりルール間の相関係数を次式により定義することとし，2つのルールのうち，小さい分散度を持つルールを削除する．

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{V_v}{(V_{R_1} + V_{R_2})/2} \qquad (7) \\ &= \frac{2h b_{(v,x_1)} b_{(v,x_2)}}{b_{(R_1,x_1)} b_{(R_1,x_2)} + b_{(R_2,x_1)} b_{(R_2,x_2)}} \\ &= \frac{2 \times (\text{重なり部分の高さ}) \times (\text{重なり部分の底面積})}{(\text{ルール } R_1 \text{の底面積}) + (\text{ルール } R_2 \text{の底面積})} \end{aligned}$$

3 数値実験

実験では，次式に示す2変数の関数近似を行った．

$$y = \sin(\pi x_1^3) \times x_2$$

学習データの定義域は $[0,1]$ とし200個のデータを用いた．推論誤差のしきい値 T_1 は 6.0×10^{-3}，しきい値の変化量のしきい値 T_2 は 1.0×10^{-6} とし，ρ のしきい値は0.85とした．構築されたルールと結果は，図2と表1のようになった．図2より，相関型モデルで重なったルールを取り除けたことがわかる．(図の矢印部分)

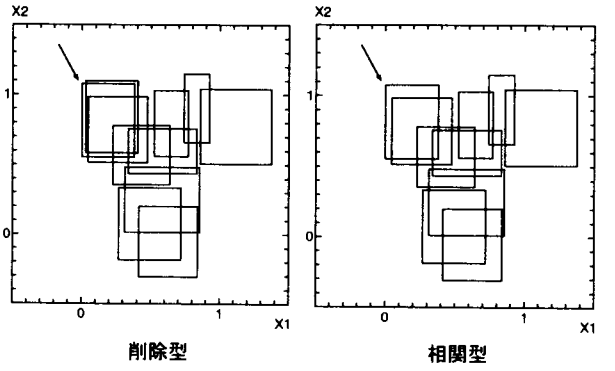


図 2: 構築されたルール

表 1: 関数近似の結果

	削除型モデル	相関型モデル
ルール数	11	10
推論誤差 ($\times 10^{-3}$)	7.2	7.4

4 まとめ

本研究では，相関型ファジィ推論モデルを2次元の場合へ拡張し，数値実験ではルールの重なり部分を取り除くことができた．今回は2次元までの拡張であったが，さらに高次元のケースに対しても対応できるモデルを検討していきたい．

参考文献

[1] 宮島, 福元, 石塚:"ルールの削除に基づくファジーモデリング", 信学論, vol.J77-A,no.11,pp.1555-1562(1994).

[2] 福元, 宮島, 長澤:"分散と相関によるファジィ推論モデルの構築", 日本ファジィ学会誌, vol.13,no.2, pp.217-222 (2001).

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

逐次入力を用いた忘却型ファジィ・ニューラルネットワークによるファジィルールの学習

Incremental Learning of Fuzzy Rules by Fuzzy Neural Network with Forgetting Facility

馬野 元秀 Motohide Umano　細谷 優 Yuu Hosoya　宇野 裕之 Yushi Uno　瀬田 和久 Kazuhisa Seta　岡田 真 Makoto Okada

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
Department of Mathematics and Information Sciences
College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

Abstract Given data one by one, We extract fuzzy rules using fuzzy neural network without prior information and initial fuzzy rules. First, we get a data to reason a result. If the reasoning result is wrong, we add a fuzzy rule, *i.e.* some membership units and a rule unit in fuzzy neural network. Next, we tune and prune fuzzy rules by learning with forgetting facility. We repeat this process for data given one by one. We applied this method to the data of iris classification problem by R.A. Fisher.

1. はじめに

従来のファジィ・ニューラルネットワークを用いた学習では，データを一度に読み込み，初期ファジィルールを生成し，ファジィルール中の結論部や条件部のメンバーシップ関数をチューニングしていた [1], [2].

しかし，この方法では新たにデータが追加されたときには，始めから学習し直さなければならないという問題点がある．また，人間により近い形でモデル化しようとすると，初期ルールなしの状態から逐次的にデータを読み込み，必要に応じてメンバーシップ関数やルールを追加していき，同時にそれらのチューニングを行う形の方が自然であると考えられる．本研究では忘却型学習機能をもつファジィ・ニューラルネットワークを用いた手法を提案する．

2. 忘却型学習による ファジィ・ニューラルネットワーク

2.1 ファジィ・ニューラルネットワーク

本研究で用いるファジィ・ニューラルネットワークは図1のような構造になる．

各層での入力から，出力を計算する方法は次のようになる．

(1) 第 0 層 (入力層)

入力を分配するのみで計算は行わない．

(2) 第 1 層 (メンバーシップ層)

入力に対するメンバーシップ関数の値 (各条件との一致度) を次の式で計算し出力する．

$$O^1_{ji} = \exp\{(\frac{x_i - a_{ji}}{b_{ji}})^2\} \tag{1}$$

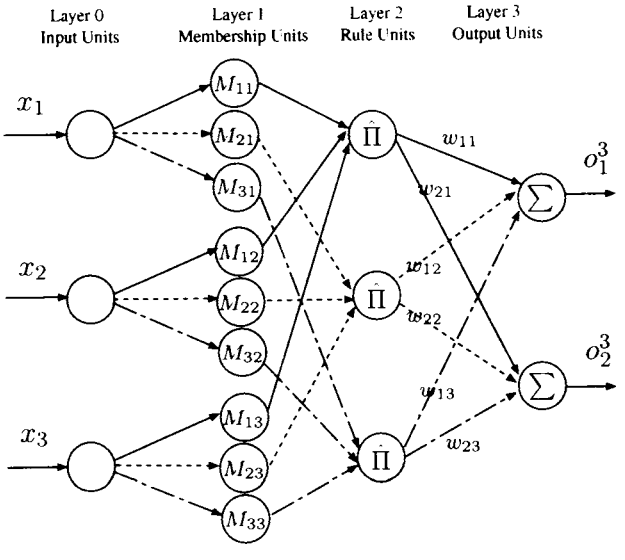


図 1: ファジィ・ニューラルネットワーク

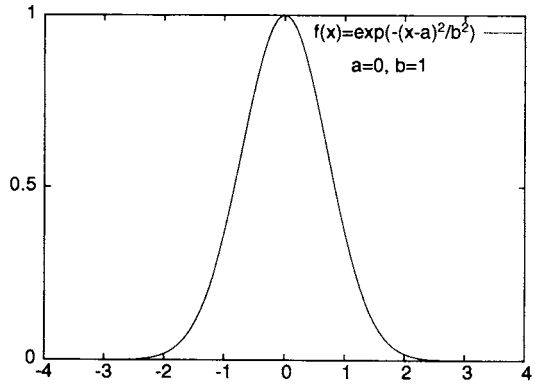


図 2: ガウス関数

ここで，x_i は i 番目の入力変数で，a_{ji} と b_{ji} はそれぞれ j 番目のルールの i 番目の入力変数に対するメンバーシップ関数の中心値と幅である．

つまり，メンバーシップ関数としては図 2 のようなガウス関数が使われていることになる．

(3) 第 2 層 (ルール層)

入力の積 (条件部全体の一致度) を正規化したものを次の式で計算し出力する．

$$O_j^2 = \frac{\prod_i O_{ji}^1}{\sum_k (\prod_i O_{ki}^1)} \tag{2}$$

各ユニットが 1 つのファジィルールに対応している．

(4) 第 3 層 (出力層)

入力にリンクの重み (結論部の実数値) を掛けた和 (推論結果) を次の式で計算し出力する．

$$O_k^3 = \sum_j w_{kj} O_j^2 \tag{3}$$

ここで，w_{kj} は第 2 層の j 番目のユニットから第 3 層の k 番目のユニットへのリンクの重みである．

2.2 ルールとメンバーシップ関数のチューニングとプルーニング

ルールとメンバーシップ関数のチューニングとプルーニングには文献 [1] の忘却型学習を用いる．

(1) ルールのチューニングとプルーニング

ネットワークの第 2 層から第 3 層へのリンクの重み (ルールの後件部実数値) は，通常の階層型ニューラルネットワークと同じ計算を行っている．すなわち，第 2 層からの出力をリンクの値で重み付けし，その総和をとっている．そのため，2-3 層間の重みが 0 になればそのユニットからの影響は受けなくなる．したがって，リンクの重みを 0 に近づけるような付加項を評価関数に加えて学習を行い，すべての 2-3 層間のリンクの重みが 0 になった第 2 層のユニット (1 つのルールに相当) を削除することにより，ルールのプルーニングが可能になる．したがって，2-3 層間のリンクの重みを w_{kj}，入出力パターン p に対する k 番目の教師データを t_{pk}，推論結果を o_{pk} とすると評価関数は次のようになる．

$$E_p = \frac{1}{2}\sum_k (o_{pk} - t_{pk})^2 + \varepsilon \sum_{k,j} |w_{kj}| \tag{4}$$

この方法の更新量 $\Delta w'_{kj}$ は，通常の BP 法の更新量を Δw_{kj} としたとき

$$\Delta w'_{kj} = \Delta w_{kj} - \varepsilon \,\mathrm{sgn}(w_{kj}) \tag{5}$$

となる．ここで，$\mathrm{sgn}(x)$ は x が正のとき $+1$ で，0 のとき 0 で，負のときに -1 となる関数である．これにより，重みの更新時には ε だけ余分に 0 に近づくので，あまり更新されない w_{kj} は徐々に 0 に近づいていく．このことから ε は忘却量と呼ばれる．

(2) メンバーシップ関数のチューニングとプルーニング

ルールユニットでは，入ってきた信号に対し積演算を行っている．そのため第 1 層 (メンバーシップ層) からの入力が 1 になれば，そのユニットからの影響は受けなくなる．そのため，メンバーシップ関数の学習は常に 1 が出力されるように，幅を広げるような付加項を通常の更新量に付け加え，十分に幅の広がったメンバーシップ関数を削除すればよい．ここでは，通常の BP 法で更新した後，その値を定数倍する．したがって，幅 b_{ji} の更新量 $\Delta b'_{ji}$ は次のようになる．

$$\Delta b'_{ji} = \phi(b_{ji} + \Delta b_{ji}) \tag{6}$$

ここで，Δb_{ji} は通常の BP 法の更新量で，ϕ は忘却率と呼ばれる．

3. 逐次入力を用いた忘却型ファジィ・ニューラルネットワーク

本研究法では，データを逐次的に読みながら学習を行う．すなわち，データを 1 個読み，現在のファジィ・ニューラルネットワークで推論し，結果が間違っていればメンバーシップ関数とルールを追加する．そして，最近入力されたデータ n 個 (n 個に満たない場合，すべてのデータ) で L 回ずつ

学習を行なう．その際，忘却型学習によりネットワークのチューニングと不要なルールとメンバーシップ関数のプルーニングを行う．さらに，あるルールのメンバーシップ関数のプルーニングを行なった結果，他のルールと一致する場合があり，そのようなルールも削除する．

3.1 ルールの追加

推論結果が間違ったときには，現在読み込んだデータをカバーできるルールがないと考え，ルールの追加を行なう．すなわち，メンバーシップユニット (前件部) と，ルールユニットと出力層のユニット間のリンクの重み (後件部) の追加を行なう．

3.2 メンバーシップ関数の追加

メンバーシップ関数については，現在読み込んだデータをカバーできるものがあればそれを使う．すなわち，そのデータに対するメンバーシップ値がしきい値 θ_μ より大きい場合，そのメンバーシップユニットをルールユニットに結合する．カバーできるメンバーシップ関数が複数あるときには，一番大きいメンバーシップ値を示すものを使う．この場合は，他のルールとメンバーシップ関数を共有することになる．

カバーできるものがなければ，新たにメンバーシップ関数を追加する．追加されるメンバーシップ関数は，中心がその属性の入力データの値で幅が一定値 b である．

3.3 2–3 層間のリンクの重みの追加

ルールユニットと出力層のユニット間のリンクの重み (後件部) は，入力データに対する教師データ (正解) を用いる．すなわち，教師データが 0 となっている出力層のユニットへのリンクの重みは 0～0.4，1 となっている出力層のユニットへのリンクの重みは 0.6～1 の間の値をそれぞれランダムに与える．

図 3 において点線の矢印のリンクを結んだものが追加されたルールである．入力データの第 1 変数に対しては，メンバーシップ関数 M_{21} のメンバーシップ値が M_{11} のものより大きく，さらに，しきい値 θ_μ よりも大きいためメンバーシップ関数 M_{21} は共有される．第 2 変数に対しては，メンバーシップ値がしきい値よりも大きいものがなかったため，メンバーシップ関数 M_{32} を追加している．

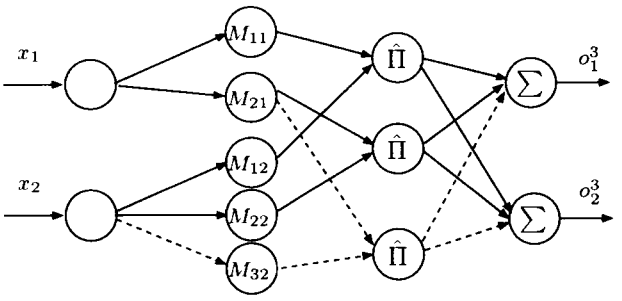


図 3: ルールの追加

4. アヤメの分類問題によるシミュレーション

本提案法により，Fisher のアヤメの分類問題 [3] を用いてシミュレーションを行なった．データは 3 種類のアヤメの「がくの長さ」,「がくの幅」,「花弁の長さ」,「花弁の幅」の 4 種類の属性を計測したもので，各種類 50 個ずつ，合計 150 個のデータがある．つまり初期ネットワークは 4 入力 3 出力で，入力は X1=がくの長さ，X2=がくの幅，X3=花弁の長さ，X4=花弁の幅に対応させ，出力の 3 種類のアヤメに C1，C2，C3 を対応させる．

そして，次のような 2-fold cross-validation 法を用いて数値実験を行った．

1. 150 個のデータからランダムに 75 個選び，一方を学習用データに，もう一方を評価用データにする．
2. 学習用データを 1 個読むごとに，最近入力された n 個で L 回学習し，評価用データ 75 個でチェックを行なう．これをすべての学習用データについて行なう．
3. 学習用データと評価用データを入れ換え，2 の手順と同じ操作を行い，学習データの個数ごとの正解率の平均をとる．

上記の試行を 1 回と考え，この試行を 20 回行なった．このときの正解率とルール数を表 1 と図 5 に示す．学習の条件は，忘却学習に用いるデータの数 $n = 10$，メンバーシップ関数の追加に関するしきい値 $\theta_\mu = 0.90$，幅 $b = 1$，Δw_{kj} における結論部実数値の学習係数 0.1，メンバーシップ関数の中心値の学習係数 0.1，Δb_{ji} におけるメンバーシップ関数の幅の学習係数 0.1，結論部の忘却量 $\varepsilon = 0.001$，削除のしきい値 0.0005，メンバーシップ関数の忘却率 $\phi = 1.0006$，削除のしきい値 0.9999 で学習回

表 1: 25, 50, 75 個目の入力データに対する学習を終えた時点での正解率とルール数の平均 ($L = 500$)

	正解率 (%)				ルール数			
学習個数	平均	最小	最大	標準偏差	平均	最小	最大	標準偏差
25	85.27	62.67	94.67	6.90	4.33	3	6	0.78
50	85.27	65.33	96.00	7.69	4.40	3	6	0.80
75	87.13	73.33	94.00	5.16	4.38	4	6	0.77
従来 [1]	94.43	88.67	97.33	1.77	6.95	3	9	1.20

```
        Correct Rate (check): 94.66667 %
Rule 1  :======================
    If  X3 is G(4.45673,0.168629)
      then  C1 :   0.000849616
            C2 :   0.997334
            C3 :   0.000270233
Rule 2  :======================
    If  X3 is G(3.91747,0.366091)
      then  C1 :   -0.00173653
            C2 :    1.0023
            C3 :    0.000382146
Rule 3  :======================
    If  X2 is G(3.08837,28.0659) and
        X4 is G(2.3909,0.491691)
      then  C1 :   0.000344217
            C2 :   -0.0013
            C3 :    0.999337
```

図 4: 50 個学習した時点のルール ($L = 500$)

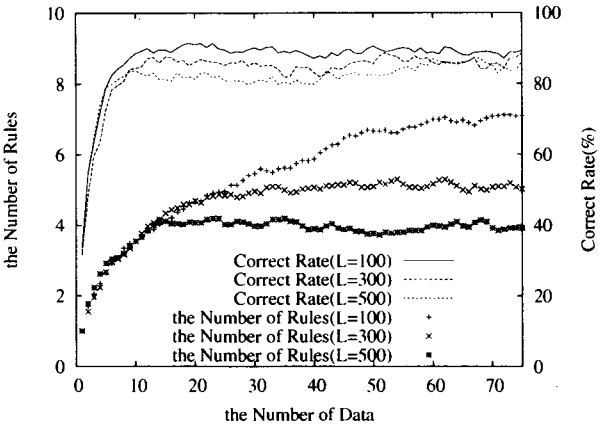


図 5: ルール数と正解率の推移

数 $L = 100$, $L = 300$, $L = 500$ をそれぞれ行なった. 例として図 4 のようなルールが得られた.

Rule 1 では C2 に対する重みが一番強いことになる. 結論部が負の場合は, その結論の度合いを減らすので, 負の関連があると考えられる.

図 5 から, 数十個学習した時点である程度推論できるようになっているのが分かる. また表 1 から, 従来と比較すると平均正解率は少し落ちているが, 平均ルール数は 4 個程度で推移しており、従来よりも少なめに抑えられている. $L = 100$ ではルール数が少し多くなっており, $L = 300$ 以上の学習が必要と思われる.

5. おわりに

本研究では, 逐次入力による忘却型ファジィ・ニューラルネットワークの学習法を提案した.

しかし, 学習パラメータの設定に多大な労力と時間を要することや, 古いルールと新しいルールの学習回数の違い, データによって学習回数が異なる点などの問題点もあり, これらについても考えていきたい.

参考文献

[1] 馬野 元秀, 福中 寿朗, 鳩野 逸生, 田村 坦之: 忘却の概念を用いた ファジィ・ニューラルネットワークによる ファジィルールの抽出, 計測自動制御学会論文集 Vol.32 No.3 pp.409-416, 1996.

[2] 石原 成浩, 高木 敏幸, 中西 祥八郎: Kohonen 型ニューラルネットワークを用いたファジィ推論ルールの構成, 第 9 回 ファジィシステムシンポジウム, pp.425-428, 1993.

[3] R.A.Fisher: The use of multiple measurements in taxonomic problems, *Annals of Eugenics*, Vol.7 No.2 pp170-180, 1936.

[問い合わせ先]
〒599-8531 堺市学園町 1 - 1
大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
馬野 元秀
TEL: 072-254-9675
FAX: 072-254-9930
Internet: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

論理型 Choquet 積分
－論理関数としての性質，ファジィ積分としての性質－

Logical Choquet Integrals: properties as switching functions and fuzzy integrals

高萩栄一郎 (Eiichiro TAKAHAGI)
専修大学 (SENSHU University)

Abstract– This paper is the outline of the relations among fuzzy integrals and fuzzy switching functions. Sugeno integrals and fuzzy switching functions have closed relations and each model can represent another model. Using Choquet integrals instead of Sugeno integrals, the functions have many good properties, such as complementary law and monotonicity, and can represent the linear functions.

Keywords– Fuzzy Measure, Choquet Integral, Sugeno Integral, Fuzzy switching functions, Complementary law, Monotonicity

1 はじめに

本稿は，定数係数を持ったファジィ論理関数 (Fuzzy/C)，ファジィ論理関数，菅野積分，Choquet 積分，Choquet 積分を拡張した論理型 Choquet 積分 (LC 積分) を定義し，それらの関係を示し，また，LC 積分の性質を検討する．結論は，図 1 を参照していただきたい．

2 各関数の定義

2.1 定数係数を持ったファジィ論理関数

定数係数を持ったファジィ論理関数 (Fuzzy/C)[3] は，

$$f(x_1,x_2)=(0.6\wedge x_1\wedge\neg x_2)\vee(0.8\wedge x_2)\vee 0.1 \quad (1)$$

のような定数係数を持ったファジィ論理関数である．通常は，$\wedge$ は min を，$\vee$ には max を，$\neg x_i$ は $1-x_i$ を割り当てて計算する．このような Max-Min 演算を行う場合，f に肩字 M を付ける．例えば，式 (1) の場合，$f^M(0.5,07)=0.7$ である．

Fuzzy/C の単調性は，

$$x_1^1\geq x_1^2,\ldots,x_n^1\geq x_n^2\rightarrow f^M(x_1^1,\ldots,x_n^1)\geq f^M(x_1^2,\ldots,x_n^2) \quad (2)$$

で定義する．

2.2 ファジィ測度・積分

ファジィ測度 μ を $(\mu:2^X\rightarrow[0,1])$ で定義し，必要に応じて，ファジィ測度の 0 制約 $(\mu(\emptyset)=0)$，正規性 $(\mu(X)=1)$，ファジィ測度の単調性 $(A\subseteq B\subseteq X\rightarrow\mu(A)\leq\mu(B))$ を追加する．ファジィ測度の 0 制約とファジィ測度の単調性を仮定した場合の菅野積分 (S) を

$$(\mathrm{S})\int h d\mu\equiv\max_{r\in[0,1]}\min[r,\mu(\{x\mid h(x)>r\})], \quad (3)$$

で定義する．また，単調性のみを仮定したファジィ測度の場合の菅野積分を拡張菅野積分 (ES) と呼び，その定義式は，菅野積分と同様とする．

$$(\mathrm{ES})\int h d\mu\equiv\max_{r\in[0,1]}\min[r,\mu(\{x\mid h(x)>r\})] \quad (4)$$

$h(i),i=1,\ldots,n$ をファジィ積分の入力値として，ファジィ測度の 0 制約を仮定した Choquet 積分を

$$(\mathrm{C})\int h d\mu\equiv\int_0^\infty\mu(\{x\mid h(x)>r\})dr. \quad (5)$$

で定義する．拡張 Choquet 積分は，拡張菅野積分同様，ファジィ測度の 0 制約を外したもので，定義式は，

$$(\mathrm{EC})\int h d\mu\equiv\int_0^\infty\mu(\{x\mid h(x)>r\})dr. \quad (6)$$

である．

2.3 2 入力菅野積分

2 入力菅野積分は，入力値を真偽に分けて菅野積分によって求める．入力値の集合を $X^*=\{1^T,\ldots,n^T,1^F,\ldots,n^F\}$ とする．任意の Fuzzy/C の単項 x_i を x_i^F に，$\neg x_i$ を x_i^F に置き換えた式を $f^*(x_1^T,\ldots,x_N^T,x_1^F,\ldots,x_N^F)$ とする．入力値を $h(i^T)=x_i^T=x_i, h(i^F)=x_i^F=1-x_i$ とし，

$$\mu^*(A)=f^{*M}(x_1^T,\ldots,x_n^T,x_1^F,\ldots,x_n^F),\forall A\in 2^{X^*} \quad (7)$$
$$x_i^T=1 \text{ if } i^T\in A$$
$$x_i^T=0 \text{ if } i^T\notin A$$
$$x_i^F=1 \text{ if } i^F\in A$$
$$x_i^F=0 \text{ if } i^F\notin A$$

でファジィ測度を求め，拡張菅野積分を行う．

2.4 論理型 Choquet 積分

論理型 Choquet 積分 (LC 積分) は，$X=\{1,2,\ldots,n\}$ 上に定義されたファジィ測度 μ から，$X^*=\{1^T,2^T,\ldots,n^T,1^F,2^F,\ldots,n^F\}$ 上に定義されるファジィ測度 g を求め，入力値を真偽に分けたものを Choquet 積分行い，出力値を求める．

任意の $i^T(i^F)$ に対して $i^F(i^T)$ を相補な要素と呼び，相補な要素を含む集合を相補集合，含まない集合を非相補集合と呼ぶ．基本集合 B は，各 i について，i^T と i^F のどちらか一方だけを必ず含む集合（要素の数が n の非相補集合）である．また，基本集合 B の集合を $\mathfrak{B}$ とする．

LC 積分のファジィ測度 $g: 2^{X^*} \to [0,2]$ を，次のように割り当てる．

- 非相補かつ非基本集合のファジィ測度の値は，0.
- 基本集合を含まない相補集合のファジィ測度の値は，0.
- 基本集合 B のファジィ測度の値は，μ からもとめる．

$$g(B) = \mu(A), A = \{i \mid i^T \in B\} \tag{8}$$

- 基本集合を含む相補集合 D のファジィ測度の値は，D を被覆する 2 つの基本集合 $(B^1 \cup B^2 = D, B^1, B^2 \in \mathfrak{B})$ のファジィ測度の和とする．D を被覆する 2 つの基本集合への分割パターンが複数あるときは，それらのファジィ測度の和の（一般化）平均値とする．

$$g(D) = \underset{\{(B^1,B^2)|B^1 \cup B^2 = D, B^1, B^2 \in \mathfrak{B}\}}{\mathrm{GAV}} [g(B^1) + g(B^2)] \tag{9}$$

$\forall D \in \mathfrak{D}$ ただし，GAV は，一般化平均演算で，

1. $\min(a_1, \ldots, a_k) \leq \mathrm{GAV}(a_1, \ldots, a_k) \leq \max(a_1, \ldots, a_k)$,
2. $\mathrm{GAV}(a_1, \ldots, a_k) = \mathrm{GAV}(a_1, \ldots, a_k, a_1, \ldots, a_k)$

の 2 つの性質をもっているものとする．本稿で使う一般化平均演算は，算術平均 (AM) と TF 型 (TF) である．TF 型は，$C_D = \{i \mid i^T \in D, i^F \in D\}$, $N_D = D \setminus \{i^T, i^F \mid i \in C_D\}$, $B^T = \{i^T \mid i \in C_D\} \cup N_D$, $B^F = \{i^F \mid i \in C_D\} \cup N_D$ とし，$g(D) = g(B^T) + g(B^F)$ とする．

ファジィ測度 g の値は，一般化平均演算の種類により異なるので，それぞれ g^{AM}, g^{TF} と記述する．

論理型ファジィ積分 (LC) は，次式で定義される．

$$(\mathrm{LC}) \int h d\mu \equiv (\mathrm{C}) \int h^* dg, \tag{10}$$
$$\text{where } h^*(i^T) = h(i), h^*(i^F) = 1 - h(i), \forall i$$

GAV を特定した場合，LC に肩字をつけて区別する．すなわち，$(LC^{AM}) \int h d\mu \equiv (\mathrm{C}) \int h^* dg^{AM}$, $(LC^{TF}) \int h d\mu \equiv (\mathrm{C}) \int h^* dg^{TF}$ とする．

2.5 CFB 関数

Choquet 積分型ファジィ 2 値論理関数（Choquet integral based Fuzzy Binary switching function; CFB 関数）は，LC 積分を使って，Fuzzy/C を計算する．

計算を行う Fuzzy/C を f とする．その f への 2 値の入力からファジィ測度 μ を割り当てる．

$$\begin{aligned} \mu(A) = & f^M(x_1, \ldots, x_n) \\ & x_i = 1 \quad \text{if } i \in A \\ & x_i = 0 \quad \text{if } i \notin A, \end{aligned} \tag{11}$$

$$f^{CFB}(x_1, \ldots, x_n) \equiv (\mathrm{LC}) \int h d\mu \tag{12}$$
$$\text{where } h(i) = x_i, \forall i$$

GAV を特定した場合，$f^{CFB(AM)}(x_1, \ldots, x_n) \equiv (LC^{AM}) \int h d\mu$, $f^{CFB(TF)}(x_1, \ldots, x_n) \equiv (LC^{TF}) \int h d\mu$ のように記述する．

3 各ファジィ論理関数とファジィ積分の関係

3.1 単調かつ $f^M(0,0,\ldots,0) = 0$ な Fuzzy/C

単調かつ $f^M(0,0,\ldots,0) = 0$ な Fuzzy/C と菅野積分は，相互に変換可能である．

$$\begin{aligned} \mu(A) = & f^M(x_1, \ldots, x_n), \forall A \in 2^X \\ & x_i = 1 \text{ if } i \in A, \\ & x_i = 0 \text{ if } i \notin A \end{aligned} \tag{13}$$

とすれば，

$$(\mathrm{S}) \int h d\mu = f^M(x_1, \ldots, x_n) \tag{14}$$
$$\text{where } h(1) = x_1, \ldots, h(n) = x_n$$

である．逆に，菅野積分を，

$$f^M(x_1, \ldots, x_n) = \bigvee_{A \in 2^X} [\mu(A) \wedge \bigwedge_{i \in A} x_i] \tag{15}$$

という Fuzzy/C で表現できる．単調かつ $f^M(0,0,\ldots,0) = 0$ な Fuzzy/C は，Weighted Max-Min Function で，Marichal[7] は，菅野積分は，Weighted Max-Min Function であることを指摘している．

3.2 単調な Fuzzy/C

単調な Fuzzy/C は，$\mu(\emptyset) \in [0,1]$ に拡張した拡張菅野積分と相互に変換可能である．相互の変換方法は，菅野積分と同様である．

3.3 Fuzzy/C

一般の Fuzzy/C は，2 入力菅野積分で表現可能である．すなわち，式 (7) で割り当てた μ^* を使えば，

$$f^M(x_1, \ldots, x_n) = (\mathrm{ES}) \int h^* d\mu^* \tag{16}$$

ただし，$h^*(i^T) = x_i, h^*(i^F) = 1 - x_i, i = 1, \ldots, n$ である．

3.4 Choquet 積分

Choquet 積分は，Max-Min 演算を行う Fuzzy/C を表現できないし，逆も表現できない．本稿では，Max-Min 演算を離れ，Fuzzy/C の計算方法として，Choquet 積分を利用する．

3.5 (LC^{TF}) 積分と拡張 Choquet 積分

(LC^{TF}) 積分と拡張 Choquet 積分は，一致する．

$$(LC^{TF}) \int h d\mu = (\mathrm{C}) \int h d\mu, \forall \mu, h \tag{17}$$

ただし，右辺の Choquet 積分は非単調なファジィ測度の Choquet 積分である．

4 論理関数として持っていてほしい性質

4.1 出力値が $[0,1]$ に収まること

任意の CFB 関数に対して，その出力値は，$[0,1]$ である．

$$f^{CFB}(x_1,\ldots,x_n)\in[0,1],\forall x_i\in[0,1] \tag{18}$$

4.2 2値論理関数の拡張

CFB 関数は，2 論理関数の拡張である．

$$f^{CFB}(x_1,\ldots,x_n)=f^{M}(x_1,\ldots,x_n),\forall x_i\in\{0,1\}$$

4.3 連結律

Max-min 演算を行う Fuzzy/C は，連結律を満たすが，CFB 関数は連結性を満たさない．例えば，$f_1(x_1,x_2)=x_1\wedge x_2$，$f_2(x_1,x_2)=x_1\wedge\neg x_2$ とし，$f_3(x_1,x_2)=(x_1\wedge x_2)\vee(x_1\wedge\neg x_2)$ としたとき，Max-min 演算を行った場合，$f_1^M(x_1,x_2)\vee f_2^M(x_1,x_2)$ と $f_3^M(x_1,x_2)$ は一致するが，CFB 関数の場合は一致しない．

4.4 単調性

2 値の入力に対して単調性がある場合，CFB 関数は単調である．$\forall x_i\in\{0,1\},i=1,\ldots,k-1,k+1,\ldots,n$ とし，

$$\begin{aligned}&f^{M}(x_1,\ldots,x_{k-1},1,x_{k+1},\ldots,x_n)\\ &\geq f^{M}(x_1,\ldots,x_{k-1},0,x_{k+1},\ldots,x_n),\end{aligned} \tag{19}$$

ならば，任意に固定した $\bar{x}_i(\in[0,1],i=1,\ldots,k-1,k+1,\ldots,n)$ と x_k,y_k（ただし，$1\geq y_k\geq x_k\geq 0$）に対して，

$$\begin{aligned}&f^{CFB}(\bar{x}_1,\ldots,\bar{x}_{k-1},y_k,\bar{x}_{k+1},\ldots,\bar{x}_n)\\ &\geq f^{CFB}(\bar{x}_1,\ldots,\bar{x}_{k-1},x_k,\bar{x}_{k+1},\ldots,\bar{x}_n)\end{aligned} \tag{20}$$

である．式 (19) および x_k,y_k の不等号の向きが逆の場合や強意の場合，式 (20) の不等号の向きや等号の有無が異なる．

4.5 相補律

（定数係数を持たない）ファジィ論理関数を CFB 関数で表現した場合，相補律（矛盾律，排中律）が成立する．例えば，$f_4(x_1,x_2)=x_1\wedge x_2$，$f_5(x_1,x_2)=(x_1\wedge x_2)\vee(x_1\vee\neg x_1)$ としたとき，$f_4^{CFB}(x_1,x_2)=f_5^{CFB}(x_1,x_2),\forall x_1,x_2\in[0,1]$ となる．

これは，CFB 関数 (LC 積分) のファジィ測度はすべて Fuzzy/C の 2 値の入力から決まるためである．すなわち，$f_1^M(x_1,\ldots,x_n)=f_2^M(x_1,\ldots,x_n),\forall x_1,\ldots,x_n\in\{0,1\}$ ならば，f_1^M，f_2^M の 2 値の入力から定まる $g_1(A)=g_2(A),\forall A\in 2^{X^*}$，$\mu_1(A)=\mu_2(A),\forall A\in 2^X$，したがって，$(\mathrm{LC})\int hd\mu_1=(\mathrm{LC})\int hd\mu_2,\forall h(i)\in[0,1]$ であり，$f_1^{CFB}(x_1,\ldots,x_n)=f_2^{CFB}(x_1,\ldots,x_n),\forall x_i\in[0,1]$ となる．したがって，2 値の入力に対して成立する性質はすべて CFB 関数でも成立する．

4.6 入力値の方向の逆転

FCB(AM) は，入力値の方向を逆にしてもよい．ある Fuzzy/C $f_1(x_1,\ldots,x_n)$ のある k の入力の方向を逆にする．すなわち，すべての x_k を $\neg x_k$ で置き換えた Fuzzy/C を $f_2(x_1,\ldots,x_n)$ とする．このとき，f_1 と f_2 の x_k を $1-x_k$ に置き換えたものは等しい．すなわち，$\forall x_i\in[0,1]$ に対して，

$$f_1^{CFB}(x_1,\ldots,x_n)=f_2^{CFB}(x_1,\ldots,x_{k-1},1-x_k,x_{k+1},\ldots,x_n), \tag{21}$$

である．

5 ファジィ積分としての性質

5.1 定数項と空集合のファジィ測度

$\mu(\emptyset)>0$ のとき，$\mu'(A)=\mu(A),\forall A\in 2^X\setminus\{\emptyset\},\mu'(\emptyset)=0,C=\mu(\emptyset)$ としたとき，拡張菅野積分の場合，

$$(\mathrm{ES})\int hd\mu=\max[(\mathrm{S})\int hd\mu',C] \tag{22}$$

となり，拡張菅野積分の場合のファジィ測度 $\mu(\emptyset)$ の意味は，定数項と解釈できる．しかし，LC 積分（拡張 Chouet 積分）の場合は異なる．一般に，

$$(\mathrm{LC})\int hd\mu=(\mathrm{C})\int hd\mu'+C \tag{23}$$

とはならない．

5.2 単調性

LC 積分でも，ファジィ測度が単調であれば，入出力間に単調性がある．すなわち，$A\supseteq B\rightarrow\mu(A)\geq\mu(B),\forall A,B\in 2^X$ で，$h(i)\geq h'(i),\forall i$ ならば，

$$(\mathrm{LC})\int hd\mu\geq(\mathrm{LC})\int h'd\mu \tag{24}$$

である．LC 積分の $h(k)$ の単調性は，次のようになる．

$$\mu(A\cup\{k\})\geq\mu(A),\forall A\in\{B\mid k\notin B,B\in 2^X\} \tag{25}$$

のとき，

$$\begin{aligned}&h'(i)=h(i),i=1,\ldots,k-1,k+1,\ldots,n,\\ &h(k)\geq h'(k)\end{aligned} \tag{26}$$

ならば，

$$(\mathrm{LC})\int hd\mu\geq(\mathrm{LC})\int h'd\mu \tag{27}$$

である．式 (25) と (26) の $\geq$ を $>$ にすれば，式 (27) での $>$ が成立する．また，式 (25) での不等号の向きを逆にすれば，式 (27) での不等号の向きを逆にした式が成立する．

5.3 加法性と線型関数

LC 積分を行う場合の一般化ファジィ測度の加法性は，次の式が成立するときと定義する．

$$\mu(A)=\sum_{i\in A}[\mu(\{i\})-\mu(\emptyset)]+\mu(\emptyset),\forall A\in 2^X \tag{28}$$

この条件が成立した場合の LC 積分は，次の線型の式で表現できる．

$$(\mathrm{LC})\int hd\mu=\sum_{i=1}^{n}[(\mu(\{i\})-\mu(\emptyset))h(i)]+\mu(\emptyset) \tag{29}$$

逆に，$f^L(x_1,\ldots,x_n):[0,1]^n \to [0,1]$ となる任意の線型の関数は，LC 積分で表現できる．すなわち，

$$\mu(A) = f^L(x_1,\ldots,x_n) \quad \text{where } x_i = 1, \text{ if } i \in A, \quad x_i = 0, \text{ if } i \notin A \tag{30}$$

ならば，$f^L(x_1,\ldots,x_n) = (\mathrm{LC})\int h d\mu, (h(i) = x_i \forall i)$ である．

5.4 基本性質

$h(1) = h(2) = \ldots = h(n) = 0$ の場合，

$$(\mathrm{LC})\int h d\mu = \mu(\emptyset) \tag{31}$$

であり，$h(1) = h(2) = \ldots = h(n) = 1$ の場合

$$(\mathrm{LC})\int h d\mu = \mu(X) \tag{32}$$

である．

5.5 入力値のアフィン変換

LC 積分の場合，Choquet 積分で成立する

$$(\mathrm{C})\int (ah+b) d\mu = a \times (\mathrm{C})\int h d\mu + b\mu(X) \tag{33}$$

$(a \geq 0, \mu(\emptyset) = 0)$ は，LC 積分では成立しない．

5.6 入力値の方向の逆転

CFB 関数の入力値の方向の逆転を LC^{AM} 積分に当てはめると，次のような性質となる．k 番目の要素について，

$$\mu'(A) = \begin{cases} \mu(A \setminus \{k\}) & \text{if } k \in A \\ \mu(A \cup \{k\}) & \text{if } k \notin A \end{cases} \tag{34}$$

とすると，

$$(LC^{AM})\int h' d\mu' = (LC^{AM})\int h d\mu \tag{35}$$

(ただし $h'(i) = h(i), i = 1,\ldots,k-1,k+1,\ldots n, h'(k) = 1 - h(k)$) となる．

6 まとめ

図 1 は，各関数間の関係をまとめたものである．

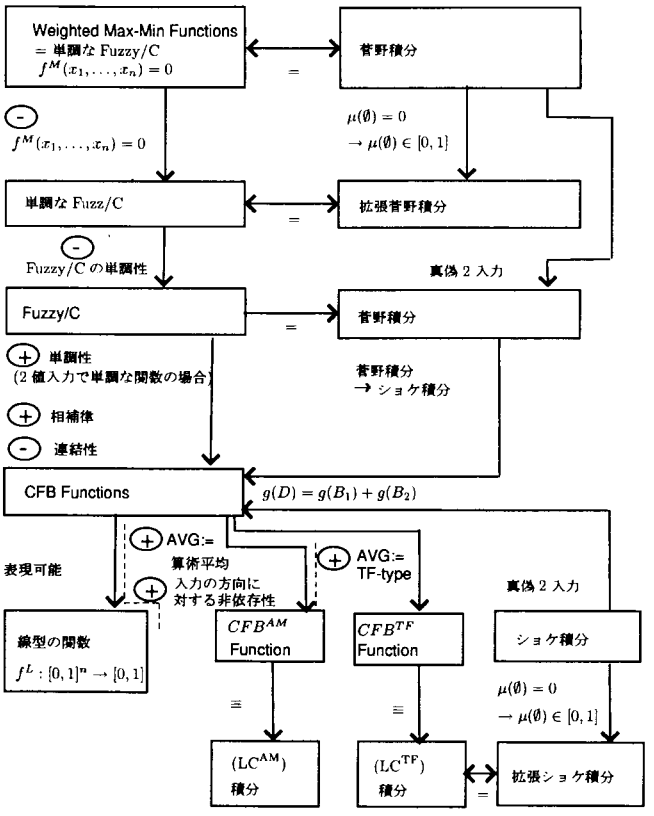


図 1: さまざまな論理関数，ファジィ積分間の関係

参考文献

[1] 菅野道夫，室伏俊明：「ファジィ測度 (講座ファジィ 3)」，日刊工業新聞社,1993.

[2] 向殿政男:「ファジィ論理 (講座ファジィ 4)」，日刊工業新聞社,1993.

[3] 荒木智行, 向殿政男: 定数係数をもったファジー論理関数について，電子情報通信学会論文誌,D-I, Vol.J81-D-I NO.9, pp1037-1047,1998.

[4] TAKAHAGI,E and ARAKI,T On fuzzy Integral representation in fuzzy switching functions with constants, Proc. VJFUZZY'98, pp.240-245,1998.

[5] TAKAHAGI,E: On Fuzzy integral representation in fuzzy switching functions,fuzzy rules and fuzzy control rules, IFSA'99, Vol.1, pp.289-293, Taipei,1999.

[6] 高萩栄一郎, ファジィ積分を利用した相補律を満したファジィ論理関数, 第 10 回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文, 日本ファジィ学会, pp.5-10,2000.

[7] J.L. Marichal, On Sugeno integral as an aggregation function. *Fuzzy Sets and Systems*, 114, 347–365, 2000.

[8] TAKAHAGI,E: Choquet Integral Type Fuzzy Switching Functions : Adjustment of Fuzzy Measures and Complementary Law, Proc. Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, pp.155-160,Vancouver,2001.

[9] 高萩栄一郎: 論理型ファジィ積分，第 17 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，日本ファジィ学会, 船橋,2001.

[10] 高萩栄一郎: Choquet 積分を用いたファジィ 3 値論理関数，第 6 回あいまいな気持ちにに挑むワークショップ講演論文集，日本ファジィ学会評価問題研究部会, 御殿場,2001.

[11] 高萩栄一郎: ファジィ論理関数と菅野積分の関係について，日本経営数学会誌, Vol.25, No.1, pp.28-40, 2003.

[問い合わせ先]

〒214-8580 神奈川県川崎市多摩区東三田 2-1-1
専修大学商学部　高萩 栄一郎
TEL:044-900-7988　FAX:044-900-7849
e-mail:takahagi@isc.senshu-u.ac.jp

駒宮の複素ファジィ論理とその応用

Komamiya's Complex Fuzzy Logic and its Applications

荒木智行
Tomoyuki ARAKI
広島工業大学　電子・光システム工学科
Hiroshima Institute of Technology

Abstract: Komamiya's complex fuzzy logic was proposed in 1950. However, in the field of fuzzy logic and multiple-valued logic , almost all researchers does not know the useful logic. This paper introduce it and proposes a new application of it.

Komamiya's complex fuzzy logic does not treat usual a complex number such as a+bi as truth value. From the point of view, Komamiya's complex fuzzy logic is different from complex-valued fuzzy logic. It is constructed to treat a [0,1]-valued proposition together with another complementary [0,1]-valued one using unit number k., which is a unit number of the Goto's quaternion, named hyperbola number.

１．はじめに

本報告では，駒宮により1950年に提案された複素命題論理学[2]を紹介し，それの新しい応用としてファジィDouble-rail論理[4]への応用を論じる．

近年，[0,1]値よりも，より表現能力の高い数である複素数をメンバーシップ値として扱う研究がなされている[1]．駒宮の複素命題論理学[2]（以降，本報告では複素ファジィ論理と記すことにする）は，これらの研究とは異なるアプローチをとっている．通常，複素数は二つの実数a,bを二つの単位$1,i$ $(i=\sqrt{-1})$で結合して$a+bi$として表現されるが，駒宮が真理値の表現として採用した表現は$a \vee k \times b$である．ここで，kは後藤により提案された四元数である双曲数[3]の単位の一つであり，純双曲数[3]に一対一対応を取ることができる数である．これを採用した理由は，iは２乗すると-1となり，負号を避けることができないが，kは$k^{2n}=1$，$k^{2n+1}=k$，$k \neq \pm 1$なる数であり，乗算に関して負号が入ってこないので，論理との親和性が良いからである[2]．

駒宮が複素ファジィ論理を構築した理由は，単に真理値の表現能力を高めた新しい論理の構築という数学的な興味だけではなく，図１に示すようなスイッチの接点が何れかの側に閉じているような双極回路を単位とする回路の構成法・解析法を確立するためであった．

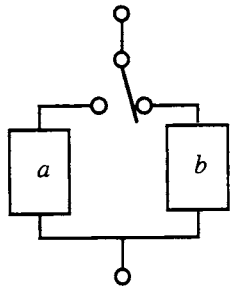


図１　$a \vee k \times b$に対応する双極回路

本報告では，駒宮により提案された複素ファジィ論理を，フォン・ノイマンにより提案され西野，江本，向殿[4]によりファジィ区間真理値を扱えるように拡張されたDouble-rail論理に対応した回路の合成に駒宮の論理を適用することを試みる．

２．複素ファジィ論理

２．１　基本定義・性質

二つの実命題$x,y \in [0,1]$の組を(x,y)と表す．このとき，論理演算を以下のように定義する．

［定義１］

（論理和）$(a_1,a_2) \vee (b_1,b_2) = (a_1 \vee b_1, a_2 \vee b_2)$

（論理積）$(a_1,a_2) \cdot (b_1,b_2) = (a_1 b_1 \vee a_2 b_2, a_1 b_2 \vee a_2 b_1)$

ただし，$xy = min(x,y)$であり，論理積記号$\cdot$は省略されることがある．

（否定）$\sim (a_1,a_2) = (\sim a_1, \sim a_2)$ ただし$\sim x = 1-x$．

（実命題否定）$\sim (a_1,a_2) = (\sim a_1, a_2)$

［定義２］二つの実命題の組(x,y)を$x \vee k \times y$と表現し，複素命題とよぶ．ここでxを実部，$k \times y$を双曲部という．

［性質１］Xを複素命題とする．X^nでｎ個のXの論理積を表現する．このとき，$X^{2m+1}=X$，$X^{2m}=X^2$．

２．１　複素ファジィ論理の満たす公理系

［性質２］複素ファジィ論理は以下のような公理を満たす．

（交換律）$X \cdot Y = Y \cdot X$，$X \vee Y = Y \vee X$

（結合律）$X \cdot (Y \cdot Z) = (X \cdot Y) \cdot Z$，
$X \vee (Y \vee Z) = (X \vee Y) \vee Z$

（分配律）$X \cdot (Y \vee Z) = X \cdot Y \vee X \cdot Z$

ただし，$X \vee (Y \cdot Z) = (X \vee Y) \cdot (X \vee Z)$は一般には成立しない．

性質２からわかるように，２値論理，通常の[0,1]値ファジィ論理の満たす多くの公理を複素ファジィ論理では満たさない．しかしながら，$X = x \vee k \times 0$のような双曲部が０であるような特殊な場合，$x \in \{0,1\}$であれば，２値論理のすべての公理系を，

$x \in [0,1]$であれば，通常の[0,1]値ファジィ論理のすべての公理系を満足する．その意味で，複素ファジィ論理は，２値論理，[0,1]値ファジィ論理をその特殊な場合として含む論理であると言える．

３．複素ファジィ論理方程式と表現能力

複素ファジィ論理は２．で示したとおり，矛盾律（$X \cdot \sim X = 0$），排中律（$X \vee \sim X = 1$）は一般に成立しない．以下に矛盾律を満たさない命題（即ち，$X \cdot \sim X = 1$となるような命題）が，複素ファジィ論理においては存在することを，複素ファジィ論理方程式を解くことにより示す．

［例１］ $X = x \vee k \times y$， $x, y \in \{0,1\}$とする．

$$X \cdot \sim X = 1 \leftrightarrow 1 \vee k \times 1$$

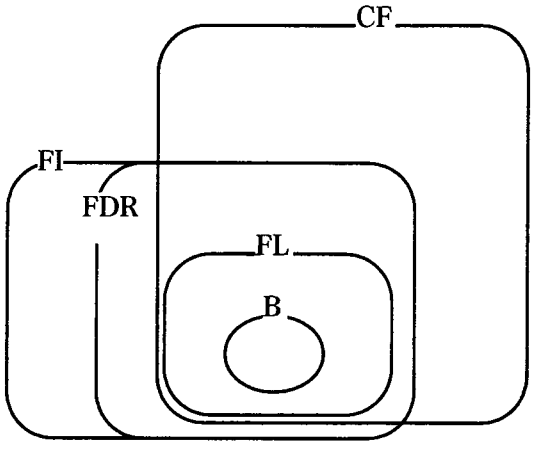
$$y \vee k \times y \leftrightarrow 1 \vee k \times 1$$

$$\therefore X = x \vee k \times 1 \quad (x\text{は任意})$$

例１に示したように，２値論理では存在し得ないような合成命題を表現することが可能である．また，$X \cdot \sim X = 1 \leftrightarrow 1 \vee k \times 1$に対応するような双極回路を構成可能となる．

４．他の論理系との関連

３．では複素ファジィ論理の表現能力の特徴に関して簡単な例を示した．ここでは表現能力という観点からみた，他の論理系との関係について述べる．



B: ２値論理
FL: [0,1]値ファジィ論理
FDR: ファジィDouble-rail論理
FI: ファジィ・インターバル論理
CF: 複素ファジィ論理

図２　他の論理系との関連

図２からわかるように，複素ファジィ論理は２値論理，[0,1]値ファジィ論理を，その特殊な場合として完全に包含しているが，ファジィDouble-rail論理[4]に関しては，その一部しか包含していない．これは，論理積（$\cdot$）の定義の違いから生じている．また，ファジィインターバル論理[5]に関しては，拡張区間真理値$[n,p]$において，$p < n$となるような場合を複素ファジィ論理は表現不可能である．

５．ファジィDouble-rail論理回路の複素ファジィ論理回路による合成

ファジィDouble-rail論理を用いて，推論などの論理プロセスを行うとする．そして，その最終段階で帰結として得られた区間真理値$[n,p]$（ただし$n \le p$）から，最終的に数値真理値nまたはpを結論とするような場合，これを双極回路で表現すると図３のようになる．

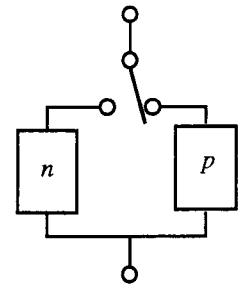


図３　区間真理値の双極回路

このような回路を合成することによって，ファジィDouble-rail論理による帰結をnまたはpとするような場合の複数の命題をファジィ複素論理により合成する回路を構成することが可能となる．また，それに対応した論理システムを合成可能となる．

６．むすび

複素ファジィ論理を紹介し，その新しい応用としてファジィDouble-rail論理を複素ファジィ論理により統合する手法を提案した．ファジィDouble-rail論理は完全系をなさないが，今回提案したような論理システムは，完全系を成すと考えられる．

参考文献

[1] Ramot, D., Milo, R., Friedman, M.,and Kandel, A., Complex fuzzy sets, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, vol. 10, no.2, pp.171-186(2002).

[2] 駒宮安男，複素命題論理学とその応用I，電気試験所，1950.

[3] 後藤以紀，双曲数の理論とその利用，電気試験所研究報告，第４４８号．

[4] 西野，江本，向殿，二線式ファジィ論理の演算の冗長性，第１０回インテリジェント・システムシンポジウム(FAN'00)論文集，pp.335-338(2000).

[5] 向殿，菊池，ファジィ・インターバル論理の提案，日本ファジィ学会誌，Vol. 2, No.2, pp. 97-110, 1990.

荒木智行
〒731-5193　広島県広島市佐伯区三宅2-1-1
広島工業大学　工学部　電子・光システム工学科
Tel&Fax: 082-921-4303　E-mail: araki@ieee.org

非同期ファジイ論理回路の性質について 3

Properties of asynchronous fuzzy logic circuit (3)

森 雄一郎
Yuichiro MORI

高知大学 理学部 数理情報科学科
Dept. of Information Science, Kochi UNIV.

Abstract : Presently, the hardware for fuzzy information processing is mostly a synchronous circuit based on binary logic. In this situation, it is suggested that a fuzzy logic circuit which can treat fuzzy value directly, but those circuits are also based on synchronous system. We cannot say it is complete fuzzification. In the near future, it is clear that the processing speed with a synchronous signal becomes a serious problem. Accordingly, we pay attention to an asynchronous circuit which does not require a synchronous signal. We propose an asynchronization of fuzzy logic circuit and we consider about its properties.

1 はじめに

既存の論理回路技術は主に2値論理に基づいており，その発展には目を見張るものがある．しかし，その応用範囲が高度化するにつれ，使い手である人間がより感覚的に理解できるような，あいまい性を含んだアナログ的情報処理を可能とする論理回路の必要性が高まってきている．

本研究は今までの研究が値に対して拡張，すなわちファジィ化であるのに対し，クロック信号のファジィ化，つまり時間に対してファジィ化というメスを入れることになる．人間がより感覚的に理解できるような，あいまい性を含んだアナログ的情報処理を実現するためには，必要不可欠なアプローチであると筆者は信じている．脳のような情報処理システムの構築を可能にする回路理論の研究開発が，この研究の目的である．

2 ファジイ論理回路の非同期化

非同期式回路においては，クロック信号が存在しないため，信号線自身がタイミング情報をもつ必要がある．2値データにおいては，1ビット情報を表現するのに2線式符号化が用いられる．2線式符号化の代表的なものは，2線2相方式，2線遷移方式，パリティ交番方式がある．本研究の流れにおいては，2線2相方式を用いたファジィ情報の符号化に対し，従来からの問題であったノイズとの判別を2線の相補関係を用いることにより解決し，ファジィ化に於ける有効な符号化を定義した．更に，基本論理演算回路を用い順序回路を構成し，対ノイズ性能を考慮したタイミングの取り方を定義し，更にそれを利用したファジィレジスタを試作し，基本的な動作を確認してきた.[3][4] 更に，パリティ交番方式に関してもその符号化をファジィへ拡張する試みを行い，その特徴を纏めた.[5] 今回は残る2線遷移方式のファジィ化を試みその特徴を纏める．

2.1 2線遷移方式のファジィ化

2値における2線遷移方式の2線符号化は，2線(*d1*,*d0*)において*d0*上の信号遷移が論理値0の発生を意味し，同様に，*d1*上の信号遷移が論理値1の発生を意味する．従って同じ信号線上での遷移0→1，1→0は同じ事を意味する．例えば初期状態を(0,0)とした場合，データ系列{1,0,0,1,0}は表1の様に符号化される．

表1 2線遷移方式の符号化例

		d1	*d0*
初期状態		0	0
データ系列	1	1	0
	0	1	1
	0	1	0
	1	0	0
	0	0	1

この方式が他の2方式と大きく違う点は，現在の状態だけでは復号化不可能であるという事である．符号化された信号が持つ論理値は，以前の状態に依存しており，遷移が信号の発生（到着）を意味するという事である．つまりこの方式は各信号線に論理値が割り当てられており，ファジィ化を検討するにあたり，他の2方式の様に自然な形で拡張する事は，手法の仕組み上困難であるといえる．しかし，仕組みの基本的な考え方のみを取り入れファジィ化を試みることは可能であり，その拡張方法は様々なものが考えられる．

今回は「信号遷移をもって論理値の発生（到着）を表す」という点に注目し，拡張を試みた．この手法のファジィ化を次の様に定義する．

1) 初期状態を (0,0) とする
2) 最初の相では論理値 n に対し
$d1=n, d0=1-n$ とする 【順相】
3) 次の相では $d1$ と $d0$ を逆転させ
$d1=1-n, d0=n$ とする 【逆相】
4) あとは順相，逆相を繰り返し信号搬送を行う

2値では $d1$ に論理値1，$d0$ に論理値0を対応させていたものを，ファジィ化したものでは $d1$ は論理値のプラス方向の成分を，$d0$ にはマイナス方向の成分，つまり $1-n$ を対応させ，これを順相とする．遷移をもって知らせるわけであるから，双方を反転させたものを次の相とし，これを逆相とする．これにより $d1,d0$ は常に相補関係をなす事となる．この関係成立をもって信号遷移を知り，その時の値は $d1,d0$ より求まる．但し，以前の系列変化を観測している必要があり，順相，逆相が判断できることが条件となる．

表2 各方式の符号化例

データ系列＼方式	2線2相	パリティ交番	2線遷移
初期状態	(0,0)	n/a	(0,0)
0.3	(0.3,0.7) 《稼働相》 (0,0) 《休止相》	(0.3,0.3) 《偶数相》	(0.3,0.7) 《順相》
0.8	(0.8,0.2) 《稼働相》 (0,0) 《休止相》	(0.8,0.2) 《奇数相》	(0.8,0.2) 《逆相》
0.6	(0.6,0.4) 《稼働相》 (0,0) 《休止相》	(0.6,0.6) 《偶数相》	(0.6,0.4) 《順相》

2.2 本方式の特徴・他方式との比較

この方式の大きな特徴は，相遷移情報をもって信号の到着（クロック情報）を知ることが出来るが，現在の値だけでは復号化は出来ないと言う点にある．これと引き換えに2線2相方式で必要であった休止相の必要はない．対ノイズ性能に関しては，常に相補関係にあるので，他の2方式同様問題はない．

本方式は符号化・復号化に際し相毎に別の関数を用いているが，パリティ交番方式のように2種類の関数を用意しているわけではなく，基本的には2線2相方式と同様の関数を順相，逆相で入れ換えて用いているので，2線2相方式の持つシンプルさを比較的そのまま継承してるといえる．3方式の特徴を表3に纏める．

表3 ファジィ化された各方式の特徴

項目＼方式	対ノイズ性能（相補関係）	クロック情報	符号復号化関数の複雑さ	遷移（相）判別不能点
2線2相	○	要休止相	○（シンプル）	○（なし）
パリティ交番	○	○（含む）	×（2種類）	△（0.5）
2線遷移	○	○（含む）	△（基本的には1つ）	×（0.5） ※その地点の情報だけでは相判別不可能

以上より，今回注目した2線遷移方式は，パリティ交番方式の持つクロック情報を含むという特徴を備えつつも，2線2相方式が持つ特徴である符号化関数のシンプルさ（図1参照）を備えていることが明らかとなった．しかしその一方，他の2方式にはない，その地点の情報だけでは相が判別できず一意に値が求まらない，言い換えれば，時系列情報を管理する必要があるという拡張前からの性質も併せ持っている．

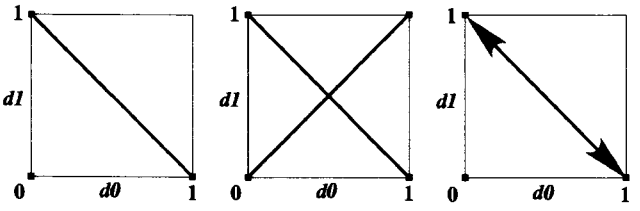


図1 情報空間における符号化関数の比較

3 今後の課題

これまでの研究により，非同期回路における代表的な3手法についてその拡張を行い，各方式とも興味深い特徴を持つことが明らかとなってきた．これらの結果をを踏まえ，ファジィへ拡張する場合の一般的な手法を纏めてゆきたい．

参考文献

[1] 南谷崇，非同期式プロセッサ，情報処理学会誌，Vol.34，No.1，pp72-79，1993
[2] 南谷崇，論理回路の設計技法[V]，電子情報通信学会誌，Vol.67，No.3，pp.301-307，1984.
[3] 森雄一郎・向殿政男，ファジィ論理回路の非同期化への試み，第15回ファジィシステムシンポジウム，pp533-534，1999/6
[4] 森雄一郎・向殿政男，非同期ファジィ論理回路の性質について，第10回インテリジェント・システム・シンポジウム(FAN)，pp355-358，2000/10
[5] 森雄一郎・向殿政男，非同期ファジィ論理回路の性質について 2，第17回ファジィシステムシンポジウム，pp571-572，2001/9
[6] 西野篤史，江本全志，向殿政男，二線式ファジィ論理の演算の冗長性，第10回インテリジェント・システム・シンポジウム(FAN)，pp335-338，2000/10

連絡先

〒780-8520
高知県高知市曙町 2-5-1
高知大学 理学部 数理情報科学科
森 雄一郎
Tel : 088-844-8340
Fax : 088-844-8361
E-mail : ymori@is.kochi-u.ac.jp

障害物回避ファジィロボットの進化論的手法による メンバーシップ関数およびルールの自動生成

Automatic generation of membership functions and rules for obstacle avoidance Fuzzy robots based on evolutionary computation

村井　保之* 松村　幸輝** 巽　久行*** 徳増　眞司*
Yasuyuki Murai Koki Matsumura Hisayuki Tatsumi Shinji Tokumasu
*神奈川工科大学 **鳥取大学 ***筑波技術短期大学
Kanagawa Institute of Technology Tottori University Tsukuba College of Technology

Abstract: This paper discusses a new obstacle avoidance model based on fuzzy control. The membership function and the rule are a very important factor to raise the accuracy of fuzzy control. So, it proposes the method to create the membership function and the rule, and make it more proper for the control. It can be created and tuned up in a systematic and autonomous way by applying genetic programming (GP) and genetic algorithm (GA). The utility of the method was examined by the computer simulation and the real machine running experiment.

1. まえがき

環境から得られた情報に基づき自律的に障害物回避が行えるロボットの構築について検討している．これを実現する方法として，ファジィ制御が有効であると考えられる．この場合，良好な制御を行うためには適切なメンバーシップ関数およびルールの設定とチューニングがきわめて重要となる[1]．この観点から，筆者らは，進化論的手法の遺伝的プログラミングと遺伝的アルゴリズム[2]を用いてメンバーシップ関数およびルールを自動的に生成する方法を提案する．

この方法を用いれば，メンバーシップ関数はラベルのみ設定すればよく，関数自体を設定する必要はない．ルールに関しては入力メンバーシップ関数を必要なだけ単純に組合せた，前件部だけ考えればよい．この方法をロボットの制御に用いた走行シミュレーションによる学習および，実機による走行実験を行いその有用性について検討する．

2. ロボットのモデル

シミュレーションで用いるロボットは，実機による走行実験で用いる実験用小型ロボット Khepera を考慮し，形状は円形，移動は左右に車輪があるものと考え，方向転換は左右の車輪を逆転することで，機体の中心を軸に回転し方向を変えることができるものとする．ロボットは前方に左右 2 個づつ計 4 個のセンサー（Khepera は 6）を持ち，障害物との距離を 0～39（Khepera は 0～1023）の値で返すものとする．また，反応したセンサーのうち最大の値を返すセンサーの近くに障害物があると考えられるので，センサーの位置から障害物がロボットの右にあるのか左にあるのかという相対的な位置の検出も可能とする．ロボットは 1 ステップづつ動作し，1 ステップの

表 1　作業空間と作業条件

パラメータ	設定値
作業空間の大きさ	625×481
ロボットの大きさ	半径 57
障害物の大きさ	小　49×49 中 145×49 大 193×49
ロボットスタート位置	40, 184

単位はピクセル

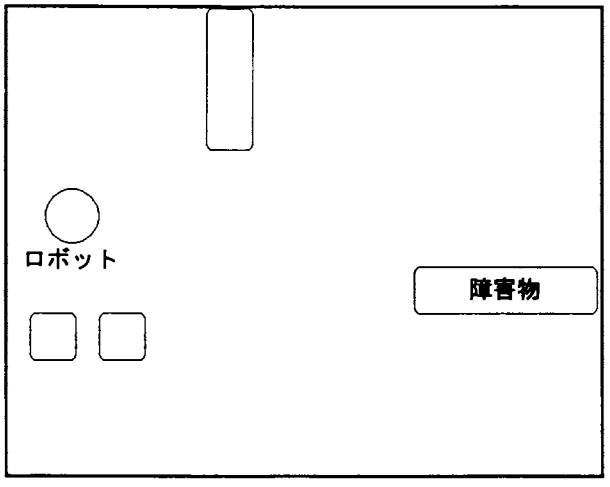


図 1　作業空間の例

動作で，センサーからの情報に基づきファジィで求められた角度回転（センサーの入力が無い場合は回転しない）し，設定した距離(5 ピクセル)移動する．表１に作業空間の大きさ，図１に作業空間の例を示す．図中の円がロボットで，4 つの四角は障害物である．ロボットは，左端中央のスタート位置より，空間内に配置された障害物や壁との接触を回避しながら，出来るだけ広い範囲を移動することを目的とする．

3. ファジィによるロボットの制御

ロボット制御のため次のようにメンバーシップ関数とルールを設定する．センサーからの入力値とセンサーの位置を入力メンバーシップ関数とし，車輪の回転方向と回転量を出力メンバーシップ関数とすると，ロボットの制御に用いるメンバーシップ関数は，

(1) 入力関数１：ロボットと障害物との距離
（近い，遠い）

(2) 入力関数２：ロボットと障害物との相対位置
（左，やや左，やや右，右）

(3) 出力関数：ロボットの回転方向
（左，中央，右）

のラベル設定とする．具体的な関数については，後述の遺伝的プログラミングを用いて自動的に生成する．ルールは，上記メンバーシップ関数より，

IF 距離=近い and 相対位置=左 then 回転方向
IF 距離=近い and 相対位置=やや左 then 回転方向
IF 距離=近い and 相対位置=やや右 then 回転方向
IF 距離=近い and 相対位置=右 then 回転方向
IF 距離=遠い and 相対位置=左 then 回転方向
IF 距離=遠い and 相対位置=やや左 then 回転方向
IF 距離=遠い and 相対位置=やや右 then 回転方向
IF 距離=遠い and 相対位置=右 then 回転方向

の８ルールとする．前件部については入力メンバーシップ関数の全ての組合せを用いた．

後件部（回転方向）については，後述する遺伝的アルゴリズムを用いてロボットの制御に最適な回転方向（左，中央，右のいずれか）を求める．

このメンバーシップ関数とルールを用いてロボットが障害物を回避しながら空間内を出来るだけ広範囲に移動するように制御する．

4. 進化論的手法によるメンバーシップ関数とルールの生成

4.1. 遺伝的プログラミングによるメンバーシップ関数の生成

メンバーシップ関数は，遺伝的プログラミングを用いて生成する[1]．遺伝的プログラミングでは，遺伝子型の遺伝的アルゴリズムを拡張し，関数を木構造で表現した個体を用い，表現型という概念を導入する．ここでは，遺伝的プログラミングの基本的な表現方法をそのまま適用し，数式で構成した木構造をメンバーシップ関数とし，交叉，突然変異などの遺伝操作を行い，メンバーシップ関数である個体の進化を試みる．個体は，四則演算子を非終端ノードとし，定数または変数を終端ノードとして構成する．なお，入力メンバーシップ関数 6，出力メンバーシップ関数 3 の合わせて 9 の関数を 1 個体とし，遺伝操作および適応度の計算を行う．

4.2. 遺伝的アルゴリズムによるルールの生成

前述のルール後件部を遺伝的アルゴリズムを用いて生成する．ルールは，条件を表す前件部と出力を表すの後件部からなる．前件部は入力メンバーシップ関数の組合せ，後件部は出力メンバーシップ関数で構成される．

後件部については，出力関数の中からロボットを最適に制御するために必要なものを設定する．そこで，出力メンバーシップ関数の中から最適なものを選択するために，遺伝的アルゴリズムを用いる．そのための遺伝子型として，ルール前件部に対応する出力関数のラベルの組を遺伝子型（図２）として用い，遺伝操作をすることで最適なルールを生成する．

L	M	R	R	M	L	M	M

L:左, M:中央, R:右(出力関数ラベル)

図２　遺伝子型の例

4.3. 遺伝操作の条件と適応度の計算

メンバーシップ関数およびルール生成のための遺伝操作の条件は，個体数 20，交叉率 20%，突然変異率 20%，遺伝操作回数 30 回とした．

適応度はメンバーシップ関数およびルール生成で同じものを用いる．

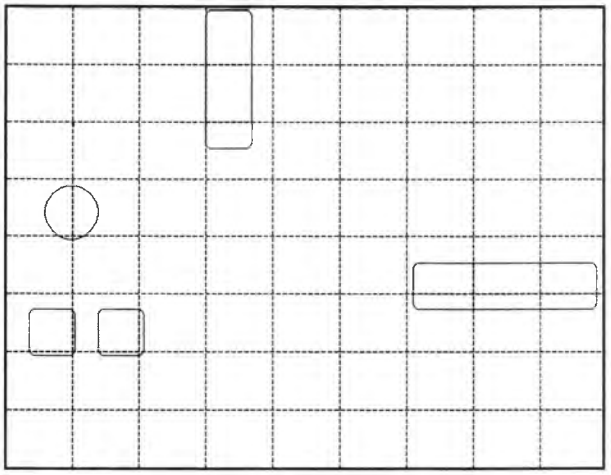


図３　適応度計算のための区画

まず，生成されたメンバーシップ関数とルールを使いロボットを走行させる．ロボットが走行する作業空間は，ロボットの大きさで格子状に区画が設定されており（図３），それぞれの区画にはポイントが与えられている．ロボットが区画を通過すると，ポイントが適応度に加算される．同時に通過した区画のポイントを 0 とする．これは，ロボットの行動目的が広範囲を移動することなので，同じところを周回した場合に適応度を高くしないためである．ロボットが障害物に接触した場合には，ペナルティとして適応度を下げるとともに走行を中止する．ロボットが障害物に接触せずに移動し続ける場合，1000 ステップ（1 ステップは障害物の検出と 1 単位の走行）で走行を中止する．また，初期段階でロボットが同じ位置を周回しているような場合，それ以上の適応度向上が望めないので，100 ステップ走行して適応度が一定値以上に上がらない場合も走行を中止する．

5.　実験

5.1.　学習の過程とシミュレーションの結果

実験は前述の遺伝操作条件で行い，学習の過程は世代および個体毎にその走行経路を記録した．図４は，学習過程の一部を示した物である．図中の実線がロボットの走行経路で，点線は検出された障害物を表す．一連の図より，遺伝操作が進むにつれ，適切なメンバーシップ関数とルールが生成され，ロボットが目的動作を獲得していく様子が観察できる．

図４(a)は，第 1 世代の個体番号 3 の走行経路で，スタート位置から右下に移動し，すぐに障害物に接触し終了している．図４(b)は，第 6 世代

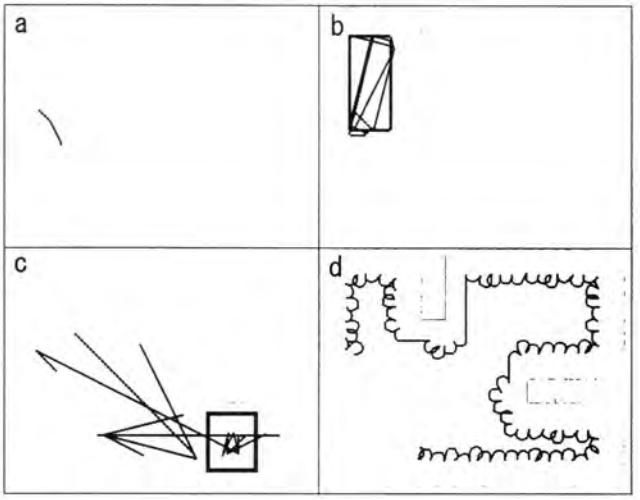


図４　学習の過程

の個体番号 17 の走行経路で，障害物は回避しているが，スタート位置周辺を周回しており，広範囲の移動は実現していない．図４(c)は，第 22 世代の個体番号 11 の走行経路で，図４(b)の個体より広範囲に移動しており，学習が進んでいる様子が見られる．しかし，図の右下（四角で囲んだ範囲）のように，同じ位置で停滞する場面もみられた．図４(d)は，第 30 世代（最終世代）の個体番号 1(適応度が最高)の走行経路で，円を描きながら右回りに壁に沿って広範囲を移動しており，目的とする動作が獲得されたと考えられる．さらに，適応度が最高の個体を用い，障害物の位置を移動した実験を行った．その結果，障害物の位置がかわった場合でも，ロボットは障害物を回避し，広範囲に移動する結果が得られた．

5.2.　実機による実験

前述の原理に基づき生成されたメンバーシップ関数とルールを用いて，実機による走行実験を行った．実験には小型実験用ロボット Khepera を用いた．ロボットの作業空間は，縦 30cm，横 50cm とし，周囲を高さ 3cm の壁で囲んである．この中に障害物（長さ 18cm，幅 1.5cm，高さ 3cm）を 2 つ配置した（図５）．

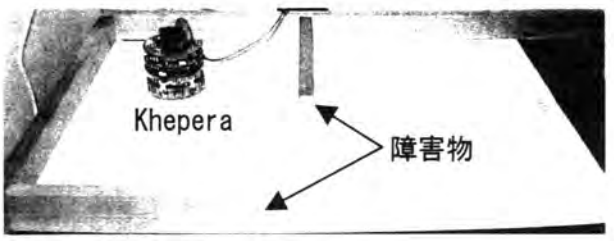


図５　Khepera と作業空間

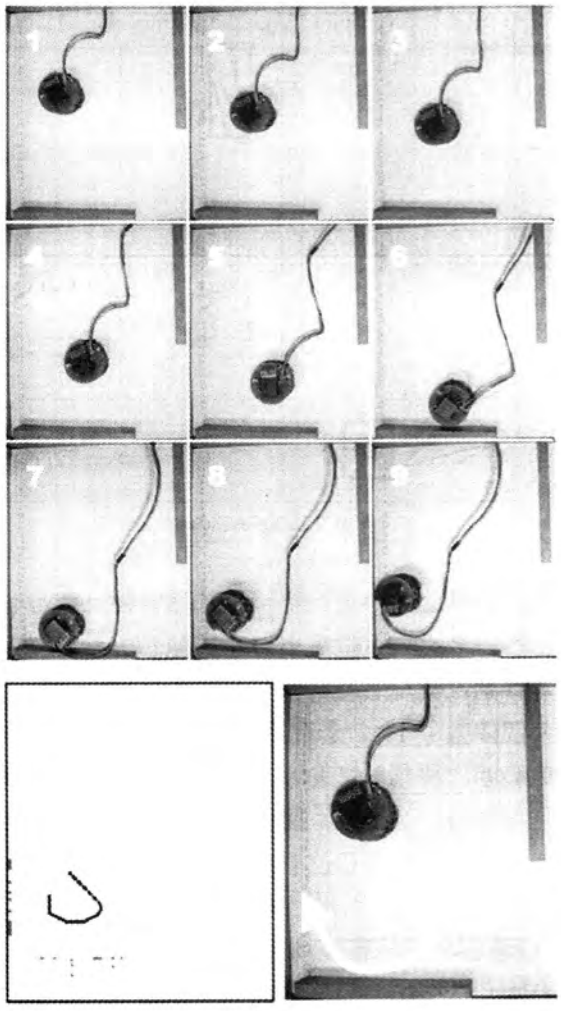


図6　実機による走行実験の様子

Khepera には，前方に 6 つの赤外線センサーがあり，障害物との距離を 0～1023 の値で得られるが，実験ではシミュレーションの学習結果に対応させるために，センサーは 4 つを使用し，値は 0～39 に変換し用いた．

Khepera は，RS232C（通信速度 38400bps）でパーソナルコンピュータに接続し制御した．そのため，通信時間および，Khepera の動作完了を待つためのプログラム停止時間（数秒程度）が必要となり，低速での動作となった．また，1 ステップの移動量は 1cm とした．

図 6 に，走行の様子を示す．同図上（1～9）は走行開始から 40 ステップまでのロボットの動きを，約 4 ステップ間隔で，撮影したものである．図からわかるように，障害物（右端と下）を回避しながら，作業空間を移動している様子が観察された．しかし，図上(7)では，Khepera は障害物に接触してしまった．これは，今回実験に用いたプログラムは，Khepera が 1 ステップ(1cm)走行時，プログラムを数秒間停止して，Khepera の動作が完了するのを待っており，その間センサーのチェックが行えないためである．

図 6 下(左)は，同時に行ったシミュレーションの結果である．この図から，実機はシミュレーションと同様の動きを実現しており，シミュレーションによる学習で得られたメンバーシップ関数とルールが実機の走行にも有効であることが確認できた．

6. おわりに

実験の結果，進化論的手法を用いて生成されたメンバーシップ関数およびルールによるファジィ制御がロボットの制御に有効であることがわかった．また，シミュレーションにより生成されたメンバーシップ関数とルールが，そのまま実機の制御にも有効であることもわかった．

今後の課題として，

(1) より複雑な作業条件や難易度の高い目標での実験，

(2) 移動障害物への対応，

(3) Khepera にプログラムをダウンロードしての実行

などが考えられる．

参考文献

[1]松村幸輝，村井保之，”遺伝的プログラミングに基づくファジーロボットの障害物回避モデル，”信学論(A),vol.J83-A,no.12,pp.1539-1551(2000).

[2]J. Koza,Genetic Programming, MIT Press(1992).

[3]伊庭斉志,遺伝的プログラミング,東京電機大学出版局(1996).

連絡先
〒243-0292
神奈川県厚木市下荻野 1030
神奈川工科大学 工学部 情報工学科
村井保之
TEL:046-291-3175
FAX:046-242-8490
E-mail: murai@tok.ic.kanagawa-it.ac.jp

ファジィ言語真理値の代数系について

菊池 浩明
Hiroaki Kikuchi
東海大学情報メディア学科
Dept. of Information Media Technology, Tokai University
kikn@ep.u-tokai.ac.jp

Abstract: This paper studies algebraic properties of fuzzy-valued logic function. A fuzzy-valued logic function is of represented with logic formula consisting of unit (2), zero (0), negation ($\neg$), disjunction ($\sqcup$), conjunction ($\wedge$), and variables which takes any element of fuzzy set defined over $[0,1]$.

1 Introduction

A fuzzy truth value is a fuzzy set defined over $[0,1]$, allowing an expressive degree of truth such as unknown, more or less true, or contradiction. Since L. A. Zadeh proposed it, several attempts have been made for clarify the properties of Mizumoto, et al. showed that the set of convex and normal linguistic truth values with logical operations $\wedge$, $\vee$, and $\neg$ satisfy a de Morgan algebra in [3]. Mukaidono pointed out that α-cut of any convex linguistic truth value results in a closed interval on $[0,1]$ and clarified some fundamental properties of linguistic truth values [2].

The first attempt to non-convex fuzzy truth value was made by [5], which showed that an arbitrary subset of fuzzy truth value including non-convex set is a bisemilattice, an extended algebraic system from lattice. A bisemilattice is an algebra with two binary operations $\sqcup$ and $\wedge$ defined over a set S such that $(S,\sqcup)$ and $(S,\wedge)$ are semilattices in which the absorption laws do not hold. Moreover, it has been proved that a bisemilattice of fuzzy truth value satisfies the de Morgan's laws, but it fails the distributive laws.

(*Problem*) Given two logic formulae F and G, we wish to decide if F and G are identical in the sense of fuzzy truth value, i.e., $F(x) = G(x)$ for any x in a set of fuzzy truth value with non-convex truth value.

The largest difficulty with this problem is a failure of the distributive laws with non-convex truth value. For instance, an expansion of logic formula $(A \sqcup B) \wedge (C \sqcup D)$ into $A \wedge C \sqcup A \wedge D \sqcup B \wedge C \sqcup B \wedge D$ does not hold any more, and thus the canonical disjunctive form can not be transformed to the conjunctive form.

2 Preliminary

2.1 Fuzzy Truth Value and Bisemilattice

A *linguistic truth value* or *fuzzy truth value* is a truth value specified by a fuzzy subset over $V = [0,1]$. The whole set of linguistic truth value is denoted by V_L, namely, $V_L = \{A \mid \mu_A : V \to V\}$. We denote by V_I to mean a set of interval truth values. With a set of interval truth value, we define *multiple-interval* truth value, denoted by V_M, in which non-convex fuzzy sets are allowed to use.

Let A and B be linguistic truth values. According to the extension principle, logical operations, $A \sqcup B$, $A \wedge B$ and $\neg A$ are defined as follows. For any $x \in V$, $\mu_{A \sqcup B}(z) = \sup_{z=\max(a,b), a,b \in V} \min(\mu_A(a), \mu_B(b))$, $\mu_{A \wedge B}(z) = \sup_{z=\min(a,b), a,b \in V} \min(\mu_A(a), \mu_B(b))$, $\mu_{\neg A}(x) = \mu_A(1-x)$. Especially, if A and B are multiple-interval truth values, we have

$$A \sqcup B = \bigcup_{a \in A, b \in B} a \vee b,$$
$$A \wedge B = \bigcup_{a \in A, b \in B} ab,$$

where an upper letter shows multiple-interval and a lower letter is interval truth value. Note the difference of logical operations.

Let S be a subset of V_L. A partial order $\sqsupseteq$ is defined by $A \sqsupseteq B$ iff $A = A \sqcup B$. A partially ordered set $(S, \sqsupseteq)$ is an *upper semilattice* if every pair of elements of S has a least upper bound $\mathrm{lub}_{\sqsupseteq}$. A partially ordered set is *bounded* if it has a *unit* $1_{\sqsupseteq}$ and a *zero* $0_{\sqsupseteq}$, i.e., $A \sqcup 1_{\sqsupseteq} = 1_{\sqsupseteq}$ for any A in S, and $A \sqcup 0_{\sqsupseteq} = A$ for any A in S.

A partial ordered set $(S, \sqcup, \wedge)$ is *bisemilattice* if $(S, \sqcup)$ and $(S, \wedge)$ are semilattices. A bisemilattice satisfies L1-L3 and L1'-L3' in Table 1.

A bisemilattice is a *lattice* if additionally the absorption laws (L8 and L8') hold: Then, the lattice satisfies $A \wedge B = A \sqcap B$.

2.2 A Closed Subset of V_L

Consider a subset of ternary truth value $S_7 = \{0, 1, 2, 01, 12, 012, 02\}$, letting $0 = \{[0,0]\}$, $1 = \{[.5,.5]\}$, $2 = \{[1,1]\}$ and $12 = 1 \cup 2 = \{[.5,.5],[1,1]\}$ and so on. S_7 has the non-convex element $02 =$

Table 1: List of Laws in de Morgan algebra

L1	$A \sqcup A = A$	L1'	$A \wedge A = A$
L2	$A \sqcup B = B \sqcup A$	L2'	$A \wedge B = B \wedge A$
L3	$A \sqcup (B \sqcup C) = (A \sqcup B) \sqcup C$		
L3'	$A \wedge (B \wedge C) = (A \wedge B) \wedge C$		
L4	$A \sqcup 1 = 1$	L4'	$A \wedge 0 = 0$
L5	$A \sqcup 0 = A$	L5'	$A \wedge 1 = A$
L6	$\neg\neg A = A$		
L7	$\neg(A \sqcup B) = (\neg A) \wedge (\neg B)$		
L8	$A \sqcup (A \wedge B) = A$	L8'	$A \wedge (A \sqcup B) = A$
L9	$A \sqcup (B \wedge C) = (A \sqcup B) \wedge (A \sqcup C)$		
L9'	$A \wedge (B \sqcup C) = (A \wedge B) \sqcup (A \wedge C)$		

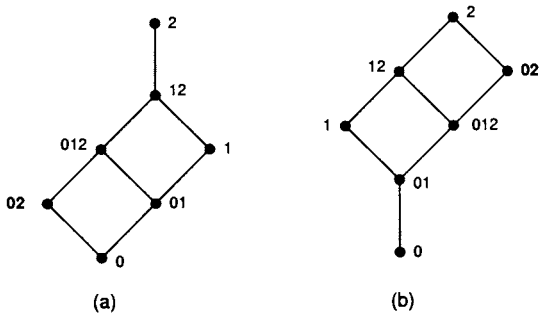


Figure 1: Bisemilattice $(S_7, \sqcup, \wedge, \neg)$; (a) $\sqsupseteq$ and (b) $\leq$. The non-convex element 02 violates the absorption laws (L8).

$\{[0,0],[1,1]\}$ for which the absorption law (L8, L8')

$$02 \sqcup (02 \wedge 1) = 12 \neq 02$$

fails. Figure 1 shows the inconsistent operations defined over S_7.

3 Fuzzy-Valued Logic Function

3.1 One-Variable S_7-Valued Logic Function

Let us consider fuzzy-valued logic function that is represented with logic formula consisting of unit (2), zero (0), negation ($\neg$), disjunction ($\sqcup$) and conjunction ($\wedge$). We have six one-variable fuzzy-valued logic function in Table 2.

The number of distinct logic formulas in fuzzy truth

Table 2: One-variable Fuzzy-valued logic functions

	0	1	2	01	12	012	02
zero 0	0	0	0	0	0	0	0
unit 2	2	2	2	2	2	2	2
x	0	1	2	01	12	012	02
$\neg x$	2	1	0	12	01	012	02
$x \sqcup \neg x$	2	1	2	12	12	012	02
$x \wedge \neg x$	0	1	0	01	01	012	02

Table 3: Number of Functions in $B3$-valued, interval-valued, and fuzzy-valued logic function

n	0	1	2	3
$B3$-valued	2	6	84	43,918
interval-valued	2	6	168	7,828,354
fuzzy-valued	2	6	> 168	?

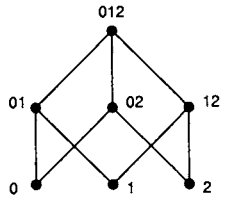


Figure 2: A partial ordered set $(S_7, \succeq)$

value is not clarified except for small n shown in Table 3.

3.2 Monotonicity

Definition 3.1 Let A and B be fuzzy truth value defined by membership function $\mu_A()$ and $\mu_B()$. We define a partial order $A \succeq B$ if and only if $\mu_A(x) \geq \mu_B(x)$ for all $x \in [0,1]$.

With the definition, the subset S_7 is partially ordered as shown in Figure 2.

Theorem 3.1 Let $\boldsymbol{a}$ and $\boldsymbol{b}$ be element of S_7, and F be logic formula consisting of $\sqcup, \wedge$ and $\neg$. Then,

$$\boldsymbol{a} \succeq \boldsymbol{b} \Rightarrow F(\boldsymbol{a}) \succeq F(\boldsymbol{b})$$

Theorem 3.2 Let F be logic foruma. Then, we have

$$\begin{aligned} \boldsymbol{a} \in V_2 &\Rightarrow F(\boldsymbol{a}) \in V_2, \\ \boldsymbol{a} \in V_3 &\Rightarrow F(\boldsymbol{a}) \in V_3, \\ \boldsymbol{a} \in V_C &\Rightarrow F(\boldsymbol{a}) \in V_C, \end{aligned}$$

where $V_2 = \{0,2\}, V_3 = \{0,1,2\}$ and V_C is a set of all convex elements in S_7.

3.3 Some Properties

As we have shown before, a bilattice of fuzzy-valued logic function does not satisfy the distributive laws. However, the equation does hold with the following limited variables.

Proposition 3.1

$$\begin{aligned} x \sqcup y \wedge x \sqcup \neg y &= x \sqcup (y \wedge \neg y) \\ x \wedge y \sqcup x \wedge \neg y &= x \wedge (y \sqcup \neg y) \end{aligned}$$

4 Conclusion

We have studied some properties of fuzzy-valued logic function that takes non-convex truth value. The future issues include

- fuzzy-valued logic function with arbitrary constant of S_7,
- exact number of logic functions,
- canonical form for fuzzy-valued logic function,
- essential elements in S_7 necessary for testing two logic formulas,
- extension of the domain from S_7 to V_L.

References

[1] L. A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning (I), (II), (III)," *Information Sciences*, Vol.8, pp.199-249, pp.301-357, Vol. 9, pp.43-80, 1975.

[2] M. Mukaidono, *Fuzzy Logic*, Kouza Fuzzy No.4, Nikkan Kougyou Pub., 1992.

[3] M.Mizumoto and K.Tanaka, "Some properties of fuzzy sets of type 2," *Information and Control*, Vol.31, pp.312-340, 1976.

[4] M. Emoto and M. Mukaidono, "De Moragan Algebra and Kleene Algebra in Fuzzy Logic," *Proceedings of Vietnam-Japan Bilateral Symposium on Fuzzy Systems and Applications VJFUZZY'98*, pp.255-260, 1998.

[5] H. Kikuchi and N. Takagi, de Morgan Bisemilattice of Fuzzy Truth Value, IEEE *ISMVL 2002*, 2002.

Contact Person

Hiroaki Kikuchi. Dept. of Information Media Technology, School of Information Technology and Electronics, Tokai University. 1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan. Tel: +81-463-58-1211 Ext. 4164 (direct in 0463-50-2139), Fax: +81-463-59-4014, Email: kikn@ep.u-tokai.ac.jp.

相対ファジィ集合

Relative Fuzzy Set

江本 全志 Masashi Emoto
インタン ローリー Rolly Intan
向殿 政男 Masao Mukaidono
明治大学
Meiji University

Abstract

We decide fuzzy sets by individual subjectivity. When we decide fuzzy sets, knowledge which the individual has experienced is important factor. For example, if those who looked only people who are about 200cm tall look at a person who is 180cm tall, they do not think that he is tall. Also, if those who looked only people who are about 150cm tall look at a person who is 180cm tall, they think that he is tall. By the people which each has met, this judgment changes. In this paper, we propose relative fuzzy set which is a fuzzy set representing the knowledge which a person have experienced. And we show its outline.

1 はじめに

ファジィ集合のメンバーシップ関数は，一般的には主観的に決められている。メンバーシップ関数の数値を決めるファクタとして、メンバーシップ関数を定義している人がファジィ集合の台集合の要素に関して，どのくらい詳しく知っている（経験している）かが大きく影響していると思われる。本論文では、ある人が主観的に定義したファジィ集合のメンバーシップ関数から，その人が台集合の要素についてどのくらい詳しいか（経験しているか）をファジィ集合として抽出することを考える。本論文では、この詳しさ (経験の度合い) を表すファジィ集合を相対ファジィ集合と呼ぶことにし、相対ファジィ集合とその活用について議論する。

2 相対ファジィ集合

ここで相対とは、自分から見た相手との関係のことを意味する．例えば、２人の人がいて、１人は速度60km/hの電車に乗っていて、もう１人は速度200km/hの新幹線に乗っているとする。これら２人が、速度100km/hの急行電車を見たとき、速度60km/hの電車に乗っている人はこの急行電車を速いと感じ（図１）、速度200km/hの新幹線に乗っている人は遅いと感じる（図２）。この例での「速い」や「遅い」は、「速度60km/hの電車から見た速度100km/hの急行電車の評価」と「速度200km/hの新幹線から見た速度100km/hの急行電車の評価」を表している。

ファジィ集合は人間の使う言葉の意味のあいまいさを表現する時に使用され，同じ言葉でも人それぞれ違うファジィ集合のメンバーシップ関数が定義される。人それぞれファジィ集合が異なる１つの要因として、人間が持つ経験や知識に基づいて，台集合の各要素に対する所属度を評価しているからと考えられる。

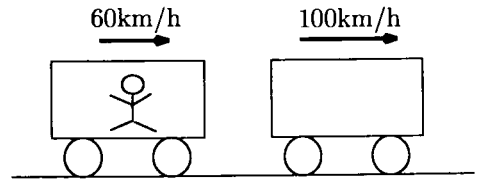


図 1: 電車から急行電車を見た場合

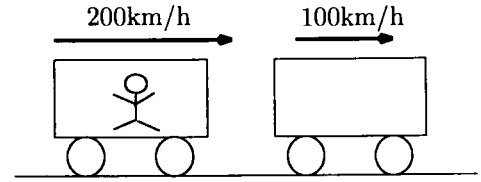


図 2: 新幹線から急行電車を見た場合

例えば、190cm前後の背の高さの人達としか出会ったことがない人は、180cmの人を見ても背が高いとはあまり思わない。（図３）また、150cm前後の人達としか出会ったことがない人は、180cmの人を見たらとても背が高いと思う。（図４）２人の「背が高い」というファジィ集合のメンバーシップ関数の違いは、これまで出会った人，すなわちその人のこれまでの経験が影響していると言える。

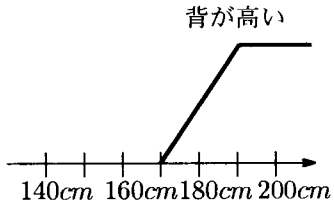


図 3: 身長 190cm 前後の人達のみと出会っている人

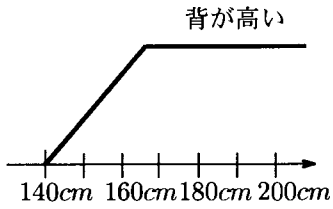


図 4: 身長 150cm 前後の人達のみと出会っている人

経験の深さ，又は詳しさの度合いを表すファジィ集合を，本論文では相対ファジィ集合と呼ぶことにする。前記の例において、「190cm 前後の人達」や「150cm 前後の人達」が相対ファジィ集合にあたる。

ある人物 x の言葉 f のファジィ集合を f^x とする。

定義 1 人物 x のファジィ集合 f^x に対する相対ファジィ集合

RF_{f^x} を人物 x のファジィ集合 f^x に対する相対ファジィ集合とし、次のように定義する。$u_i(i=1,2,\cdots,n)$ は対象とする。

$$RF_{f^x} = \{\mu_{RF_{f^x}}(u_i)/u_i \mid i=1,2,\cdots,n\} \quad (1)$$

例 1 ファジィ集合に対する相対ファジィ集合

$u_1, u_2, \cdots, u_7$ を人とし、それぞれの人が表 1 に示す身長であるとする。図 5 のファジィ集合を A さんの「背が高い」というファジィ集合とする。この時，表 1 で示すものが A さんの経験の度合を表すファジィ集合（相対ファジィ集合の度合）と考える事が出来るかもしれない．すなわち，A さんの相対ファジィ集合 $RF_{\text{背が高い}^A}$ は次のようになると仮定することが出来る。なぜならば、背が高いというファジィ集合のメンバーシップ関数が斜めになっている部分（図 5 では 150cm 位から 170cm 位までの範囲）で，このファジィ集合に対する相対ファジィ集合のメンバーシップ関数の値は高いと見なす事ができるからである．例えば，その範囲の上限と下限にあたる要素に対しては所属の度合は 1、間にある要素に対しては、0 から 1 の間の値を与えることが出来よう。このように考える理由としては、メンバーシップ関数を定義する時，台集合の要素の中から，要素を順番に並べ替え、その 1 番最初と最後の要素を度合 0 と度合 1 にすることから，これらの要素については，人間は最も詳しい経験，又は知識があると見なせ，その間にある要素には 0〜1 の度合を振っているのは，ある程度詳しい経験，又は知識があると思われるからである。実際はもっと複雑であるが、大まかには人間はこう考えていると思われる。

$$RF_{\text{背が高い}^A} = \{0/u_1, 1/u_2, 0.5/u_3, 1/u_4, 0/u_5, 0/u_6, 0/u_7\}$$

表 1:

人	身長	相対ファジィ集合の度合
u_1	190cm	0
u_2	170cm	1
u_3	160cm	0.5
u_4	150cm	1
u_5	180cm	0
u_6	140cm	0
u_7	190cm	0

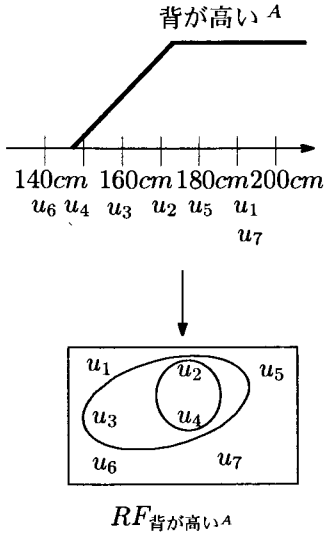


図 5: ファジィ集合と相対ファジィ集合

前の例（図 3 や図 4 における例）から分かるように、ファジィ集合と相対ファジィ集合は関係を持っている。すなわち、ファジィ集合から相対ファジィ集合を推測できる。ただし、1 つのファジィ集合から推測できる相対ファジィ集合は、かなり大まかなものである。複

数のファジィ集合から求まる相対ファジィ集合を統計的にまとめれば、最後に求まる相対ファジィ集合の精度は上がる。

定義 2 相対ファジィ集合

$f_i^x(i=1,2,\cdots,m)$ を人物 x の m 個のファジィ集合とし、$u_j(j=1,2,\cdots,n)$ を対象とする。人物 x の相対ファジィ集合 RF^x を次のように定義する。

$$RF^x = \left\{ \sum_{i=1}^{m} \frac{\mu_{RF_{f_i^x}}(u_j)}{m} / u_j \;\middle|\; j=1,2,\cdots,n \right\} \quad (2)$$

例 2 相対ファジィ集合

図6では、A さんのファジィ集合 $f_1^A, f_2^A, f_3^A, f_4^A$ がある。これら4つのファジィ集合から、それぞれのファジィ集合に対する相対ファジィ集合 $RF_{f_1^A}, RF_{f_2^A}, RF_{f_3^A}, RF_{f_4^A}$ を求める。これら4つのファジィ集合に対する相対ファジィ集合を演算することにより、A さんの相対ファジィ集合 RF^A が求まる。1つのファジィ集合に対する相対ファジィ集合では、経験した要素間にある要素が実際に経験していなくても経験したことになり、複数のファジィ集合に対する相対ファジィ集合を統合演算することにより、より正確な値が求まると思われる。

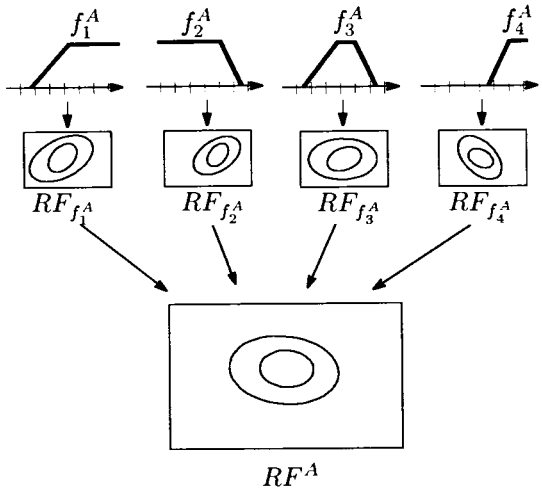


図 6: 相対ファジィ集合

3 相対ファジィ集合の活用

この相対ファジィ集合を用いることにより、どのような利点があるのかを議論する。まず、下記の議論で必要となる定義を示す。

定義 3 相対ファジィ集合間の関係

A さんの相対ファジィ集合 RF^A からの B さんの相対ファジィ集合 RF^B との関係を表わす関数を $R(RF^A, RF^B)$ とする。ある特定の演算 $\circ$ において、$RF^A \circ R(RF^A, RF^B) = RF^B$ が成り立つものとする。

定義 4 一般的ファジィ集合

言葉 f に対する一般的ファジィ集合を f^{GR} とする。一般的ファジィ集合とは、台集合のすべての要素の大小関係を表現したファジィ集合である。

次に、相対ファジィ集合を用いた有用な点を示す。

- ある人の相対ファジィ集合とある言葉の一般的ファジィ集合があれば、その人のある言葉のファジィ集合が求められる。

$$RF_{f^A},\ f^{GR} \quad \Rightarrow \quad f^A$$

A さんから、A さんのいくつかのファジィ集合を聞くだけで、聞いていない A さんのファジィ集合を推測できる。

- A さんの相対ファジィ集合から B さんの相対ファジィ集合への関係と一般的ファジィ集合とあるファジィ集合におけるある要素の A さんの評価がわかっていれば、B さんのその評価を求められる。

$$R(RF^A, RF^B),\ f^{GR},\ \mu_{f^A}(u) \quad \Rightarrow \quad \mu_{f^B}(u)$$

実際によく人はこのような事を行なっている。例えば、A さんが日本人で、B さんがアメリカ人であるとする。A さんがある人を「背が高い」と思う人がいた時、B さんはどう思うかを推測すると、たぶん B さんは A さんほど「背が高い」とは思わないだろうと思う。
これは、次のような思考がなされていると思われる。A さんは、まずこれまでの B さんとのやり取りや B さんの国籍、住んでいる場所などを元に、自分の経験（相対ファジィ集合）と B さんの経験（相対ファジィ集合）との関係を推測する。そして、この相対ファジィ集合同士の関係と「背が高い」の一般的ファジィ集合を用いて、「背が高い」という言葉に対して、2 人の評価の仕方の違いを

求める。この場合は、A さんは日本人で、B さんはアメリカ人なので、A さんの「背が高い」の評価より、B さんの「背が高い」の評価の方が基準が高いだろうと判断する。A さんは「背が高い」と判断したが、B さんはたぶん「A さんほど背が高いとは思わないだろう」と判断する。

- 相対ファジィ集合、ある言葉の一般的ファジィ集合、あるグループの集合がわかっていれば、あるグループに対するある言葉のファジィ集合が求められる。
  あるグループ g の要素の集合を S_g とし、A さんのある言葉 f の S_g に対するファジィ集合を $f^{A[S_g]}$ とする。

$$RF_{f^A},\ f^{GR},\ S_g \quad \Rightarrow \quad f^{A[S_g]}$$

  具体的には、

$$RF_{f^A} \cap S_g,\ f^{GR} \quad \Rightarrow \quad f^{A[S_g]}$$

  人間は、ある状況下を想定した場合、同じ言葉のファジィ集合で変わる場合がある。例えば、「背が高い」の言葉に対して、小学生を想定した場合の「背が高い」と年齢は関係なしを想定した場合のそれぞれのファジィ集合は異なってくる。

4 終わりに

本論文では、人間がファジィ集合を決める上で考慮していると思われる経験した集合 – 相対ファジィ集合 – を提案し、その有用性について述べた。今後、本論文で述べた手順を具体的に数式化し実装したい。また、「美人」や「かっこいい」など要素の一般的な順番が存在しない言葉に対して、どのようなやり方をするべきかを考えていきたい。

参考文献

[1] L.A.Zadeh: Fuzzy Sets, Information and Control, 8, (1965)

[2] 日本ファジィ学会編: 講座ファジィ 2 ファジィ集合, 日刊工業新聞社

[3] 甘利俊一, 向殿政男共編: ニューロとファジィ, 培風館

[4] 松本麻奈美, 江本全志, インタンローリー, 向殿政男: 属性の希少さを考慮した類似度を用いたクラスタリング, 第 19 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, (2003)

[問い合わせ先]

〒 214-8571
神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1
明治大学理工学部情報科学科システム科学研究室
江本 全志
Tel: 044-934-7442
Fax: 044-934-7912
E-mail: masashi@isc.meiji.ac.jp

能動関係と受動関係を用いたラフ集合

Activity Relation and Passive Relation for Rough Sets

山口 佑也 Yuya Yamaguchi
インタン ローリー Rolly Intan
江本 全志 Masashi Emoto
向殿 政男 Masao Mukaidono
明治大学
Meiji University

Abstract

In rough set research yield, until now rough sets with relations which are weaker than equivalence relation were proposed and their properties were clarified by many researchers. There is a rough set using conditional probability as one of their researches. In this paper, we use this conditional probability as relation in rough set. We adopt two views on variables of conditional probability, we call one view activity relation and call another view passive relation. We discuss rough sets with activity relation and passive relation and show their properties. Furthermore, we consider the properties of rough sets with compositions of activity relation and passive relation.

1 はじめに

ラフ集合論における研究分野では、同値関係を緩めた関係を用いたラフ集合の一般化、および、その性質を明らかにした研究が多くの人によって行われてきた。その中の一つに、条件付き確率の関係を用いたラフ集合の研究が行われている。[5] 本論文で私たちは、この条件付き確率の2つの変数の見方によって1つを能動関係、もう1つを受動関係と呼び、この2つの関係を用いたラフ集合を定義する。そしてこれらの性質を明らかにする。

2 ラフ集合

2.1 情報システム

情報システムとは、ある集合 U における対象と属性集合 $a_i \in A$ で構成されるデータベースのようなものである。それぞれの対象は各々の属性についてなんらかの値や、情報がある。簡単な例として表1の2値情報システムが挙げられる。

表 1: 2値情報システム

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
$x1$	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
$x2$	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
$x3$	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1
$x4$	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1
$x5$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

2.2 同値関係

同値関係とは、ある集合 U の2つの要素の間に、次に定義する関係 R が成り立つことをいう。

定義 1 同値関係

1. 反射律 $aRa = 1$
2. 対称律 $aRb = bRa$
3. 推移律 aRb, bRc ならば、aRc

また、要素間に同値関係 R の関係が成立する要素の集合を同値類と呼ぶ。そして $x \in U$ が帰属する同値類を $[x]_R$ とすると、次のように定義される。

定義 2 同値類

$$[x]_R = \{y \in U | xRy\} \tag{1}$$

2.3 ラフ集合

ラフ集合論は、情報システムとある属性から求まる同値類 R を用い、ある集合を同値類を用いて下近似と上近似で表現する手法である。基本概念として、最初は、人間の識別能力に限界があり、異なった対象を区別できないことがあることから始まった。任意の対象集合 $X \subseteq U$ が与えられたとき、R による X の上近似、下近似の集合は、次のように定義できる。

定義 3 ラフ集合の近似

$$\underline{apr}(X) = \{x \in U | [x]_R \subseteq X\} \tag{2}$$

$$\overline{apr}(X) = \{x \in U | [x]_R \cap X \neq \phi\} \tag{3}$$

3 同値関係より弱い関係

これまで同値関係より弱い関係を用いたラフ集合についても研究されている。次に、いくつかの関係を示し、本論文で用いる関係に関わる条件付き確率について述べる。

定義 4 ファジィ類似関係 $s : U \times U \rightarrow [0,1], x, y, z \in U,$

1. 反射律 $s(x,x) = 1$
2. 対称律 $s(x,y) = s(y,x)$
3. Max-min 推移律
   $s(x,z) \geq \max_{y \in U} \min[s(x,y), s(y,z)]$

同値関係を緩めた関係として、定義 4 のファジィ類似関係というものが存在する。これは、同値関係の推移律を定義 4 の (3) のように緩めた関係である。

また、このファジィ類似関係の特別なタイプの弱ファジィ類似関係が定義されている [5]。次の定義 5 である。

定義 5 弱ファジィ類似関係 $s : U \times U \rightarrow [0,1], x, y, z \in U,$

1. 反射律 $s(x,x) = 1$
2. 条件付き 対称律 $s(x,y) > 0$ then $s(y,x) > 0$
3. 条件付き 推移律 $s(x,y) \geq s(y,x) > 0$ and $s(y,z) \geq s(z,y) > 0$ then $s(x,z) \geq s(z,x)$

次の定義 6 の条件付き確率は、定義 5 に示した弱ファジィ類似関係の具体的な形・例である。下記の定義の U の要素 x, y は属性上の集合として表される。定義 6 の意味は y から見て y がどれくらい x に類似しているかの度合をあらわしている。

定義 6 条件付き確率, $R : U \times U \rightarrow [0,1],\ x, y, \in U,$

$$R(x,y) = P(x|y) = P(y \rightarrow x) = \frac{|x \cap y|}{|y|} \qquad (4)$$

4 能動関係・受動関係

条件付き確率関係は $R(x,y)$ と $R(y,x)$ は必ずしも同じ値にはならない。表 1 を例に考えてみる。表 1 より、$x1 = \{a_6, a_7\}$、$x2 = \{a_7, a_8, a_9\}$、$x3 = \{a_2, a_3, a_6, a_{10}\}$ から、

$$R(x1,x2) = 1/3, R(x1,x3) = 1/4, R(x2,x3) = 0/4$$

$$R(x2,x1) = 1/2, R(x3,x1) = 1/2, R(x3,x2) = 0/3$$

となる。このことから、条件付き確率には、一つのある要素 x に関して、2 つの見方がある。x が他の要素にどれくらい類似しているかと他の要素が x とどれくらい類似しているかである。これを、前者を条件付き確率による能動関係、後者を条件付き確率による受動関係と呼ぶことにする。次に、これらを定義する。

定義 7 能動関係と受動関係
$R_a, R_p : U \times U \rightarrow [0,1], x, y, \in U,$

能動関係 $$R_a(x,y) = R(y,x) \qquad (5)$$

受動関係 $$R_p(x,y) = R(x,y) \qquad (6)$$

上記の定義からわかるように、能動関係は受動関係、受動関係は能動関係で表現できる。つまり $R_a(y,x) = R_p(x,y)$ ということである。

次に、能動関係と受動関係の値を $\alpha-$ カットで 2 値化し、次の 2 つの集合を定義する。

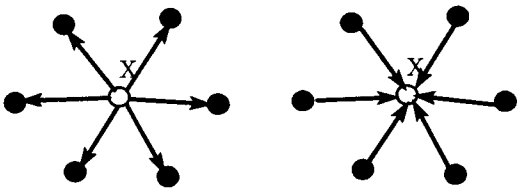
定義 8 能動関係の集合と受動関係集合

能動関係の集合
$$R_a^{\alpha}(x) = \{y \in U | R_a(x,y) \geq \alpha\} \qquad (7)$$

受動関係の集合
$$R_p^{\alpha}(x) = \{y \in U | R_p(x,y) \geq \alpha\} \qquad (8)$$

ただし、$\alpha \in [0,1]$

x の能動関係の集合は、1 つのある要素 x に関して、不特定多数の y の中で $x \rightarrow y$ を満たす y の集合である。(図 1 左) すなわち、x が類似していると考える要素の集合である。また、x の受動関係の集合は、1 つのある要素 x に関して、不特定多数の y の中で $y \rightarrow x$ を満たす y の集合である。(図 1 右) すなわち、x と類似していると考える要素の集合である。



能動関係の図　　受動関係の図

図 1: 能動関係と受動関係の集合図

5 能動関係と受動関係を用いたラフ集合

本章では、先に定義した能動関係と受動関係を用いたラフ集合を定義し、これまでのラフ集合と本論文で提案するラフ集合の定義を比較する。

5.1 能動関係と受動関係を用いたラフ集合の定義

前記の能動関係の集合と受動関係の集合を、全体集合の分割に用いる。能動関係と受動関係を用いたラフ集合を次に定義する。

定義 9 能動関係におけるラフ集合の近似

$$\underline{apr}_a^{\alpha}(X) = \{x \in U | R_a^{\alpha}(x) \subseteq X\} \quad (9)$$

$$\overline{apr}_a^{\alpha}(X) = \{R_a^{\alpha}(x) | x \in X\} \quad (10)$$

定義 10 受動関係におけるラフ集合の近似

$$\underline{apr}_p^{\alpha}(X) = \{x \in U | R_p^{\alpha}(x) \subseteq X\} \quad (11)$$

$$\overline{apr}_p^{\alpha}(X) = \{R_p^{\alpha}(x) | x \in X\} \quad (12)$$

提案するラフ集合の上近似の定義は、これまでのラフ集合の上近似とは異なることに注意されたい。違いについては、後で示す。また、これらのラフ集合での全体集合を分割する部分集合（同値類に相当するもの）は、部分集合間で重なりが出る場合がある。

例 1 能動関係と受動関係におけるラフ集合の近似

- 能動関係の例
  図 2 のような分割状態を参考にし、入力 $X = \{B, C, D\}$ として定義 9 の例を示す。
  $\underline{apr}_a^{\alpha}(X) = \{B, C\}$
  $\overline{apr}_a^{\alpha}(X) = \{B, C, D, E\}$

- 受動関係の例
  図 3 のような分割状態を参考にし、入力 $X = \{D, E, F\}$ として定義 1 0 の例を示す。
  $\underline{apr}_p^{\alpha}(X) = \{E, F\}$
  $\overline{apr}_p^{\alpha}(X) = \{C, D, E, F\}$

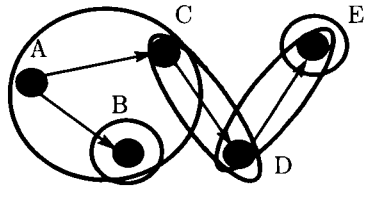


図 2: 能動関係の分割

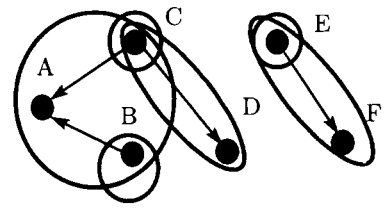


図 3: 受動関係の分割

5.2 ラフ集合の定義の違いによる差

ラフ集合を、要素中心とグループ中心で定義を考えた場合、分割で部分集合に重なりを認めない場合は同じ意味になるが、部分集合に重なりを認めた場合は違う意味になるという研究が [5] でなされている。本論文で定義したラフ集合の上近似も、分割で部分集合に重なりを認めない場合はこれまでのラフ集合と同じ意味になるが、部分集合に重なりを認めた場合は違う意味になる。ここでは、ラフ集合の上近似について、要素中心の定義、グループ中心の定義、提案する定義の関係について示す。

まず、要素中心とグループ中心で考えた要素志向と類似クラス志向のラフ集合の近似を定義する。[5]

定義 11 要素志向と類似クラス志向のラフ集合の近似

1. 要素志向

$$\underline{apr}_e^{\alpha}(X) = \{x \in U | R_a^{\alpha}(x) \subseteq X\} \quad (13)$$

$$\overline{apr}_e^{\alpha}(X) = \{x \in U | R_a^{\alpha}(x) \cap X \neq \phi\} \quad (14)$$

2. 類似クラス志向

$$\underline{apr}_c^{\alpha}(X) = \bigcup \{R_a^{\alpha}(x) | R_a^{\alpha}(x) \subseteq X, x \in U\} \quad (15)$$

$$\overline{apr}_c^{\alpha}(X) = \bigcup \{R_a^{\alpha}(x) | R_a^{\alpha}(x) \cap X \neq \phi, x \in U\} \quad (16)$$

本論文で定義した下近似の式 (9) と定義 1 1 の式 (13) は同様であるとしている。要素志向、類似クラス志向、本提案のラフ集合の上近似には、次の関係が成り立つ。

$$\overline{apr}_e^{\alpha}(X) \leq \overline{apr}_c^{\alpha}(X) \quad (17)$$

$$\overline{apr}_a^{\alpha}(X) \leq \overline{apr}_c^{\alpha}(X) \quad (18)$$

例 2 要素志向、類似クラス志向、本提案のラフ集合の上近似の違い

図 4 を参照して、3 種類の上近似について求めて、違いを検証する。入力 $X = \{a, c\}$ とする。

- 要素志向の場合
  $\overline{apr}_e^{\alpha}(X) = \{a, b, c\}$
- 類似クラス志向の場合
  $\overline{apr}_c^{\alpha}(X) = \{a, b, c, d\}$
- 本提案のラフ集合の場合
  $\overline{apr}_a^{\alpha}(X) = \{a, c, d\}$

これらの結果を見て、式 (17)、(18) の関係が成り立つことがわかる。定義１１に関して $R_a^{\alpha}(x)$ を $R_p^{\alpha}(x)$ に変更して能動関係だけでなく、受動関係に関しても定義できる。しかし本論文では、能動関係に関してのみ例を示しているので今回は定義しない。

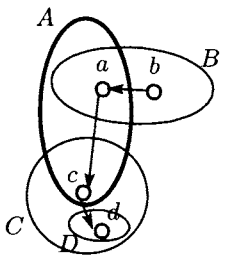


図 4:

6 AP 積集合と AP 和集合

ここで、能動関係の集合と受動関係の集合を集合演算で合成する。積集合演算と和集合演算で合成した集合を次に定義する。

定義 12 *AP* 積集合と *AP* 和集合

$$AP\text{ 積集合} \quad R_{ap}^{\alpha}(x) = R_a^{\alpha}(x) \cap R_p^{\alpha}(x) \tag{19}$$

$$AP\text{ 和集合} \quad R_{pa}^{\alpha}(x) = R_a^{\alpha}(x) \cup R_p^{\alpha}(x) \tag{20}$$

合成によりできた新しい２つの集合を利用して、ラフ集合に関する下近似・上近似を次に定義する。

定義 13 *AP* 積関係と *AP* 和関係におけるラフ集合の近似

AP 積関係における近似

$$\underline{apr}_{ap}^{\alpha}(X) = \{x \in U | R_{ap}^{\alpha}(x) \subseteq X\} \tag{21}$$

$$\overline{apr}_{ap}^{\alpha}(X) = \{R_{ap}^{\alpha}(x) | x \in X\} \tag{22}$$

AP 和関係における近似

$$\underline{apr}_{pa}^{\alpha}(X) = \{x \in U | R_{pa}^{\alpha}(x) \subseteq X\} \tag{23}$$

$$\overline{apr}_{pa}^{\alpha}(X) = \{R_{pa}^{\alpha}(x) | x \in X\} \tag{24}$$

定義１２による全集合を分割する部分集合は、定義８と同様に部分集合間で重なりがでる場合があり今までの説明してきた関係と同様であるが、式 (19) の場合において少し特殊な性質が見られる。$\alpha = 1$ にすると、式 (19) の集合は情報システムにおいて要素同士が同様に考えられ、同値類と同じ意味の集合となる。このことから推移律が成り立つ関係の同値関係の集合であるとわかる。そして、定義１３の *AP* 関係における近似は同値類によるラフ集合の近似と同じ意味になる。

7 終わりに

本論文では、条件付き確率の関係を２つの視点から見た能動関係、受動関係を定義し、この関係に見合うラフ集合の近似を提案した。そして、提案した近似の性質について明らかにした。また、これまで提案されているラフ集合の定義と本論文で提案したラフ集合の定義を比較、検証した。今後、さらに能動関係、受動関係におけるラフ集合の性質を明らかにしていきたい。特に、情報システムの値を２値からファジィ値した場合について考えていきたい。

参考文献

[1] 堀内清光: ファジィ数学, 大阪教育図書, 1998

[2] 向殿政男: ファジィ論理 (4 巻), 日刊工業新聞, 1993

[3] 水本雅晴 他: ファジィ集合 (2 巻), 日刊工業新聞, pp.242-253, 1992

[4] 日本ファジィ学会 編集: ファジィとソフトコンピューティング ハンドブック, 共立出版, pp.535-544 ,2000

[5] Rolly Intan, Masao Mukaidono:Generalized Fuzzy Rough Sets By Conditional Probability Relations, International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence Vol. 16(7), World Scientific, (2002), pp. 865-881.

連絡先:
〒 214-8571
神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1(6404)
明治大学　理工学部　情報科学科
山口　佑也
電話:044-934-7442
FAX:044-934-7912
E-mail:y-yuya@cs.meiji.ac.jp

属性の希少さを考慮した類似度の提案

Proposal of the similarity in consideration of rare of an attribute

松本 麻奈美 Manami Matsumoto
江本 全志 Masashi Emoto
インタン ローリー Rolly Intan
向殿 政男 Masao Mukaidono
明治大学
Meiji University

Abstract

The traditional similarity is calculated by using the value of two objects, without a universal set taking into consideration. However, usually in real world, each person may have different similarity in same two objects. For example, the similarities of the following person are different in two women with blond hair. One person is Japanese, another one is Northern European. In this case, the similarity of Japanese is higher than one of Northern European. Because Japanese don't see the women with blond hair well and Northern European do see them well. In this paper, we propose the new similarity in consideration of the object of a universal set. And we compare this similarity and other similarity.

1 はじめに

今までに、さまざまな類似度が提案されてきた。一般的なものとして、ユークリッド距離やハミング距離等があり、クラスタリングや広い分野にて使われている。それらの類似度は、全体集合は考慮せずに２つの対象の値のみから類似度を求めている。しかし現実社会では、２つの対象から得られる類似度が、人によって変わってくるのが普通である。例えば、金髪の２人を、金髪の多い北欧の人から見た場合と、黒髪の多い日本人から見た場合とでは、この２人の類似度は違うというようにである。本論文にて提案する新しい類似度は、データ全体から見た対象同士を比較し、また、データ内における希少なデータを重視する手法である。

2 概念

今回提案する類似度は、人間がどのようにして人と人を比較するかというような推測をもとに作られた。そこで、例を用いて述べる。

2.1 猿と人間

まず、猿が２匹以上と人間が２人以上写っている写真があるとする。この写真を見た猿と人間が、猿同士人間同士をどう区別するかについて考える。人間の目から見れば人間同士は見分けられるが、猿同士というのは見分けることができない。なぜなら人間は人間を見る機会が多いために人間を見分ける知識があるが、猿は見慣れていない人が多いことから猿を見分ける知識を持っていない。つまり、猿に関する知識がないために、猿のどこを見ればどの猿であるというように認識することは難しいといえる。これは、猿側も同様ではないだろうか。これを基にすると、猿には猿の知識、人間には人間の知識が存在するということが出来る。

2.2 人間と特徴

次に、人間同士（図１）とその人間同士にヒゲを付け足したもの (図２) を比較した場合に、日本人が見た場合とアラブ人が見た場合を考える。日本人がそれらを見た場合、ヒゲのない人は見慣れている分、どこを見れば見分けることが出来るということがわかっているために区別することが出来る。しかし、日本人はヒゲがある人を見慣れていない場合が多いため、ヒゲのイメージが強くなってしまう傾向がある。すると、ヒゲに注目が集まり、類似度が高くなると考えられる。逆にアラブ人から見た場合、ヒゲを持つ人が多いためにヒゲに惑わされずにヒゲのある者同士をを識別できる反面、ヒゲを持つものが少ないことからヒゲのない者達を識別しにくいといえるのではないだろうか。

2.3 知識からの類似度

前の２つの例から言えることは、人間は何らかの知識（経験）から、生物や人間を認識するということである。ここでの知識とは、人間１人１人の主観に基づいて構成されており、主観とは今まで経験してきたも

図 1: ヒゲがない場合の写真

図 2: ヒゲがある場合の写真

のから作られると考えられる。知識の中で、珍しいと考えられるような要素や組み合わせ（知識の中の少数派）が存在したとき、人は敏感に珍しいものに対して反応する傾向がある。それは、猿の毛だらけという特徴や、人間のヒゲという特徴にあてはまる。提案する類似度は全体から見る希少さに注目して作ることを目標とした。

3　希少さを考慮した類似度の提案

第 2 節にて述べたのは、人間の類似の考えを利用するという目的に対して、希少さと知識全体から見るという概念が必要ではないかということであった。本節では、集合として見た場合、どのように表すことができるか、そして考えられる数式について述べる。

3.1　提案する類似度の概念

本論文で提案する類似度は、人それぞれが経験した知識を元に、2 つの対象の組み合わせがどのくらい希少かを出し、その値を考慮して求める。類似度を提案するまでの過程を示す。

対象が任意の属性について同じ属性値を持っていた場合を考える。まず、もし 2 つの対象の属性値が同じであまり見られない属性値であった場合（図 3）、その属性値を持つ対象に出会う機会がほとんどなく見慣れていないので、対象間の類似度は高くなる。また、2 つの対象が同じでよく見られる属性値であった場合（図 4）、その属性値の対象が周りにたくさんいる分見慣れているので、対象間の類似度は低くなる。

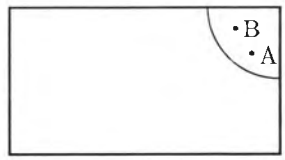


図 3: 対象が同じ小さい集合にある場合

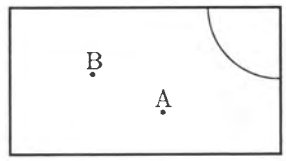


図 4: 対象が同じ大きい集合にある場合

次に、対象が異なる属性値の場合についても同様に考える。2 つの対象がどちらもよく見られる属性値で異なる場合（図 5）、それらの属性値と出会いやすい環境にあることから見慣れるので、対象間の非類似度は低くなる。すなわち、人は対象間を似ている様に感じやすい。2 つの対象がどちらもあまり見ない属性値で異なる場合（図 6）、それらの属性値の対象にほとんど会う機会もなく見慣れていないので、対象間の非類似度は高くなる。すなわち、人は対象間をあまり似ていないように思う。最後に、2 つの対象の 1 つがよく見る属性値で、もう 1 つがあまり見ない属性値である場合（図 7）、組み合わせとしてあまり会う機会に乏しく見慣れていないので、対象間の非類似度は高くなる。

3.2　数式

前記の概念を基に、数式に表す。人の知識というものは、自らの経験から作られるものである。それを踏まえて、今までに経験してきた全ての要素の任意の属性における属性値の量に基づいて数式を作る。

数式は情報システムから作られる。o_i, o_j が情報システムの対象 $(i, j = 1, 2, \ldots, n)$、a_k が属性 $(k = 1, 2, \ldots, m)$ にあたる。関数 v とは、その対象と属性に対応する値を指す。
まず、一致度を定義する。

定義 1 一致度

$$m(o_i, o_j, a_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } v(o_i, a_k) = v(o_j, a_k) \\ 0 & \text{if } v(o_i, a_k) \neq v(o_j, a_k) \end{cases} \quad (1)$$

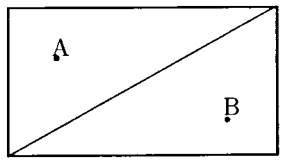


図 5: 対象が異なる大きい集合にある場合

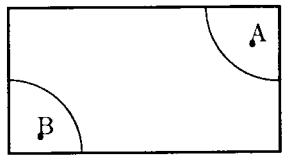


図 6: 対象が異なる小さい集合にある場合

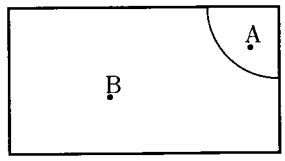


図 7: 対象が大きい集合と小さい集合にある場合

任意の対象に対して任意の属性値が起こる確率を次のように定義する。

定義 2 任意の対象から任意の属性値が起こる確率

$$P(o_i, a_k) = \frac{\sum_{j=1}^{n} m(o_i, o_j, a_k)}{|U|} \quad (2)$$

定義 2 の確率を用いて希少さを定義する。

定義 3 希少さ

$$c(o_i, o_j, a_k) = 1 - P(o_i, a_k) \times P(o_j, a_k) \quad (3)$$

定義 3 の希少さと定義 1 の一致度から、類似度を定義する。

定義 4 類似度

$$S(o_i, o_j) = \frac{\sum_{k=1}^{m} (c(o_i, o_j, a_k) \times m(o_i, o_j, a_k))}{\sum_{k=1}^{m} c(o_i, o_j, a_k)} \quad (4)$$

4 実験

4.1 実験内容

提案する類似度を用いて、パターンマッチングによって得られた類似度と比較検証を行う。パターンマッチングとは、式 $\frac{\text{一致する属性値の個数}}{\text{全属性数}}$ により表すことができる。用いたデータベースは参考文献 [2] を利用し、実際の情報システムを表 1 と表 2 に表す。

表 1: 鳥類 8 種類・魚類 2 種類の情報システム (b8f2)

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
lark	1	1	0	0	0	1	0	0	0
ostrich	1	0	0	0	0	1	0	0	1
parakeet	1	1	0	0	0	1	0	1	0
penguin	1	0	1	1	0	1	0	0	1
pheasant	1	1	0	0	0	1	0	0	0
rhea	1	0	0	1	0	1	0	0	1
skimmer	1	1	1	1	0	1	0	0	0
skua	1	1	1	1	0	1	0	0	0
sole	0	0	1	0	1	0	1	0	0
tuna	0	0	1	1	1	0	1	0	1

表 2: 鳥類 2 種類・魚類 8 種類の情報システム (b2f8)

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
dogfish	0	0	1	1	1	0	1	0	1
haddock	0	0	1	0	1	0	1	0	0
herring	0	0	1	1	1	0	1	0	0
pike	0	0	1	1	1	0	1	0	1
piranha	0	0	1	1	1	0	1	0	0
seahorse	0	0	1	0	1	0	1	0	0
sole	0	0	1	0	1	0	1	0	0
tuna	0	0	1	1	1	0	1	0	1
rhea	1	0	0	1	0	1	0	0	1
skua	1	1	1	1	0	1	0	0	0

情報システムの対象は、鳥類 8 種魚類 2 種、鳥類 2 種魚類 8 種とした。また、属性は表 3 に示す a_1〜a_9 の 9 種類である。属性値は、0,1 の 2 値によって判別されている。

表 3: 属性の意味

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
羽	飛行	水生	肉食	歯
a_6	a_7	a_8	a_9	
肺呼吸	ひれ	家畜	猫サイズ	

例 1 類似度の計算例

表 1 にて skua と sole の類似度を出す場合を考える。その時、次式のように表すことができる。

$$S(skua, sole) = \frac{0.75 + 0.19 + 0.64}{0.84 \times 4 + 0.75 \times 3 + 0.19 + 0.64} = \frac{1.58}{6.44} = 0.245$$

4.2 検証

表1,2にある4つの動物 rhea,skua,sole,tuna について、これらの間の類似度を示す。表4は表1の情報システムでパターンマッチングでの類似度を、表5は表1の情報システムで提案する類似度を用いた場合である。また、表6は表2の情報システムでパターンマッチングでの類似度を、表7は表2の情報システムで提案する類似度を用いた場合である。

表 4: パターンマッチングを用いた場合 (b8f2)

	rhea	skua	sole	tuna
rhea	1	0.667	0.222	0.444
skua	0.667	1	0.333	0.333
sole	0.222	0.333	1	0.778
tuna	0.444	0.333	0.778	1

表 5: 提案する類似度を用いた場合 (b8f2)

	rhea	skua	sole	tuna
rhea	1	0.513	0.143	0.381
skua	0.513	1	0.245	0.258
sole	0.143	0.245	1	0.786
tuna	0.381	0.258	0.786	1

表 6: パターンマッチングを用いた場合 (b2f8)

	rhea	skua	sole	tuna
rhea	1	0.667	0.222	0.444
skua	0.667	1	0.333	0.333
sole	0.222	0.333	1	0.778
tuna	0.444	0.333	0.778	1

表 7: 提案する類似度を用いた場合 (b2f8)

	rhea	skua	sole	tuna
rhea	1	0.628	0.032	0.265
skua	0.628	1	0.141	0.122
sole	0.032	0.141	1	0.54
tuna	0.265	0.122	0.54	1

表4と表6のパターンマッチングを見た場合、全体を含めずに互いを比較するため、対象間の関係は変わらない。しかし、表5と表7の提案する類似度を用いた場合は、全体の中の希少さを含むために対象間の関係は異なるものとなる。また、対象（横軸）の3行目の skua の欄を比較する。表5では、skua に類似している順序は次のようになる。

$$skua \geq rhea \geq tuna \geq sole$$

しかし、表7では、次の異なる順序関係となる。

$$skua \geq rhea \geq sole \geq tuna$$

つまり、全体となるデータベース（知識）が異なれば、その知識に見合った関係が生まれ、順序関係すらも変えることが可能であるということが分かる。

5 終わりに

本論文で、属性値の組み合わせの希少さを考慮した類似度を提案した。そして、提案した類似度の特徴を示し、有効性を確認した。異なるデータベースにより対象同士の関係（もしくは順序関係）が変わるということは、今までの類似度にはない変化であり人間の知識に近い現象であるといえる。

しかし、あらゆる集合に対応できる数式であるかどうか、不確定なこともありまだまだ改善の余地がある。また、どのような条件のときに順序関係が変わるのか、深く考察の余地があると考えられる。

参考文献

[1] 山口　智浩 , 脇谷　康一 , 谷内田　正彦 :" 情報量を考慮した関係記述の類似度に基づく家の初期構造概念の学習 ", 情報処理学会　ジャーナルアブストラクト（Vol37, No.11 - 004), 2001.5

[2] Patrick M. Murphy : the UCI Repository Of Machine Learning Databases and Domain Theories, http://www.ics.uci.edu/ mlearn/MLRepository.html, 1995.12

連絡先
〒 214-8571
神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1 6404 室
明治大学理工学部情報科学科
松本　麻奈美
電話（FAX）:044-934-7442
E-mail:cat-tail@cs.meiji.ac.jp

ファジィスイッチングARモデル
Fuzzy Switching AR Model

藪内 賢之
Yoshiyuki YABUUCHI
下関市立大学
Shimonoseki City University

和多田 淳三
Junzo WATADA
早稲田大学
Waseda University

豊浦 由浩
Yoshihiro TOYOURA
大阪工業大学
Osaka Institute of Technology

Abstract: A character of an economic system, a social system and so on are always making a change with time. And sometimes, one system contains another systems, one system separate into some systems or some factors are mixed in the system. Generally, we almost cannot get information whether data are observed from one system or not. However one model cannot describe many systems. So we should apply models to each system to analyze systems.

In this paper, we employ fuzzy data to describe the possibility of a time-series system. And we propose a fuzzy switching AR model that is applied switching model to a fuzzy autocorrelation model.

1 はじめに

経済や社会システムでは時間の経過に伴ってシステムの特性も変化することが多い．また，対象としているシステムに新たな要因が加わることやシステムが分離することもある．一般的に，得られたデータが複数あるいは単一のシステムであるかの情報が得られることは少ない．しかしながら，単一のモデルで複数のシステムを記述することはできない．このため，システムを正しく記述するために必要なモデル数を把握し，適用しなければならない．

本論文では，時系列データが示すシステムの可能性を記述するためにファジィ化したデータ [1, 2, 5] を用いる．そして，システムの可能性を考慮したファジィ自己相関モデル [7] にスイッチングモデル [4, 6] を適用したファジィスイッチング AR モデルを提案する．

2 自己回帰モデル

自己回帰 (AutoRegressive; AR) モデルは，トレンドを取り除いた差分データが定常性をもつ場合に有効である [3].

トレンドが取り除かれた時系列データ $Z_t(t = 1, 2, \cdots, n)$，ホワイトノイズ ε_t および自己回帰係数 $\phi_i(i = 1, 2, \cdots, p)$ を用いると AR(p) モデルは次のように表現できる．

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \cdots + \phi_p Z_{t-p} + \varepsilon_t \quad (1)$$

誤差項であるホワイトノイズ ε は期待値 0，分散 σ^2 の互いに独立な正規確率変数であり，時系列データ Z_t とは互いに独立であると仮定されている．

AR(1) モデルの場合，定常性を示す時系列データ Z_t の平均と分散は次のようになる．

$$E[Z_t] = E[\phi_1 Z_{t-1} + \varepsilon_t] = 0$$
$$Var[Z_t] = E[Z_t^2] = \phi_1^2 Var[Z_{t-1}] + \sigma^2$$

従って，定常性の性質 $Var[Z_t] = Var[Z_{t-1}]$ より，AR(1) モデルの場合は次の関係式を満たすことになる．

$$-1 < \phi_1 < 1 \quad (2)$$

また，自己回帰係数 ϕ_i は Yule-Walker の方程式を解くことにより得られる．

3 ファジィ自己相関モデル

本モデルでは，システムがもつ可能性を時系列モデルで記述するためにファジィ化した時系列データ Z_t を用いる [5]．ファジィ化し，各種トレンドを除去したデータを $\mathbf{X}_t = [X_t^L, X_t^C, X_t^U]$ とする．ここで，上限，中心，下限をそれぞれ U，C，L で表記し，以降も同様にする．

一般に，ファジィ演算を繰り返すとあいまいさが大きくなる．このため，ファジィデータのあいまいさを調整するために α-cut を行う．ファジィ自己相関モデルでは，ファジィ自己相関係数のあいまいさを調整するための α-cut 値を次の LP 問題により定める．

$$\left.\begin{array}{ll} \underset{h}{\text{maximize}} & \sum_i (\rho_i^U - \rho_i^L) \\ \text{subject to} & -1 \le \rho_i^L \le \rho_i^C \le \rho_i^U \le 1 \\ & (i = 1, 2, \cdots, p) \end{array}\right\} \quad (3)$$

ここで，次の自己回帰過程を求めることにする．

$$\mathbf{X}_t = \mathbf{\Phi}_1 \mathbf{X}_{t-1} + \mathbf{\Phi}_2 \mathbf{X}_{t-2} + \cdots + \mathbf{\Phi}_p \mathbf{X}_{t-p} \quad (4)$$

ただし，$\mathbf{\Phi}_i = [\phi_i^L, \phi_i^C, \phi_i^U](i = 1, 2, \cdots, p)$ はファジィ偏自己回帰係数である．このため，上記自己回帰過程の出力もファジィ数となる．

自己回帰モデル同様，Yule-Walker の方程式を用い，ファジィ偏自己回帰係数を求める．ファジィ自己相関モデルは，時系列システムのもつ可能性を記述することを目的としている．このため，ファジィ偏自己相関系数 $\mathbf{r}_i = [r_i^L, r_i^C, r_i^U]$ を用いると Yule-Walker の方程式は次のようになる．

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{\Phi}_1 \mathbf{r}_{i-1} + \mathbf{\Phi}_2 \mathbf{r}_{i-2} + \cdots + \mathbf{\Phi}_k \mathbf{r}_{i-k} \supseteq \mathbf{r}_i$$

ただし，$\mathbf{R}_i = [R_i^L, R_i^C, R_i^U]$ である．

本モデルはシステムの可能性を記述し，あいまいさを最小にするファジィ偏自己相関系数を求めるために次の LP 問題に帰着させることができる．

$$\left.\begin{array}{ll} \underset{\mathbf{\Phi}}{\text{minimize}} & \sum_i (R_i^U - R_i^L) \\ \text{subject to} & R_i^L \le \rho_i^L, R_i^C = \rho_i^C, \rho_i^U \le R_i^U \\ & R_i^L \le R_i^C \le R_i^U \\ & (i = 1, 2, \cdots, k) \end{array}\right\} \quad (5)$$

なお，(5) 式に (2) 式に対応する条件式が加えられる．

4 ファジィスイッチング AR モデル

時系列システムは，時間の経過に従ってシステムの状態が変化することがある．この場合，得られた時系列データを単一のシステムとして時系列モデルによって記述させることには無理がある．複数のシステムからデータが得られた，あるいは状態が変化した場合は，各システムの状態を記述するためのモデルを用いなければならない．

本論文では，得られた時系列データに含まれているシステムを識別し，それぞれのシステムに対して AR モデルを適用するファジィスイッチング AR モデルを提案する．

本論文では，上述したファジィ自己相関モデルを用いる．つまり，観測データが示すシステムの可能性をファジィ自己相関モデルによって記述し，システムがもつ可能性によってシステムを分割し，それぞれのシステムにファジィ自己相関モデルを適用する．ここではシステムを分割する方法として，遺伝的アルゴリズムを用いる．データが属するシステムをコード化した遺伝子を用い，下記の評価関数が最適となる分割を探索するのである．

$$E = \sum_{i=1}^{m} w_i$$

ただし，E は評価関数，w_i は第 i データの可能性の幅，m は分割されたシステムの数を示す．遺伝的アルゴリズムにより，システムのあいまいさを示す評価関数 E が最小となるように分割を行う．

そして，分割された各システムに対してファジィ自己相関モデルを適用する．

5 数値例

数値例により，提案モデルの有用性を示す．

6 おわりに

本論文では，時系列システムの特性が変化あるいは複数のシステムが混在している場合にそれぞれのシステムを識別し，各システムにファジィ自己相関モデルを適用するファジィスイッチング AR モデルを提案した．

また，数値例ではファジィ自己相関モデルと提案モデルを比較し，提案モデルの有効性を示した．

参考文献

[1] 小沢和浩，渡邊匠，関係正康，ファジィ自己回帰モデルとその応用，第 12 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.373-376, 1997

[2] 平野修，菅家正康，小沢和浩，電力需要における機構による消費者行動変化，第 18 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.393-394, 1992

[3] 溝口敏行，刈屋武昭，経済時系列分析入門，日本経済新聞社，1977

[4] 豊浦由浩，和多田淳三，スイッチングモデルに基づくファジィ時系列分析，第 18 回ファジィシステムシンポジウム，pp.153-154，2002

[5] 和多田淳三，田中英夫，横山宏，ファジィ時系列モデルとその予測問題への応用，日本経営工学会誌，Vol.34, No.3, pp.180-186, 1983

[6] Yoshiyuki Yabuuchi and Junzo Watada, Fuzzy Switching Regression Model based on Genetic Algorithm, *Proceedings of Seventh IFSA World Congress*, pp.113-118, 1997

[7] 藪内賢之，和多田淳三，ファジィ自己相関を用いた時系列分析，第 9 回ファジィソフトサイエンスワークショップ，pp.97-100, 1999

連絡先：

藪内 賢之　下関市立大学

〒 751-8510 山口県下関市大学町 2-1-1

電話：0832-84-8641，FAX：0832-52-0899

E-mail：yabuuchi@shimonoseki-cu.ac.jp

感性データに内在するファジィネスの数量化について

On Quantification of Fuzziness in Subjective Evaluation Data

領家 美奈
Mina Ryoke
筑波大学
University of Tsukuba

中森 義輝
Yoshiteru Nakamori
北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology

Abstract: When we are going to extract the feature from a subjective data set by any conventional multivariate analysis, the method using the average data about evaluators is the easiest, and includes appropriate information. However, in order to use more effectively the information which is inherent in evaluation data, it is important to develop the technique of modeling the individual differences in evaluation and spreads of vagueness. This paper introduces the concept of relative fuzziness into the principal component analysis and the correspondence analysis, and proposes a method of quantifying fuzziness which is inherent in subjective data.

1 はじめに

感性データセットの特徴を従来の多変量解析手法によって抽出しようとするとき、評価者に関する平均データを用いる方法が最も容易であるし、それなりの情報を含んでいる。しかし、人間の感性による対象の評価に内在する情報をより有効に利用するために、評価の個人差やあいまいさの広がりをモデル化する手法を開発することは重要である。本発表では、主成分分析や数量化理論 III 類において、相対的ファジネスという概念を導入して、感性データに内在するファジィネスを数量化する方法を提案する。

2 データ構造

評価者集合を $E=\{1,2,\cdots,K\}$ 、評価対象集合を $O=\{1,2,\cdots,M\}$ とする。E_m を対象 m を評価した評価者の集合、O_k を評価者 k が評価した対象の集合とし、

$$E=\bigcup_{m=1}^{M} E_m; \quad E_m \neq \phi, \ {}^{\forall}m \tag{1}$$

$$O=\bigcup_{k=1}^{K} O_k; \quad O_k \neq \phi, \ {}^{\forall}k \tag{2}$$

とする。特別なケースとして

- すべての評価者がすべての対象を評価：

$$E_m = E, \quad {}^{\forall}m$$

- 各評価者は 1 つの対象のみを評価：

$$|O_k| = 1, \quad {}^{\forall}k$$

などを含んでいる。ただし、$|\cdot|$ は集合の要素数を表す。

対象 m を評価した評価者のデータベクトルを

$$\boldsymbol{y}_{mk} = (y_{m1k}, y_{m2k}, \cdots, y_{mNk})^t, \quad k \in E_m \tag{3}$$

とする。すなわち、すべての評価項目について評価値が与えられているものとする。ただし、評価値は 5 段階評価などの「あいまいな」整数値を想定する。

3 ファジィ主成分分析

加重パラメータをファジィ化することによって

$$Z_p = A_{p1}y_1 + A_{p2}y_2 + \cdots + A_{pN}y_N \tag{4}$$

というファジィ主成分モデルを構築する。ここで、Z_p は第 p 主成分を表すファジィ数、A_{pn} は評価項目 n の加重を表すファジィ数、y_n は評価項目 n のクリスプな評価値を表している。ここでは、和多田・薮内 [1][2] の方法とは異なるアプローチを提案する。

3.1 平均主成分得点

対象 m についての評価者平均ベクトルを

$$\boldsymbol{y}_m = (y_{m1}, y_{m2}, \cdots, y_{mN})^t \tag{5}$$

とする。ただし、

$$y_{mn} = \frac{1}{|E_m|}\sum_{k\in E_m} y_{mnk}, \quad |E_m| > 0 \tag{6}$$

と定義する。平均データの分散共分散行列を

$$S = (s_{nn'})_{N\times N} \tag{7}$$

とする。ただし、

$$s_{nn'} = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}(y_{mn}-y_n)(y_{mn'}-y_{n'}) \quad (8)$$

$$y_n = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} y_{mn} \quad (9)$$

である。ここで、

$$\boldsymbol{y}_0 = (y_1, y_2, \cdots, y_N)^t \quad (10)$$

とおいて、$\boldsymbol{y}_{mk}-\boldsymbol{y}_0$, $\boldsymbol{y}_m-\boldsymbol{y}_0$ を改めて $\boldsymbol{y}_{mk}$, $\boldsymbol{y}_m$ とおく。

分散共分散行列の固有値・固有ベクトルを求める。

$$S\boldsymbol{a}_p = \lambda_p \boldsymbol{a}_p, \quad p = 1, 2, \cdots, N \quad (11)$$

ただし、

$$\boldsymbol{a}_p = (a_{p1}, a_{p2}, \cdots, a_{pN})^t; \quad \|\boldsymbol{a}_p\| = 1, \ {}^\forall p \quad (12)$$

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_N \geq 0 \quad (13)$$

とする。

以上から、平均データによる対象 m の第 p 主成分得点は

$$z_{pm} = \boldsymbol{a}_p^t \boldsymbol{y}_m \quad (14)$$

によって与えられる。上述のように、$\boldsymbol{y}_m$ は実際は評価者および対象に関する平均ベクトル $\boldsymbol{y}_0$ を引いたものであるから、$\boldsymbol{y}_0$ が主成分軸によって張られる空間の原点に写像される。

3.2 モデルの同定

ファジィベクトル

$$A_p = (A_{p1}, A_{p2}, \cdots, A_{pN})^t \quad (15)$$

のメンバシップ関数を以下のように同定する。

$$\mu_{A_p}(\boldsymbol{a}) = \exp\left\{-(\boldsymbol{a}-\boldsymbol{a}_p)^t D_{A_p}^{-1}(\boldsymbol{a}-\boldsymbol{a}_p)\right\} \quad (16)$$

ここに、メンバシップ関数の中心は分散共分散行列 S の固有ベクトル

$$\boldsymbol{a}_p = (a_{p1}, a_{p2}, \cdots, a_{pN})^t \quad (17)$$

によって定義している。

一方、広がりを担当する D_{A_p} は以下のように定める。まず、以下のベクトルを定義する。

$$\boldsymbol{b}_k = \frac{1}{|O_k|}\sum_{m\in O_k}(\boldsymbol{y}_{mk}-\boldsymbol{y}_m), \quad \boldsymbol{b} = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{b}_k \quad (18)$$

評価者 k 独自の加重パラメータ

$$\boldsymbol{a}_{pk} = (a_{p1k}, a_{p2k}, \cdots, a_{pNk})^t \quad (19)$$

を次式によって定義する。

$$\boldsymbol{a}_{pk} = \boldsymbol{a}_p + (\boldsymbol{b}_k - \boldsymbol{b}) \quad (20)$$

ここで、$\{\boldsymbol{a}_{pk}\}$ の分散共分散行列は、以下のように p について共通の行列になっている。

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}(\boldsymbol{a}_{pk}-\boldsymbol{a}_p)(\boldsymbol{a}_{pk}-\boldsymbol{a}_p)^t \\ &= \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}(\boldsymbol{b}_k-\boldsymbol{b})(\boldsymbol{b}_k-\boldsymbol{b})^t \end{aligned} \quad (21)$$

そこで、D_{A_p} を D_A と書き、

$$D_A = R \quad (22)$$

と定義する。

3.3 ファジィ主成分

クリスプな評価ベクトル $\boldsymbol{y}$ が与えられたとき、ファジィ主成分得点のメンバシップ関数は、拡張原理 [3][4] を適用して次式によって求めることができる。

$$\begin{aligned} \mu_{Z_{pm}}(z) &= \max\left\{\mu_{A_p}(\boldsymbol{a}) \mid z = \boldsymbol{a}^t\boldsymbol{y}\right\} \\ &= \exp\left\{-\frac{(z-\boldsymbol{a}_p^t\boldsymbol{y})^2}{\boldsymbol{y}^t D_A \boldsymbol{y}}\right\} \end{aligned} \quad (23)$$

対象 m の主成分得点の相対的なファジネスを主成分平面において表現することが可能である。ただし、第 p −第 q 主成分平面におけるファジィ主成分得点のメンバシップ関数は次式で定義する。

$$\begin{aligned} &\mu_{Z_{pm}\times Z_{qm}}(z_p, z_q) = \mu_{Z_{pm}}(z_p) \times \mu_{Z_{qm}}(z_q) \\ &= \exp\left\{-\frac{(z_p-\boldsymbol{a}_p^t\boldsymbol{y}_m)^2 + (z_q-\boldsymbol{a}_2^t\boldsymbol{y}_m)^2}{\boldsymbol{y}_m^t D_A \boldsymbol{y}_m}\right\} \end{aligned} \quad (24)$$

これを用いて

$$\left\{(z_p, z_q) \mid \mu_{Z_{pm}\times Z_{qm}}(z_p, z_q) \geq \alpha\right\} \quad (25)$$

という α-レベル集合を図示することによって相対的ファジィネスを表現することができる。

ただし、この方法はファジィネスが評価ベクトルの長さに依存するという問題がある。以下において、この点の修正を試みる。

3.4 あいまい性の数量化に関する考察

第 p −第 q 主成分平面におけるファジィ主成分得点の α-レベル集合は

$$\left(z_p - \boldsymbol{a}_p^t\boldsymbol{y}\right)^2 + \left(z_q - \boldsymbol{a}_q^t\boldsymbol{y}\right)^2 = \boldsymbol{y}^t D_A \boldsymbol{y} \times (-\log\alpha) \quad (26)$$

という円によって表される。拡張原理を用いる可能性線形モデルの１つの特長は、説明変数の絶対値が増加すれば可能性も広くなることである。

そこで、評価データベクトルの長さという要因を除去することを考える。まず

$$\left(z_p - \boldsymbol{a}_p^t\boldsymbol{y}\right)^2 + \left(z_q - \boldsymbol{a}_q^t\boldsymbol{y}\right)^2 = \frac{\boldsymbol{y}^t D_A \boldsymbol{y}}{\boldsymbol{y}^t\boldsymbol{y}} \times (-\log\alpha) \quad (27)$$

のように円の大きさを修正することが考えられる。しかし、ファジィネスの相対値を表示することが目的であるから、以下のような円を描くことを提案する。

まず、行列 D_A の最大と最小の固有値をそれぞれ $\lambda_{\max}(D_A)$, $\lambda_{\min}(D_A)$ とすれば

$$\lambda_{\min}(D_A) \le \frac{\boldsymbol{y}^t D_A \boldsymbol{y}}{\boldsymbol{y}^t\boldsymbol{y}} \le \lambda_{\max}(D_A) \quad (28)$$

であることに注意する。第 p −第 q 主成分平面における評価ベクトル $\boldsymbol{y}$ のファジィ主成分得点を

$$\left(z_p - \boldsymbol{a}_p^t\boldsymbol{y}\right)^2 + \left(z_q - \boldsymbol{a}_q^t\boldsymbol{y}\right)^2 = r^2 \quad (29)$$

という円によって表すこととし、半径 r を

$$\frac{r^2 - r_{\min}^2}{r_{\max}^2 - r_{\min}^2} = \frac{\lambda - \lambda_{\min}(D_A)}{\lambda_{\max}(D_A) - \lambda_{\min}(D_A)} \quad (30)$$

を満たすように求める。ただし、

$$\lambda = \frac{\boldsymbol{y}^t D_A \boldsymbol{y}}{\boldsymbol{y}^t\boldsymbol{y}} \quad (31)$$

であり、$r_{\max}, r_{\min}$ は最大および最小半径で、設計パラメータである。

4 ファジィ数量化理論 III 類モデル

評価対象、評価項目に対して、それぞれ

$$\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_M)^t \quad (32)$$

$$\boldsymbol{y} = (y_1, y_2, \cdots, y_N)^t \quad (33)$$

を導入する。数量化理論 III 類は、相関が最大になるように $\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}$ を求めることを目的としている。

以下では、評価者 k による対象 m の評価項目 n に関する評点を z_{mnk} と表記する。z_{mnk} は前節で y_{mnk} と表記したものと同じである。また、以下でも z_{mn}, p_{mn} という記号を用いるが前節のものとは関係がない。

4.1 数量化理論 III 類

まず、以下の z_{mn}, p_{mn} を定義する。

$$z_{mn} = \frac{1}{|E_m|}\sum_{k\in E_m} z_{mnk}, \quad p_{mn} = z_{mn} \Big/ \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} z_{mn} \quad (34)$$

以下の $M \times N$ 相関行列と、$p_{m\bullet}, p_{\bullet n}$ を定義する。

$$P = (p_{mn}), \quad p_{m\bullet} = \sum_{n=1}^{N} p_{mn}, \quad p_{\bullet n} = \sum_{m=1}^{M} p_{mn} \quad (35)$$

$\boldsymbol{x}$ と $\boldsymbol{y}$ の分散と共分散を以下のように定義する。

$$\sigma_x^2 = \sum_{m=1}^{M}\left(p_{m\bullet}x_m^2\right) - \left(\sum_{m=1}^{M} p_{m\bullet}x_m\right)^2 \quad (36)$$

$$\sigma_y^2 = \sum_{n=1}^{N}\left(p_{\bullet n}y_n^2\right) - \left(\sum_{n=1}^{N} p_{\bullet n}y_n\right)^2 \quad (37)$$

$$\sigma_{xy} = \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} p_{mn}x_m y_n - \sum_{m=1}^{M} p_{m\bullet}x_m \sum_{n=1}^{N} p_{\bullet n}y_n \quad (38)$$

これらの式から相関係数 ρ_{xy} を求める。

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x\sigma_y} \quad (39)$$

$\boldsymbol{x}$ と $\boldsymbol{y}$ の相関を最大にするために次式を解く。

$$\frac{\partial\rho_{xy}}{\partial\boldsymbol{x}} = 0, \quad \frac{\partial\rho_{xy}}{\partial\boldsymbol{y}} = 0 \quad (40)$$

これから、

$$\tilde{x}_m = \left(x_m - \sum_{m=1}^{M} p_{m\bullet}x_m\right) \Big/ \sigma_x \quad (41)$$

$$\tilde{y}_n = \left(y_n - \sum_{n=1}^{N} p_{\bullet n}y_n\right) \Big/ \sigma_y \quad (42)$$

で表される基準化された要素を持つ列ベクトル

$$\tilde{\boldsymbol{x}} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \cdots, \tilde{x}_M)^t, \quad \tilde{\boldsymbol{y}} = (\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \cdots, \tilde{y}_N)^t \quad (43)$$

と、２つの対角行列

$$P_x = \mathrm{diag}\,(p_{m\bullet}), \quad P_y = \mathrm{diag}\,(p_{\bullet n}) \quad (44)$$

を用いて、以下の連立方程式が得られる。

$$P\tilde{\boldsymbol{y}} - \rho_{xy}P_x\tilde{\boldsymbol{x}} = 0, \quad P^t\tilde{\boldsymbol{x}} - \rho_{xy}P_y\tilde{\boldsymbol{y}} = 0 \quad (45)$$

ここで、以下の記号を導入する。

$$A = P_x^{-1/2}PP_y^{-1}P^tP_x^{-1/2}, \quad \lambda = \rho_{xy}^2, \quad \boldsymbol{e} = P_x^{-1/2}\tilde{\boldsymbol{x}} \quad (46)$$

(45) 式からつぎの対称行列の固有値問題が得られる。

$$Ae = \lambda e \tag{47}$$

これを解いて

$$\tilde{\boldsymbol{x}} = P_x^{-1/2} e, \quad \tilde{\boldsymbol{y}} = \lambda^{-1/2} P_y^{-1} P^t \tilde{\boldsymbol{x}} \tag{48}$$

を得る。M 個の固有値

$$\lambda_1, \cdots, \lambda_M; \quad \lambda_1 = 1,\ \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_M \tag{49}$$

のうち、λ_1 を除いて次に大きい2つの固有値 λ_2, λ_3 に対応する固有ベクトルから求められる $\tilde{\boldsymbol{x}}_i$, $\tilde{\boldsymbol{y}}_i$ を

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_i = \begin{pmatrix} \tilde{x}_{i1} \\ \tilde{x}_{i2} \\ \vdots \\ \tilde{x}_{iM} \end{pmatrix}, \ \tilde{\boldsymbol{y}}_i = \begin{pmatrix} \tilde{y}_{i1} \\ \tilde{y}_{i2} \\ \vdots \\ \tilde{y}_{iN} \end{pmatrix}, \ i = 2, 3 \tag{50}$$

とする。ここで、

$$(\tilde{x}_{2m}, \tilde{x}_{3m}), \quad m = 1, 2, \cdots, M \tag{51}$$

$$(\tilde{y}_{2n}, \tilde{y}_{3n}), \quad n = 1, 2, \cdots, N \tag{52}$$

を2次元平面上にプロットし、それぞれの軸の意味を解釈する。以上が数量化理論 III 類の手法である。これに加えて、本稿では $\tilde{\boldsymbol{x}}_i$, $\tilde{\boldsymbol{y}}_i$ の散らばりを定義して、評価のあいまい性について考慮する。

4.2 評価のあいまい性のモデル化

評価者 k について以下の数量を定義する。

$$\tilde{x}_{mk} = \tilde{x}_m + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} (z_{mnk} - z_{mn}), \quad m \in O_k \tag{53}$$

$$\tilde{y}_{nk} = \tilde{y}_n + \frac{1}{|O_k|} \sum_{m \in O_k} (z_{mnk} - z_{mn}), \quad {}^{\forall}n \tag{54}$$

これらの散らばりを次式で定義する。

$$u_m^2 = \frac{1}{|E_m|} \sum_{k \in E_m} (\tilde{x}_{mk} - \tilde{x}_m)^2 \tag{55}$$

$$v_n^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} (\tilde{y}_{nk} - \tilde{y}_n)^2 \tag{56}$$

評価対象および評価項目に対する評価の相対的あいまい性 s_m, t_n をつぎのように定義する。

$$s_m = c_s \cdot u_m, \quad t_n = c_t \cdot v_n \tag{57}$$

ここで、s_m, t_n が

$$\sum_{m=1}^{M} s_m^2 = \sum_{n=1}^{N} t_n^2 = 1 \tag{58}$$

を満たすようにすれば、

$$c_s = \left(\sum_{m=1}^{M} u_m^2 \right)^{-1/2}, \quad c_t = \left(\sum_{n=1}^{N} v_n^2 \right)^{-1/2} \tag{59}$$

5 おわりに

感性評価データを解析するための新しいファジィ主成分分析手法とファジィ数量化理論 III 類について考察を行った。ファジィ化の方法として、感性評価における評価値の評価者によるバラツキをできるだけ忠実に主成分得点に反映させようとしたものである。あいまいさの絶対値を考えることは不可能であるから、本稿では相対的ファジィネスという概念を導入した。

参考文献

[1] J. Watada and Y. Yabuuchi: Fuzzy principal component analysis and its application to company evaluation. Proc. Japan-Brazil Joint Sympo. on Fuzzy Systems, Campinas and Manaus, Brazil, July 19-27, 1994.

[2] Y. Yabuuchi and J. Watada: Fuzzy principal component analysis and its application. Journal of Biomedical Fuzzy Systems Association, Vol. 3, No. 1, pp. 83-92, 1997.

[3] L. A. Zadeh: The concept of a linguistic variables and its application to approximate reasoning, part 1; *Information Sciences*, Vol. 8, pp. 199-249, 1975.

[4] 田中英夫: ファジィモデリングとその応用; システム制御情報学会編, 朝倉書店, 1990.

連絡先

領家 美奈
〒 112-0012 東京都文京区大塚 3-29-1
筑波大学大学院ビジネス科学研究科
Tel: 03-3942-6889, Fax: 03-3942-6829
Email: ryoke@gssm.otsuka.tsukuba.ac.jp

カリフォルニアにおける電力価格の変動分析

The Analysis of Electricity Market Price in California

平野　修*，菅家　正康:**，小沢　和浩***

*法政大学大学院社会科学研究科，**（株）明電舎，***法政大学比較経済研究所

Osamu Hirano*, Masayasu Kanke**, and Kazuhiro Ozawa***

*Division of Social Sciences, Graduate School of Hosei University

**Meidensha Corporation

***Institute of Comparative Economic Studies, Hosei University

Abstract: In this paper, we analyze the price of electricity spot market in California. We identify the electricity demand is related to temperature using possibility regression analysis. Then we show the fluctuation of electricity price is influenced by the demand. And we show that the expectation (speculative buying) of the market participant which is formed by temperature fluctuation induced the price volatility.

I　はじめに

カリフォルニア電力市場は 1998 年 4 月から 2001 年 3 月まで自由化されていた。そこでは電力需要に対する供給能力の低さから、電力需要が逼迫すると見られる時には、市場参加者がその電力需要増に対して非常に高い価格をつけるという行動が夏季において観察されていた。このような行動は電力需要の急増が見込まれると市場参加者が考える時、彼らが自らの利潤を最大化するために高い価格をつけることから引き起こされると考えられる。

この論文の目的はその市場参加者の行動を分析することで、価格付け行動によって引き起こされる価格変動を予測することにある。

II　カリフォルニア電力市場における価格モデル

A　電力需要モデル

電力需要に関しては気温が需要を決定するとし、気温を説明変数とした 2 次の OLS によって推計する ((1) 式)。その最大電力需要を予測するために必要なパラメータの最高気温を可能性回帰により予測をしておく。これを行った結果が (2) 式である。以上から得られた電力最高需要の可能性を図 2 に示す。

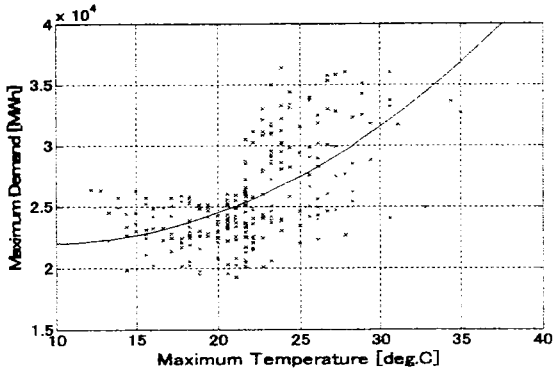


図 1　最大電力需要と最高気温

$$D=(23.06)Temp^2+(-442.73)Temp+240982$$

D : *Maximum Demand* [MWh]

$$Temp : \textit{Maximum Temperature}\ [\text{deg. C}] \quad (1)$$

$$Temp=A_0+A_1\cdot\sin(2\pi d/T)+A_2\cdot\cos(2\pi d/T)$$

$$A_0 : \langle 23.87, 8.28\rangle$$
$$A_1 : \langle 4.24, 0.0\rangle$$
$$A_2 : \langle -2.55, 1.43\rangle \quad (2)$$

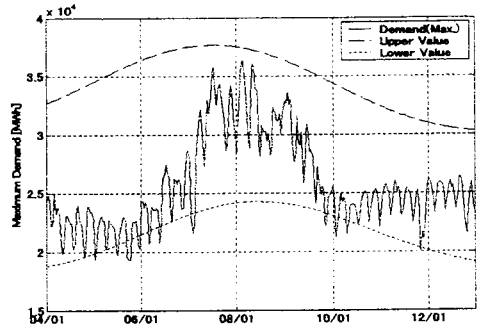


図 2 最高電力需要の可能性

B　気温による価格決定メカニズム

電力価格が高騰するには、最高気温が高く、さらに最高気温が急激に上昇する際に顕著であることが図 3 より分かる。この時の価格と気温の間を以下の (3) 式で決める。

$$P(t)=P_0(Temp)+\sum_{k=1}PA_k(Temp)\sin(\omega_k t)+\sum_{k=1}PB_k(Temp)\cos(\omega_k t), \quad (3)$$

$$P_0(x) = PB_0(Temp),$$

$$P_k(Temp) = \sqrt{PA_k(Temp)^2 + PB_k(Temp)^2},$$

$$\varphi_k(Temp) = \tan^{-1}\frac{PA_k(Temp)}{PB_k(Temp)},$$

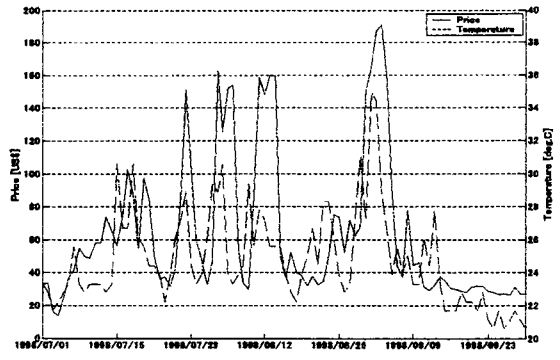


図3　最高気温と価格の間の関係

また図3において顕著な気温と価格の間の関係をIF−THENルールを用いて場合分けを行う。

R_1:　IF　*Temp*　is　*low*

THEN $P = PB_0(Temp) + PA_1(Temp)\sin(\omega_1 t) + PB_1(Temp)\cos(\omega_1 t)$

R_2:　IF　*Temp*　is　*high*

AND $\frac{dTemp}{dt}$　is　*high*

THEN $P = PB_0(Temp) + PA_1(Temp)\sin(\omega_1 t) + PB_1(Temp)\cos(\omega_1 t)$

R_3:　IF　*Temp*　is　*high*

AND $\frac{dTemp}{dt}$　is　*not*　*high*

THEN $P = PB_0(Temp) + PA_1(Temp)\sin(\omega_1 t) + PB_1(Temp)\cos(\omega_1 t)$

以上のルールを用いることで、市場参加者が気温の急激な変動に基づいて価格付け行動を変更することを定義した。以下にこのルールを用いて価格予測を行った結果を図4に示す。なお、このときの（3）式の推計パラメータは次の通りである。

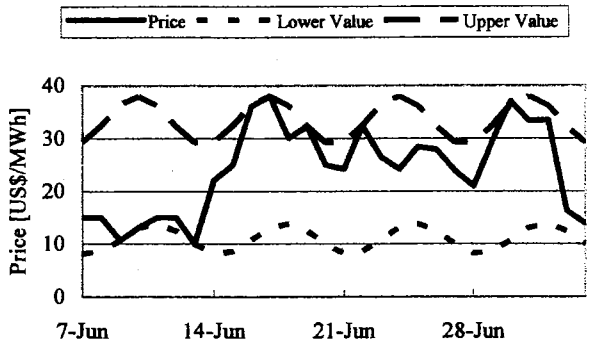


図4　気温上昇時の価格予想（7/12−8/1）

III　結論

カリフォルニア州の電力市場を分析することで電力需要が急上昇する際には気温が上がるという関係を示し、その気温上昇による電力需要急増を見込んだ市場参加者の行動によって、価格高騰が引き起こされることが分かった。また、基本となる気温と電力需要の関係を可能性回帰分析を用いて示した。さらに、気温が急激に上がる場合の関係をIF-THENルールを用いることで表現可能にした。そして図4で示したように、実際のデータから気温を説明変数とした電力価格予測を行い、市場参加者の価格付け行動をモデル化することができた。

参考文献

[1] J.Kacprzyk and M.Fedrizzi, FUZZY REGRESSION ANALYSIS, OMNITECH PRESS (1992)

[2] S. Hunt, G. Shuttleworth, et al, "Power Brokers, Utilities brace for new competition", *IEEE Spectrum*, Vol. 33, No. 7. pp.20-33, (1996)

[3] K.Ozawa, T. Nimura and T.nakashima, "Fuzzy Time-Series Model of Electric Power Consumption" Journal of Advanced Journal of Advanced Computational Intelligence, Vol 4, No.3,pp188-194, (2000)

[4] "California's Power Crisis", The Economist, January, 20th, pp.57-59, (2001)

[5] T.Niimura and T.Nakashima, Deregulated Electricity Market Data Representation by Fuzzy Regression Models, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., (C), Vol. 31, No.3, pp.320-326, (2002)

[6] Meteorological Database CD-ROM (2000), Japan Meteorological Agency

連絡先

〒194-0298　東京都町田市相原町4342

e-mail: ohirano@mt.tama.hosei.ac.jp

Tell 042-783-2610

移動ウェーブレット変換により分割した時系列データのカオス予測

Chaotic Forecast of Divided Time-Series Data by Moving Wavelet Transform

松本　義之(東和大学)　和多田淳三(早稲田大学)
Yoshiyuki Matsumoto(Tohwa University)　Junzo Watada(Waseda University)

Abstract: Recently, the chaotic method is employed to forecast a short-term future using uncertain data. This method makes it possible by restructuring the attractor of given time-series data in the multi-dimensional space through Takens' embedding theory. However, it is not applied to economical time-series data without a chaotic characteristic. In other words, it is hard to forecast the future trend of the economical data on the basis of chaotic theory. In this paper, Time-series data are divided using Wavelet Transform. And we judge whether the divided time-series data are chaotic or not based on correlation dimension. If the chaos character of the divided time-series data is high, it can make use of it for the improvement of the forecast precision.

1．はじめに

カオスによる時系列データの短期予測[1][2]は、これまでの手法では予測不可能であった時系列データを予測可能にしてきた。しかし、カオス特性の低い多くのデータについては、予測が困難である。これらの時系列データは、全体としてはカオス特性が低いが、部分的に見ればカオス特性が高い可能性がある。そこで本研究では、ウェーブレット変換[3]により時系列データの分割を行い、その分割した時系列データについてカオスの予測を行う。分割した時系列データのカオス特性が高ければ、時系列データを分割することにより、予測精度を向上させることが可能になると思われる。

また、予測したデータを元のオリジナルデータに逆変換するため、移動しながらウェーブレット変換を行う。これは、分割された時系列データは、時間間隔が不揃いなため、予測後のデータをオリジナルのデータに逆変換できない。そこで、移動しながらウェーブレット変換を行い、逆変換を可能にする。

2．ウェーブレット変換

ウェーブレット変換とは、信号を時間と周波数の両面から同時に特定できる時間周波数解析である。関数 $f(x)$のマザーウェーブレット $\phi(x)$によるウェーブレット変換は次のように定義される。

$$(W_{\psi}f)(b,a)=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{|a|}}\overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)}f(x)dx$$

ここでの a はマザーウェーブレットのスケールを表し、b はトランスレートを表す。また、$\overline{\psi(x)}$は複素共役を示す。

このウェーブレット変換は、信号の性質を知るのに有益な方法であるが、必ずしも効率的な方法とはいえない。なぜなら信号には最小単位があり、この方法では重複した多くの情報を表示することになる。しかし、これは座標を離散化することによって解決できる。座標$(b,1/a)=(2^{j}k,2^{j})$とおくと、この離散ウェーブレット変換は、

$$d_k^{(j)}=2^{j}\int_{-\infty}^{\infty}\overline{\psi(2^{j}x-k)}f(x)dx$$

となり、逆変換は

$$f(x)\sim\sum_{j}\sum_{k}d_k^{(j)}\psi(2^{j}x-k)$$

となる。この式の右辺にある2重和の1つを

$$g_j(x)=\sum_{k}d_k^{(j)}\psi(2^{j}x-k)$$

と書き、また

$$f_j(x)=g_{j-1}(x)+f_{j-1}(x)$$

と書くことにする。これは元の信号をウェーブレット成分$g_{j-1}(x)$に分解したことを意味する。この解析は多重解像度解析と呼ばれる。

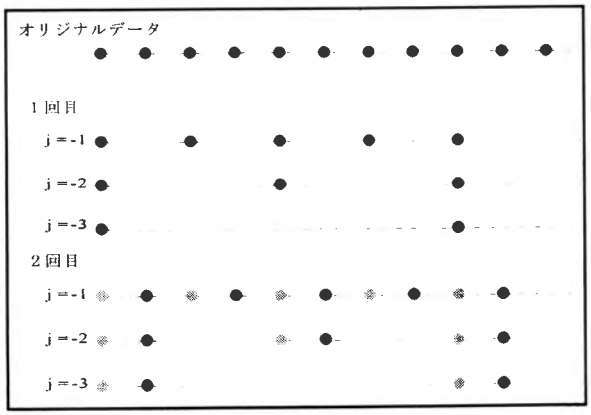


図1 移動ウェーブレット変換

3．移動ウェーブレット変換

時系列データをウェーブレット変換で分解すると、j=-1 では 1/2、j=-2 では 1/4 というようにデータ数が減少する。それにともなって、データの間隔は2倍、4倍というように増えていく。これはウェーブレット変換が、j の値が小さくなるにつれて低周波数の成分が出てくるためである。しかし、カオスで予測した時系列データを逆ウェーブレット変換で、元の時系列データに変換するとき、逆変換が不可能になってしまう。

そこで、本研究では、ウェーブレット変換の始点と終点を移動させながら、変換を行う。本研究では、これを移動ウェーブレット変換と呼んでいる。移動しながら、ウェーブレット変換を行うことにより、予測した時系列データを逆ウェーブレット変換で元の時系列データに戻すことが可能となる。

例えば、オリジナルの時系列データを j=-3 までウェーブレット変換する。(図1) この場合、j=-1 のデータ数は 1/2、j=-2 のデータは 1/4、j=-3 のデータは 1/8 になってしまう。そこで、始点を移動して、2回目のウェーブレット変換を行う。この手法により、間のデータを補完し、カオスで予測したデータをオリジナルデータに逆変換することを可能とする。

4．逆ウェーブレット変換を使用した予測

ここでは、逆ウェーブレット変換を使用したカオスによる短期予測について述べる。時系列データに対して、ウェーブレット変換を行うと、各周波数帯域に分割される。分割した時系列データは、分割前の時系列データに比べて、予測しやすくなっている。そこで分割した時系列データに対して予測を行い、予測した時系列データを逆ウェーブレット変換によりオリジナルの時系列データに戻す。この手法により、分割せずに予測を行うよりも、予測精度を向上させることが可能になると思われる。

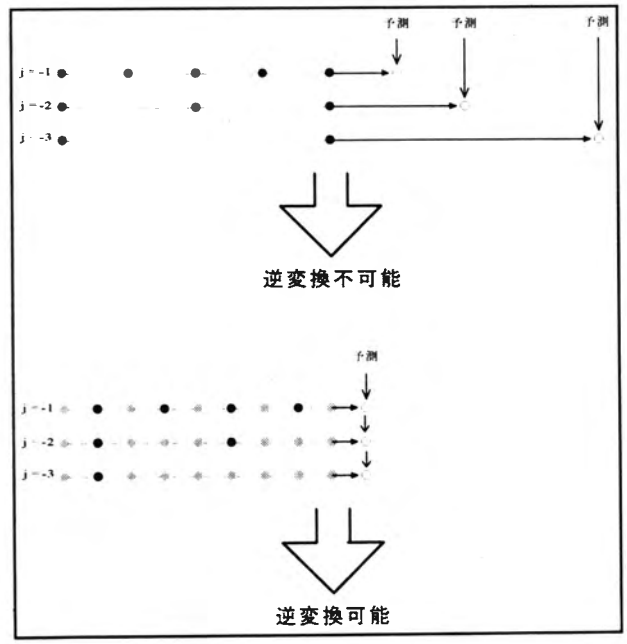


図2 逆ウェーブレット変換による予測

ただし、カオスによる予測は、基本的には 1 期先を予測する。ところが、ウェーブレット変換により分割された時系列データは、それぞれの周波数帯域に分割されるため、1 期の大きさ(時間間隔:τ)が異なる。そのため、予測した時系列データをオリジナルの時系列データに逆ウェーブレット変換することができない。そこで、前述した移動ウェーブレット変換を行い、移動しながらウェーブレット変換をおこなう。それにより、逆ウェーブレット変換でオリジナルの時系列データに復元してやることが可能となる。

参考文献

[1]合原一幸，徳永隆治:カオス応用戦略，オーム社，(1993)
[2]松本義之，和多田淳三:関連データを同時に埋め込んだカオスによる短期予測に関する研究，日本経営工学会，Vol.49, No.4, pp.209-218(1998)
[3]榊原進:ウェーブレットビギナーズガイド，東京電機大学出版局(1995)

連絡先

〒815-8510 福岡市南区筑紫丘1－1－1
東和大学 電気工学科マルチメディア工学コース
松本 義之
Tel.092-541-1511 ex.379
e-mail : matchan@tohwa-u.ac.jp

ファジィランダム多目的線形計画問題に対する可能性測度と必然性測度を用いた確率最大化モデルに基づく対話型ファジィ満足化手法

An interactive fuzzy satisficing method through a probability maximization model using possibility and necessity measures for a fuzzy random multiobjective linear programming problem

片桐 英樹 Hideki KATAGIRI 広島大学 Hiroshima University
坂和 正敏 Masatoshi SAKAWA 広島大学 Hiroshima University
加藤 浩介 Kosuke KATO 広島大学 Hiroshima University
大崎 修嗣 Syuuji OHSAKI NECシステムテクノロジ（株）

Abstract In this paper, we focus on multiobjective linear programming problems where the coefficients of objective functions are fuzzy random variables. After introducing fuzzy goals to consider the fuzziness of the decision maker's judgement for objective functions and formulating the problem based on the probability maximization model in stochastic programming, we propose an interactive fuzzy satisficing method for fuzzy random multiobjective linear programming problems in order to derive a satisficing solution through the interaction.

1 はじめに

これまで，不確実性あるいはあいまい性を伴う状況下での意思決定問題に対しては，主に確率計画的アプローチ [1] とファジィ計画的アプローチ [2] の 2 つが考えられ，発展してきた．しかし，現実には専門家があるパラメータを見積もる際に「確率 p でだいたい m これぐらい」という形でファジィ性とランダム性を同時に情報としてもっている場合もある．このようなパラメータを表すのに有用な概念としてファジィランダム変数 [3] が考えられ，近年，線形計画問題や多目的計画問題など数理計画問題への応用がなされている [4, 5].

本研究では，ファジィランダム変数係数を目的関数に含む場合に対して，可能性測度および必然性測度 [6] の概念と確率計画法における確率最大化モデルに基づいて定式化を行った後，意思決定者の満足解を対話を通して導出する対話型ファジィ満足化手法を提案する．

2 ファジィランダム多目的線形計画問題

次のような多目的線形計画問題を考える．

$$\left.\begin{array}{ll}\min & \tilde{\tilde{\boldsymbol{C}}}_i\boldsymbol{x}, \quad i=1,\ldots,k \\ \text{s. t.} & \boldsymbol{x}\in X \triangleq \{\boldsymbol{x}\in\mathbb{R}^n | A\boldsymbol{x}\le \boldsymbol{b},\ \boldsymbol{x}\ge \boldsymbol{0}\}\end{array}\right\} \quad (1)$$

ただし，$\boldsymbol{x}$ は n 次元決定変数列ベクトル，A は $m\times n$ 係数行列，$\boldsymbol{b}$ は m 次元列ベクトルである．また，$\tilde{\tilde{\boldsymbol{C}}}_i = (\tilde{\tilde{C}}_{i1},\ldots,\tilde{\tilde{C}}_{in})$, $i=1,\ldots,k$ は，次のメンバシップ関数により特性づけられるファジィランダム変数を要素とするベクトルである．

$$\mu_{\tilde{\tilde{C}}_{ij}}(t) = \begin{cases} L\left(\dfrac{\bar{d}_{ij}-t}{\bar{\alpha}_{ij}}\right) & (t\le \bar{d}_{ij}) \\ R\left(\dfrac{t-\bar{d}_{ij}}{\bar{\beta}_{ij}}\right) & (t\ge \bar{d}_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで，$L(t)$ および $R(t)$ は，$[0,\infty)\to[0,1]$ を満たす単調非増加連続関数とし，また $\bar{\boldsymbol{d}}_i, \bar{\boldsymbol{\alpha}}_i, \bar{\boldsymbol{\beta}}_i, i=1,\ldots k$ はそれぞれ，平均値 m_i である確率変数 $\bar{t}_i$ によって，$\bar{\boldsymbol{d}}_i = \boldsymbol{d}_i^1 + \bar{t}_i\boldsymbol{d}_i^2$, $\bar{\boldsymbol{\alpha}}_i = \boldsymbol{\alpha}_i^1 + \bar{t}_i\boldsymbol{\alpha}_i^2$, $\bar{\boldsymbol{\beta}}_i = \boldsymbol{\beta}_i^1 + \bar{t}_i\boldsymbol{\beta}_i^2$ と表される n 次元確率変数行ベクトルとする．

このとき，目的関数を表すファジィランダム変数 $\tilde{\tilde{Y}}_i$ は次のようなメンバシップ関数に特性づけられる．

$$\mu_{\tilde{\tilde{Y}}_i}(y) = \begin{cases} L\left(\dfrac{\bar{\boldsymbol{d}}_i\boldsymbol{x}-y}{\bar{\boldsymbol{\alpha}}_i\boldsymbol{x}}\right) & (y\le \bar{\boldsymbol{d}}_i\boldsymbol{x}) \\ R\left(\dfrac{y-\bar{\boldsymbol{d}}_i\boldsymbol{x}}{\bar{\boldsymbol{\beta}}_i\boldsymbol{x}}\right) & (y\ge \bar{\boldsymbol{d}}_i\boldsymbol{x}) \end{cases} \quad (3)$$

ここで，ファジィ目標が満たされる可能性の度合いは，

$$\Pi_{\tilde{\tilde{Y}}_i}(\tilde{G}_i) = \sup_y \min\left\{\mu_{\tilde{\tilde{Y}}_i}(y),\ \mu_{\tilde{G}_i}(y)\right\} \quad (4)$$

で与えられるため，ファジィ目標が満たされる可能性の度合いを最大化する問題は次のように定式化される．

$$\left.\begin{array}{ll}\max & \Pi_{\tilde{\tilde{Y}}_i}(\tilde{G}_i), \quad i=1,\ldots,k \\ \text{s. t.} & \boldsymbol{x}\in X\end{array}\right\} \quad (5)$$

問題 (5) では，$\mu_{\tilde{\tilde{Y}}_i}(y)$ の値が確率的に変動するために，目的関数である $\Pi_{\tilde{\tilde{Y}}_i}(\tilde{G}_i)$ の値も確率的に変化する．したがって，本研究では，確率最大化モデルに基づいて，ファジィ目標が満たされる満足度がある志望水準 h_i 以上であるという確率を最大化するという次の問題を考える．

$$\left.\begin{array}{ll}\max & Pr[\Pi_{\tilde{\tilde{Y}}_i}(\tilde{G}_i)\ge h_i], \quad i=1,\ldots,k \\ \text{s. t.} & \boldsymbol{x}\in X\end{array}\right\} \quad (6)$$

問題 (6) の目的関数において，

$$\sup_y \min\left\{\mu_{\tilde{\tilde{Y}}_i}(y),\ \mu_{\tilde{G}_i}(y)\right\} \ge h_i$$
$$\Longleftrightarrow \{\bar{\boldsymbol{d}}_i - L^*(h_i)\bar{\boldsymbol{\alpha}}_i\}\boldsymbol{x} \le \mu^*_{\tilde{G}_i}(h_i)$$

が成り立つため，全ての $\boldsymbol{x} \in X$ に対して，$\{\boldsymbol{d}_i^2 - L^*(0)\boldsymbol{\alpha}_i^2\}\boldsymbol{x} > 0$, $i = 1, \ldots, k$ であるとすると，(6) は

$$\left.\begin{array}{ll} \max & p_i(\boldsymbol{x}),\ i = 1, \ldots, k \\ \text{s. t.} & \boldsymbol{x} \in X \end{array}\right\} \tag{7}$$

という確定的な多目的計画問題に等価的に書き換えられる．ただし，

$$p_i(\boldsymbol{x}) = T_i\left(\frac{\{L^*(h_i)\boldsymbol{\alpha}_i^1 - \boldsymbol{d}_i^1\}\boldsymbol{x} + \mu_{\tilde{G}_i}^*(h_i)}{\{\boldsymbol{d}_i^2 - L^*(h_i)\boldsymbol{\alpha}_i^2\}\boldsymbol{x}}\right)$$

$$L^*(h_i) = \sup\{r | L(r) > h_i, r \geq 0\}$$

$$\mu_{\tilde{G}_i}^*(h_i) = \sup\{r | \mu_{\tilde{G}_i}(r) \geq h_i\}$$

としている．

2.1 対話型ファジィ満足化手法

以下では，多目的計画問題 (7) に対して，意思決定者の満足解を導出するために Sakawa らによって提案された対話型ファジィ満足化手法 [2] の適用を試みる．まず，(7) の各目的関数 $p_i(\boldsymbol{x})$ に対して，「$p_i(\boldsymbol{x})$ をだいたいある値以上にしたい」というファジィ目標を考え，さらに各ファジィ目標の達成度に対する意思決定者の志望水準を反映した基準メンバシップ値 $\bar{\mu}_i$, $i = 1, \ldots, k$ を導入した次のミニマックス問題

$$\left.\begin{array}{ll} \min & \max\limits_{i=1,\ldots,k}\{\bar{\mu}_i - \mu_i(p_i(\boldsymbol{x}))\} \\ \text{s. t.} & \boldsymbol{x} \in X \end{array}\right\} \tag{8}$$

を考える．問題 (8) は，補助変数 v を用いると等価的に

$$\left.\begin{array}{ll} \min & v \\ \text{s. t.} & \dfrac{\{L^*(h_i)\boldsymbol{\alpha}_i^1 - \boldsymbol{d}_i^1\}\boldsymbol{x} + \mu_{\tilde{G}_i}^*(h_i)}{\{\boldsymbol{d}_i^2 - L^*(h_i)\boldsymbol{\alpha}_i^2\}\boldsymbol{x}} \\ & \geq T_i^*(\mu_i^*(\bar{\mu}_i - v)),\ i = 1, \ldots, k \\ & \boldsymbol{x} \in X \end{array}\right\} \tag{9}$$

と変形される．ただし，

$$\mu_i^*(s) = \inf\{r | \mu_i(r) > s\}, \quad i = 1, \ldots, k$$

$$T_i^*(u) = \inf\{r | T_i(r) > u\}, \quad i = 1, \ldots, k$$

とした．問題 (9) において，最小の v を求めることは実行可能解が存在する最小の v を求めることと等価であり，v を固定したときの実行可能解の存在は，2 段階シンプレックス法の第 1 段を用いることによって調べることができる．したがって，(9) を解くためには，v の値を 2 分法のアルゴリズムにより離散的に変化させて，制約式を満たす解が存在する最小の v の値を求めればよい．以上より，(8) において，基準メンバシップ値がある値に固定されている場合の解法が示された．

対話過程において，意思決定者は，自己の志望水準を反映して基準メンバシップ値を設定し，解かれた問題の最適解や目的関数値から満足できるかどうかを判断する．そして，満足できる場合は終了し，満足できない場合は基準メンバシップ値を設定し直して満足できるまで繰り返す．

3 おわりに

本研究では，ファジィランダム多目的線形計画問題に対して，目的関数に対するファジィ目標を導入し，その目標が満たされる可能性の度合いを最大化する問題を確率計画法における確率最大化モデルに基づいて定式化した．さらに意思決定者の満足解を導出するための対話型ファジィ満足化手法を提案した．また，ここでは述べなかったが，必然性の度合いを最大化する問題に対しても同様の手法が適用できる．

参考文献

[1] A. Charnes, W.W. Cooper, Deterministic equivalents for optimizing and satisficing under chance constraints, *Operations Research*, **11**, 18–39 (1963).

[2] M. Sakawa, *Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization*, Plenum Press, New York, (1993).

[3] M.L. Puri, and D.A. Ralescu, Fuzzy random variables, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, **114**, 409–422 (1986).

[4] Z. Qiao, Y. Zhang and G. Wang, On fuzzy random linear programming, *Fuzzy Sets and Systems*, **65**, 31–49 (1994).

[5] M.K. Luhandjula, and M.M. Gupta, On fuzzy stochastic optimization, *Fuzzy Sets and Systems*, **81**, 47–55 (1996).

[6] L.A. Zadeh, Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility, *Fuzzy Sets and Systems*, **1**, 3–28 (1978).

[問い合わせ先]

〒 739-8527
東広島市鏡山 1 丁目 4 番 1 号
広島大学大学院工学研究科複雑システム工学専攻
片桐 英樹
Tel: 0824-24-7701
Fax: 0824-22-7195
E-mail: katagiri@msl.sys.hiroshima-u.ac.jp

正規分布に従う確率変数を含む割当問題

An Algorithm For Assignment Problem With Normal Distributed Variables

○ 山川　あす香，一森　哲男
A.Yamakawa, T.Ichimori
福島学院大学，大阪工業大学
Fukushima College, Osaka Institute of Technology

Abstract : This paper treats a program referred to as normal distribution programming. Most of combinatorial optimization problems are formulated, assuming that problem coefficients are all deterministic. However, some coefficients might be approximate to the real values. In this paper, we assume that some coefficients are independent random variables according to the normal distributions. We formulate this program and propose an efficient algorithm.

1. はじめに

多くの組合せ最適化問題は，変数の係数がすべて確定的であるという仮定のもとで定式化を行い，解法してきた．しかし，実際問題，すべての係数の値を正確に知ることなどほとんどできない．つまり，一般的に変数の係数は不確定な場合が非常に多い．

本研究では，各係数が各々独立でかつ平均と分散を与えた正規分布に従う確率変数と仮定して議論を進める [1]．しかし，これらの問題は項目数が増えるにしたがって，解を求めることが非常に難しくなる．

そこで，本研究では，平均と分散が与えられた場合の組み合わせ最適化問題の定式化を行い，割当問題へ適用されることを示す．

2. 問題の定式化

いま，項目が n 個あり，それらの項目は正規分布から独立に選択され，それに基づいて重みづけの値が求まるとする．但し，正規分布は平均 μ_j，分散 σ_j^2 に従う分布であり，$N(\mu_j, \sigma_j^2)$ で表記される．このとき，項目 j の確率変数を X_j とすると，$X_j \in N(\mu_j, \sigma_j^2)$ となる．

従って，本研究で述べる正規分布に従う確率変数を含む割当問題は次のように定式化される．

$$(\mathrm{P}_0) \qquad \min_{S\in\mathcal{F}} \quad z$$

$$\Pr\left(\sum_{j\in S} X_j \le z\right) \ge \alpha. \tag{1}$$

ここで，α は選択された項目の重みづけの値の総和が z 以下である確率を表しており，一般的には意思決定者がこの値を設定する (例えば，0.95 あるいは 0.975 等)．

さて，$\mathcal{F}$ をある条件を満たす $\{1,\ldots,n\}$ の部分集合の族，S を $\mathcal{F}$ の 1 つの部分集合とする．ここでは S は実行可能な選択肢とする．例えば，$\mathcal{F}$ を n 人の作業員に m 種の仕事をそれぞれ一つずつ割当てる場合のすべての割当て集合とすると，S はある 1 つの割当てを表すものである．

問題 (P_0) は [2] より比較的容易な問題に変えることができる．いま，制約条件式の左辺の確率を示す変数 $(\sum_{j\in S} X_j \le z)$ を次式のように書き直す．

$$\frac{\sum_{j\in S} X_j - \sum_{j\in S} \mu_j}{\sqrt{\sum_{j\in S} \sigma_j^2}} \le \frac{z - \sum_{j\in S} \mu_j}{\sqrt{\sum_{j\in S} \sigma_j^2}}. \tag{2}$$

式 (2) の左辺は確率変数であり，特に，標準正規分布 $N(0,1)$ を表している．また，右辺は確定値であり，その値を K_α とすると次式を得る．

$$z = \sum_{j\in S} \mu_j + K_\alpha \sqrt{\sum_{j\in S} \sigma_j^2}.$$

よって，(1) 式の問題は次のように再定式化ができる．

$$(\mathrm{P}) \qquad \min_{S\in\mathcal{F}} \quad \sum_{j\in S} \mu_j + K_\alpha \sqrt{\sum_{j\in S} \sigma_j^2}.$$

これはすべての割当ての中で，総コストが最小となる解を見つける問題である．

3. 割当問題への適用

LP 問題の中には，シンプレックス法および輸送の手法を用いると莫大な量の計算を要するのに反し，ある手法によれば簡単に解きうる問題がある．その一つがいわゆる割当問題であって，一般的に言えば，n 人の作業員と m 種の仕事が与えられるとき，各作業員にそれぞれただ一つの仕事を割当てて，与えられた有効さの測度が最適になるようにする問題である．

いま，4 つ (J1〜J4) の仕事を作業員 4 人 (A〜D) に割当てるとする．仕事は一人の人間しかすることができないが，誰でもどの仕事にもつくことはできる．し

かし，同じ仕事でも異なる作業員が行うとコストが異なる．表1は各作業員がそれぞれの仕事に要するコストの平均 (μ_i) と分散 (σ_i) を示している．

表 1: 作業員が各仕事に要するコストの平均と分散

	A	B	C	D
J1	$(0.00, 0.27^2)$	$(0.56, 1.09^2)$	$(0.19, 0.44^2)$	$(0.81, 0.50^2)$
J2	$(0.59, 2.97^2)$	$(0.48, 1.34^2)$	$(0.35, 0.36^2)$	$(0.90, 0.01^2)$
J3	$(0.82, 0.03^2)$	$(0.75, 1.13^2)$	$(0.17, 1.60^2)$	$(0.86, 1.71^2)$
J4	$(0.71, 1.81^2)$	$(0.51, 1.82^2)$	$(0.30, 0.50^2)$	$(0.02, 1.99^2)$

ここで，$\alpha = 0.975$ のとき，$K_\alpha = 1.96$ を得る．すべての組合せに対する重みづけの値 $(\sum_{j\in S}\mu_j + K_\alpha\sqrt{\sum_{j\in S}\sigma_j^2})$ を計算することで，正規分布に従う確率変数を含む割当問題における最適な割当てを見つけることができる．この例では，表2に示すような24通りの割当てが考えられる．

表 2: 各仕事の割当とそのときの総コスト $(K_\alpha = 1.96)$

	仕事 (J1,J2,J3,J4) への割当	総コスト
1	(A,B,C,D)	6.34
2	(A,B,D,C)	6.05
3	(A,C,B,D)	5.69
⋮	⋮	⋮
24	(D,C,B,A)	6.96

この例の最適解は (J1-A, J2-D, J3-B, J4-C) であり，そのときの総コストは4.43を得る．しかし，この方法では作業員や仕事数が多くなるにしたがって利用できなくなる．次に，正規分布に従う確率変数を含む割当問題 (P) に対する効率的な解法を提案する．

4. パラメトリックな組合せ最適化問題と解法アルゴリズム

次のようなパラメトリックな正規分布に従う確率変数を含む組合せ最適化問題 (Q_t) を定義する．

$$(Q_t)\quad \min_{S\in\mathcal{F}} \quad \sum_{j\in S}\mu_j + t\sum_{j\in S}\sigma_j^2 = \sum_{j\in S}(\mu_j + t\sigma_j^2).$$

定理 1. S^* を問題 (P) に対する最適選択とする．このとき，$t = \dfrac{K_\alpha}{2\sqrt{\sum_{j\in S^*}\sigma_j^2}}$ に対して，問題 (Q_t) の最適選択 S_t^* は元の問題 (P) の最適選択である．

次に，効率的な解法アルゴリズムを以下に示す．但し，$v_{\max} = \min_{S\in\mathcal{F}} v(S)$, $v_{\min} = \max_{S\in\mathcal{F}} v(S)$ とする．

Algorithm (OPT_NORM)

1.Set $t^A = \frac{K_\alpha}{2\sqrt{v_{\min}}}$, and obtain $S^A, A = (v(S^A), m(S^A)), m_A$.
Set $t^B = \frac{K_\alpha}{2\sqrt{v_{\max}}}$, and obtain $S^B, B = (v(S^B), m(S^B)), m_B$.
Set $D = \emptyset$.
2. Set $U = \min\{z(S^A), z(S^B)\}$.
3. Set $T =$ (point defining U).
4. Find the intersection point H of m_A and m_B.
5. **if** $L(H) < U$ **then**
6. $D = D \cup \{\triangle AHB\}$.
7. $D = D - \{\triangle AHB\}$.
8. **if** $L(H) < U$ **then**: S^* might be strictly inside $\triangle AHB$.
9. Set $t^C = \frac{1}{2}$(the slope of $\overline{AB}$) and obtain S^C, C, m_C.
10. **if** C does not exist on $\overline{AB}$ **then**
11. Revise $U = \min\{U, z(S^C)\}$.
12. $T =$ (point of defining U).
13. Find the intersection point I of m_A and m_C.
Find the intersection point J of m_B and m_C.
14. **if** $L(I) < U$ and $t^A < t^I < t^C$ **then** $D = D \cup \{\triangle AIC\}$.
15. **if** $L(J) < U$ and $t^B < t^J < t^C$ **then** $D = D \cup \{\triangle CJB\}$.
endif
endif
16. **if** $D = \emptyset$ **then**
17. Output T and stop: $T = S^*$
else
18. Select one triangle out of D, let the triangle be $\triangle AHB$.
Return to **step 7**.
endif
else
19. Output T and stop : $T = S^*$
endif

このアルゴリズムを表1の割当問題に適用した．最適解として，$t = 2.00$ のとき，(J1-A, J2-D, J3-B, J4-C) を得た．このときの総コストは4.434となった．

5. おわりに

本研究では，正規分布に従う確率変数を含む割当問題を取り扱った．このような問題を定式化し，解法に対する効率的なアルゴリズムを提案した．

参考文献

[1] A.Charnes and W.W.Cooper: "Deterministic equivalents for optimizing and satisficing under chance constraints," *Oper. Res.*, Vol.11, pp.18-59 (1963)

[2] Tetsuo Ichimori et al.: "Minimum spanning tree with normal variates as weights," *J. Oper. Res. Society of Japan*, Vol. 24, No.1, pp.61-66 (1981)

[問い合わせ先]
〒960-0181 福島市宮代乳児池 1-1
福島学院大学 福祉学部 山川 あす香
TEL:024-554-7115 FAX:024-553-3222
E-mail: asuka@fukushima-g.ac.jp

ファジィ数を含む競合施設配置モデルに対する多目的アプローチ

Multi-Objective Approach for Competitive Facility Location Model with Fuzzy Numbers

宇野　剛史　　坂和 正敏
Takeshi Uno　　Masatoshi Sakawa
広島大学　　広島大学
Hiroshima University　Hiroshima University

Abstract In this study, we propose a multi-objective approach for competitive facility location model with fuzzy numbers. In cases that the objective of each firm that locates its own facilities is only to maximize its reward, then location of all facilities is usually crowded on some regions which have many populations or are hub for all regions. Such a location forces the firms to compete extremely and the market about facilities is insecurity. Therefore, we formulate a multi-objective problem whose decision maker is arbitrator and whose objectives are reward for all firms. By using a solution of the problem, we find a good restriction such that more firms can survive.

1. はじめに

競合環境下での施設配置問題に関する数理的研究は，Hotelling [6] の提案した配置モデルを先駆とする．Hotellingは，施設の潜在的な利用者が存在する領域が線分上であるとみなせる市場において，競合する複数の企業が利用者から獲得可能な購買力の最大化を目的として各々施設の位置を何度でも変更可能な状況を考察した．全ての企業が施設の位置を決定した結果における施設配置は，Nash 均衡によって表される．これに対して，Hakimi [5] は利用者がネットワーク中のノード上に存在し，各企業が施設をノード上にのみ配置可能な市場において，各施設の位置決定を1度のみとする状況を仮定し，そのタイミングに関して先手企業・後手企業に分けられる2種類の企業における配置モデルを考察した．先手・後手企業が施設の位置を決定した結果における施設配置は，Stackelberg 均衡によって表される．また，Drezner [2] は，利用者の存在する点を含む平面において，先手・後手企業が平面上に施設を配置可能な状況における配置モデルを考察した．上記のモデルでは，利用者の施設選択について施設・利用者の間の距離を主な評価基準として仮定している．距離に加えて施設の質的側面を評価基準して考慮した研究としては，Hakimi のモデルを拡張した Karkazis [9] の論文が挙げられる．

Hotelling [6] や Drezner [2] の配置モデルにおいて競合する2企業が各々1つずつ施設を配置する状況では，施設がお互いに隣接する配置が均衡解となることが知られている．このような配置は利用者にとって不便であるとともに，企業にとって他企業とのサービス提供に関する競争の負担が大きい不安定な市場であるといえる．このことは，中小企業の施設が既存する市場において大企業がその市場に新規参入した場合において，大企業の施設の付近にある中小企業の施設は競争力を失い倒産する等の問題を引き起こす．これらの問題から既存施設を守るために，従来から商業活動においてある程度の規制が必要であると考えられており，日本国内で制定された法律としては，1959年の「小売商業調整特別措置法」や1973年の「大規模小売店舗における小売業の事業活動の調整に関する法律（大店法）」がその例として挙げられる．しかし，1975年の薬事法距離制限規定違憲判決のように，規制が合理的であるかを判断するのは困難であり，数理的に規制の度合いを求める方法が要求されている．宇野等 [11] は Weber [12] の提案した配置モデルを応用し，利用者全体から見た便利度を目的関数として考察することにより，全ての施設が利用者の存在領域に対して住み分けができるような施設配置を求めた．

本研究では，新規参入が予測される競合環境下の市場において，施設配置に対する公機関の適切な介入がなされた場合における施設配置を求める方法を提案する．施設配置モデルについて，以下の2つの不確実性に注目した．一つは潜在的利用者から獲得可能な利得に関する不確実性であり，利用者の購買力を Dubois と Prade [3] によって提案された L ファジィ数によって表す．もう一つは施設配置の結果得られる各企業の利得に対する目標設定であり，Bellman と Zadeh [1] によって提案されたファジィ目標によって表す．全企業のファジィ目的について考慮した多目的問題を Bellman と Zadeh [1] のファジィ決定に対する最大化決定を採用することで，競合施設配置モデルを数理計画問題として定式化する．この問題における最適解は市場全体において全ての施設に対してファ

ジィ目標の設定に関連して公平な施設配置であり，この解を求めるためのアルゴリズムを考案する．

2. Lファジィ数

本研究では，利用者がもつ購買力には不確実性が含まれると考えられることから，DuboisとPrade [3]によって提案されたLファジィ数によって表す．

定義 1 関数$L:\mathbf{R}\to[0,1]$以下の性質をみたすとき，Lを**型関数**という．

- $L(x)=L(-x),\forall x\in\mathbf{R}$.
- $L(x)=1\Leftrightarrow x=0$.
- Lは$[0,\infty)$上で単調非増加である．
- Lは$\mathbf{R}$上で上半連続である．
- $t_0=\sup\{x>0|L(x)>0\}$とおいたとき，$0<t_0<+\infty$が成り立つ．

定義 2 実数$\alpha\in\mathbf{R}$，正数$\beta\in\mathbf{R}_+$，及び型関数Lに対して，ファジィ数$\tilde{A}$のメンバーシップ関数が以下のように表されているとする：

$$\mu_{\tilde{A}}(z)=L\left(\frac{z-\alpha}{\beta}\right)$$

このとき，$\tilde{A}$をL**ファジィ数**とよぶ．また，α,βを各々$\tilde{A}$のセンター及びスプレッドと呼ぶ．

Lファジィ数の集合を$\mathcal{F}_L$とおく．$\mathcal{F}_L$内での演算について，以下の性質が知られている：

$$\begin{cases}(\alpha_A,\beta_A)_L+(\alpha_B,\beta_B)_L=(\alpha_A+\alpha_B,\beta_A+\beta_B)_L,\\ t\cdot(\alpha,\beta)_L=(t\cdot\alpha,t\cdot\beta)_L,\forall t\geqq 0.\end{cases}$$

次に，Lファジィ数間の順序関係について述べる．RamíkとŘímánek [10]は，ファジィ・マックス順序と呼ばれる順序関係を提案した．ファジィ・マックス順序は半順序関係であることが知られており，ファジィ数の集合の中から最大あるいは最小の数を選ぶ場合には，一般に互いに順序のつかないファジィ数が幾つか存在する．古川 [4]はLファジィ数からなる集合$\mathcal{F}_{\mathcal{L}}$において，ファジィ・マックス順序を応用することで，$\mathcal{F}_L$上で全順序関係となる以下のパラメトリックな順序関係を定義した．

定義 3 型関数Lのサポートの右端点をt_0^Lで表し，λを$0\leqq\lambda\leqq 1$で任意に固定する．このとき2つのLファジィ数$\tilde{A}=(\alpha_A,\beta_A)_L$，$\tilde{B}=(\alpha_B,\beta_B)_L$の間に，$\lambda$をパラメータとする順序関係$\leqq_\lambda$を次式で定義する．

$$\tilde{A}\leqq_\lambda\tilde{B}\Leftrightarrow$$
$$\begin{cases}\text{(a)}\quad \lambda t_0^L\beta_A+\alpha_A<\lambda t_0^L\beta_B+\alpha_B,\ \beta_B>\beta_A\\ \qquad\text{または}\\ \text{(b)}\quad \lambda t_0^L\beta_A+\alpha_A\leqq\lambda t_0^L\beta_B+\alpha_B,\ \beta_B\leqq\beta_A\end{cases}$$

3. 施設配置問題の定式化

本研究ではDrezner [2]のモデルと同様に，利用者は$\mathbf{R}^n$内の有限個の点上にのみ存在すると仮定し，これらの点を需要点と呼ぶことにする．需要点の総数をkとし，各需要点について指標集合$I=\{1,\cdots,k\}$の要素を割り当てる．需要点$i\in I$の位置を$\boldsymbol{u}_i\in\mathbf{R}^2$とおく．各点上の利用者がもつ購買力の総和をその点の需要量として表すことにより，需要点iの需要量を$\tilde{w}_i=(\alpha_i,\beta_i)_L\in\mathcal{F}_L$とおく．

このモデルでは，$\mathbf{R}^n$内には既にm個の施設が配置されており，各施設について配置された時期の遅い順に指標集合$M=\{1,\cdots,m\}$の要素を割り当てる．施設$j\in M$の位置を$\boldsymbol{v}_j\in\mathbf{R}^n$とおく．各施設には提供するサービスに対して利用者から見た質的評価値が与えられ，施設jの質的評価値を$y_j\in\mathbf{R}_+$とする．

本研究では上記の状況において，ある企業が$\mathbf{R}^n$内に新規に施設を1つ配置する場合を考察する．新規施設を既存施設と区別するためにその指標を0とおき，$M^0\equiv M\cup\{0\}$とする．新規施設の位置を$v_0\in\mathbf{R}^n$とおき，新規施設の質的評価値は配置する企業によって既に決定されており，$y_0\in\mathbf{R}_+$とする．

次に，利用者が配置された複数の施設の中から自分が利用する施設を選択するための基準について述べる．需要点iから施設$j\in M^0$までの距離を$d_{ij}\equiv||\boldsymbol{u_i}-\boldsymbol{v_j}||$で表す．ここで，$||\cdot||$はユークリッド・ノルムを意味する．本研究では，需要点i上の利用者から見た施設jの勧誘力をHuff [7, 8]によって提案されたモデルを用いて以下のように表す：

$$a_{ij}\equiv\begin{cases}G\dfrac{y_j}{d_{ij}^2} & d_{ij}>\epsilon\\ G\dfrac{y_j}{\epsilon^2} & d_{ij}\leqq\epsilon\end{cases}$$

ここで，Gは施設が提供するサービスの種類に応じて異なる定数であり，全施設及び利用者に対して共通であると仮定する．また，ϵはある正数であり，利用者が移動するのに全く苦にならないと考える距離の上限を意味する．需要点i上の利用者から見て既存施設の中で最も高い勧誘力の評価値を$\bar{a}_i\equiv\max_{j\in M}\{a_{ij}\}$と表す．全ての利用者は勧誘力が最も大きい施設のみを利用すると仮定する．また，最大勧誘力をもつ施設が2つ以上存在する場合には，利用者は最も早く配置された施設を利用すると仮定する．このとき，新規施設の配置v_0に対して，需要点i上の利用者が施設$j\in M^0$を利用するか否かを以下のように表す：

$$\theta_j(v_0)=\begin{cases}1, & \text{if } j=\max\{j'\in M|a_{ij'}=\bar{a}_i>a_{i0}\},\\ & \text{or if } j=0,\ a_{i0}>\bar{a}_i,\\ 0, & \text{otherwise.}\end{cases}$$

上記を用いて，施設 $j \in \{0,\cdots,n\}$ の総獲得購買力を $\tilde{f}_j(v_0) \equiv \sum_{i=1}^{k} \tilde{w}_i \cdot \theta_j(v_0)$ と表す．

各企業の目的を獲得購買力の最大化と設定する．このとき，固定された $\lambda \in [0,1]$ において，新規企業の獲得購買力最大化問題は以下のように定式化される：

$$P_N : \text{maximize} \quad \tilde{f}_0(v_0),$$
$$\text{subject to} \quad v_0 \in \mathbf{R}^n.$$

ここで，maximize は定義 1 で述べた順序関係 $\leqq_\lambda$ において最大となる L ファジィ数を表す．

問題 (P_N) では，y_0 が既存施設の質的評価値よりも高い場合には，その施設の付近に配置する傾向がある．例として，既存施設が 1 つだけ存在して，その質的評価値が $y_1 < y_0$ の場合について考察する．このとき，問題 (P_N) の最適解の一つは明らかに v_1 上であり，この新規施設の配置に対する既存施設の獲得購買力は 0 となり，施設運営に大きな支障をきたす．このような状況を防ぐために，公共機関は新規施設の市場参入に対して適切な介入をする必要がある．すなわち，既存施設に対しては質的評価値を向上させるための経営努力の促進であり，新規施設に対しては施設の配置位置の規制である．ここでは，主に後者について公共機関の介入によって決定された新規施設の配置が市場に与える影響を評価する．固定された $\lambda \in [0,1]$ において，全企業について獲得購買力の最大化を目的とする多目的問題を以下のように定式化する：

$$P_M : \text{maximize} \quad \tilde{\boldsymbol{f}}(\boldsymbol{v_0}) = (\tilde{f}_0(v_0),\cdots,\tilde{f}_n(v_0)),$$
$$\text{subject to} \quad v_0 \in \mathbf{R}^n.$$

本研究では，Bellman と Zadeh [1] によって提案されたファジィ目標を適応することで，各施設の獲得購買力に対する満足度を設定し，公共機関による介入によって決定される新規施設の施設配置を評価する．

各施設の獲得購買力に対するファジィ目標を表すために，新たに $t_0^{\bar{L}} = 1$ をみたす型関数 $\bar{L}$ を用いる．施設 $j \in M^0$ について，配置した企業が十分満足できると考えられる獲得購買力，及びその施設の運営・維持に必要最小限の獲得購買力を各々 $f_j^u, f_j^l \in \mathbf{R}_+$ とおく．ここで，これらは $f_j^l < f_j^u$ を満たすとする．このとき，新規施設の配置後における施設 $j \in M^0$ の獲得購買力が $\tilde{F} = (\alpha_F, \beta_F)_L$ の場合におけるファジィ目標を表すメンバーシップ関数を以下のように表す：

$$\mu_j(\tilde{F}) = \begin{cases} 0, & \tilde{F} \leqq_\lambda f_j^l. \\ \bar{L}\left(\dfrac{\lambda\beta_F + \alpha_F - f_j^u}{f_j^u - f_j^l}\right), & f_j^l \leqq_\lambda \tilde{F} \leqq_\lambda f_j^u, \\ 1, & f_j^u \leqq_\lambda \tilde{F}. \end{cases}$$

本研究では，公共施設の介入に対する評価として，Bellman と Zadeh [1] によって提案されたファジィ決定を採用する．このとき，固定された $\lambda \in [0,1]$ における多目的問題 (P_M) は，最大化決定となる配置を求める問題 (P) として，以下のように定式化される：

$$P : \text{maximize} \quad \min_{j \in M^0}\{\mu_j(\tilde{f}(v_0))\},$$
$$\text{subject to} \quad v_0 \in \mathbf{R}^n.$$

4. 解法アルゴリズム

需要点の指標集合 I のある部分集合を $\bar{I} \subseteq I$ とおく．$\bar{I}$ に対して，十分に小さい正数 $\varepsilon < \epsilon$ を与えることで，以下のようにおく．

$$r_i \equiv \begin{cases} \sqrt{Gy_0/\bar{a}_i} + \varepsilon, & i \in \bar{I}, \\ \sqrt{Gy_0/\bar{a}_i}, & i \notin \bar{I}, \end{cases}$$

$$\delta_i \equiv \begin{cases} 1, & i \in \bar{I}, \\ -1, & i \notin \bar{I}. \end{cases}$$

需要点 $i \in I$ について，新規施設の配置 $\boldsymbol{v}_0$ によって定まる実数 z_i を以下のように定義する：

$$z_i \equiv \delta_i(||\boldsymbol{u}_i - \boldsymbol{v}_0|| - r_i).$$

$\boldsymbol{z} = (z_1,\cdots,z_k)$ とおく．このとき，$\bar{I}$ 内に $r_i < \epsilon + \varepsilon$ をみたす需要点 i が存在せず，かつ，$\boldsymbol{z} \geqq 0$ をみたす配置が存在するならば，その配置によって新規施設は $\bar{I}$ 内の全需要点のみから購買力を獲得可能である．

$\bar{z} \equiv \min_{i \in I}\{z_i\}$ とおく．このとき，$\max \bar{z}$ は以下の線形計画問題の解として求められる：

$$P_E : \text{maximize} \quad \bar{z},$$
$$\text{subject to} \quad \bar{z} \leqq z_i, \text{ for } \forall i \in I,$$
$$\delta_{i^1} z_{i^1} + r_{i^1} + \delta_{i^2} z_{i^2} + r_{i^2} \geqq d_{i^1 i^2}, \quad \text{for } \forall i^1, i^2 \in I, i^1 \neq i^2,$$
$$|\delta_{i^1} z_{i^1} + r_{i^1} - (\delta_{i^2} z_{i^2} + r_{i^2})| \leqq d_{i^1 i^2}, \quad \text{for } \forall i^1, i^2 \in I, i^1 \neq i^2.$$

問題 (P_E) の最適解を $(\boldsymbol{z}^*, \bar{z}^*) \equiv (z_1^*,\cdots,z_k^*,\bar{z}^*)$ とおく．このとき，$\bar{z}^* \geqq 0$ であれば，$\bar{I}$ 内の需要点のみから購買力を獲得可能な配置が存在する．$(\boldsymbol{z}^*, \bar{z}^*)$ に対応する配置は唯一存在し，これを $\boldsymbol{v}_0^*$ とおく．$\boldsymbol{v}_0^*$ は $\bar{I}$ 内の需要点のみから購買力を獲得可能な他の配置と比較して，質的評価値等の変動に対して安定していると考えられる．以下では，$\bar{z}^* \geqq 0$ をみたす $\bar{I}$ に対する新規施設の配置の一つとして，$\boldsymbol{v}_0^*$ を求めるアルゴリズムを述べる．$z_i^* = \bar{z}^*$ をみたす需要点の集合を I^* とし，需要点 $i \in I^*$ について，$t_i \equiv \delta_i z_i + r_i$ とおく．

アルゴリズム 1

Step 0. $AI=\emptyset, NI=I^*$ とおき, $\hat{i} \leftarrow \min_{i' \in I^*} i'$, $\hat{u} \leftarrow u_{\hat{i}}, \hat{t} \leftarrow t_{\hat{i}}$ とする.

Step 1. $AI \leftarrow AI \cup \{\hat{i}\}$, $NI \leftarrow NI \backslash \{\hat{i}\}$, $i \leftarrow \min_{i' \in NI} i'$ とする.

Step 2. 線分 $\overline{\hat{u}u_i}$ を $\hat{t}:t_i$ に内分する点 $\hat{s}$ を求める. もし $\hat{t}+t_i=||\hat{u}-u_i||$ ならば, アルゴリズムを終了する. 求める配置は $v_0^*=\hat{s}$ である.

Step 3. $\hat{i} \leftarrow i, \hat{u} \leftarrow \hat{s}, \hat{t} \leftarrow \sqrt{\hat{t}^2-t_i^2}$ として, Step 1 に戻る.

以上より, 問題 (P) の最適解を求めるアルゴリズムを述べる. I の各部分集合について, 含まれる全需要点のみから購買力を獲得可能な配置が存在すると仮定したときの問題 (P) の目的関数値を計算し, 大きい順にこれらを並べる. 2^k 以下の自然数 ω に対して, 上記の順序で ω 番目になる部分集合を $\bar{I}^{(\omega)}$ とおく.

アルゴリズム 2

Step 0. $\omega=0, AIS=\emptyset, NIS=\{\bar{I}^{(1)},\cdots,\bar{I}^{(2^k)}\}$ とおく.

Step 1. $\omega \rightarrow \omega+1, AIS \rightarrow AIS \cup \{\bar{I}^{(\omega)}\}, NIS \rightarrow NIS \backslash \{\bar{I}^{(\omega)}\}$ とする.

Step 2. もし $r_i<\epsilon+\varepsilon$ をみたす需要点 $i \in \bar{I}^{(\omega)}$ が存在するならば, Step 1 に戻る.

Step 3. 与えられた $\bar{I}^{(\omega)}$ に対して, 線形計画問題 (P_E) を解く. もし $\bar{z}^*<0$ ならば, Step 1 に戻る.

Step 4. アルゴリズム 1 を用いて新規施設の最適配置の一つ v_0^* を求め, アルゴリズムを終了する.

5. おわりに

本研究では, 競合環境下での施設配置モデルについて, 公的機関の介入に対する市場の影響をファジィ決定に基づく目的関数として表した数理計画問題として定式化を行い, 新規施設の配置を求めるアルゴリズムを提案した. しかし, 提案したアルゴリズムにおいて, Step 3 で線形計画問題 (P_E) を解く回数が k の指数オーダーで評価されるため, 需要点が多数存在する問題については用いることが困難であると考えられる. このような場合には, 遺伝的アルゴリズム等を用いることで近似最適解を求める必要がある.

参考文献

[1] R.E. Bellmann and L.A. Zadeh: Decision Making in a Fuzzy Environment, Management Science, Vol.17, pp.141-164 (1970).

[2] Z. Drezner: Competitive Location Strategies for Two Facilities, Regional Science and Urban Economics, Vol.12, pp.485-493 (1982).

[3] D. Dubois and H. Prade: Operations on Fuzzy Numbers, International Journal Systems Science, Vol.9, pp.613-626 (1978).

[4] N. Furukawa: A Parametric Total Order on Fuzzy Numbers and a Fuzzy Shortest Route Problem, Optimization, Vol.30, pp.367-377 (1994).

[5] S. L. Hakimi: On Locating New Facilities in a Competitive Environment, European Journal of Operational Research, Vol.12, pp.29-35 (1983).

[6] H. Hotelling: Stability in Competition, The Economic Journal, Vol.30, pp.41-57 (1929).

[7] D.L. Huff: Defining and Estimating a Trading Area, Journal of Marketing, Vol.28, pp.34-38 (1964).

[8] D.L. Huff: A Programmed Solution for Approximating on Optimum Retail Location, Land Economics, Vol.42, pp.293-303 (1966).

[9] J. Karkazis: Facilities Location in a Competitive Environment: A Promethee Based Multiple Criteria Analysis, European Journal of Operational Research, Vol.42, pp.294-304 (1989).

[10] J. Ramík and J. Římánek: Inequality Relation between Fuzzy Number and its Use in Fuzzy Optimization, Fuzzy Sets and Systems, Vol.16, pp.123-138 (1985).

[11] T. Uno, H. Ishii, S. Saito, S. Osumi: Multi-Objective Facility Location Problems in Competitive Environments, Multi-Objective Programming and Goal-Programming, pp. 263–268, Springer (2003).

[12] A. Weber: Über den Standort der Industrien, 1. Teil: Reine Theorie des Standortes, Tübingen, Germany. English Translation: On the Location of Industries, University of Chicago Press, Chicago, IL (1929).

問い合わせ先

〒739-8527
広島県東広島市鏡山 1-4-1
広島大学大学院工学研究科複雑システム工学専攻
システム最適化論講座
宇野　剛史
TEL. 0824-24-7695
FAX. 0824-22-7195
E-mail: uno@msl.sys.hiroshima-u.ac.jp

ファジィ輸送費用の相互作用を考慮したヒッチコック型輸送問題の解法

An Algorithm for Hitchcock Type Transportation Problems
Incorporating Interactivity among Transportation Costs

岡田 真幸
Shinkoh Okada
足利短期大学
Ashikaga Junior College

Abstract We concentrate on a transportation problem in which each element in a cost matrix is represented as fuzzy number. As this type of problem is so called "ill-posed"problem, we can merely obtain an optimal solution. Therefore, based on the possibility theory, we consider the interactivity among each pair of solutions and derive a set of solutions which have possibility to be an optimal solution. We develop an efficient algorithm by applying the stepping stone method for transportation problems.

1 はじめに

ある製品の供給地が m か所，その製品の需要地が n か所ある。$I=\{1,2,\ldots,m\}$ で供給地の集合，$J=\{1,2,\ldots,n\}$ で需要地の集合を表す。供給地 $i(\in I)$ の供給量が a_i，需要地 $j(\in J)$ の需要量が b_j とし，

$$\sum_{i\in I} a_i = \sum_{j\in J} b_j$$

が成り立っているものとする。供給地 i から需要地 j への輸送費用が単位量当たり c_{ij} とする。この時，総輸送費用を最小にする輸送計画を求める問題をヒッチコック型輸送問題といい，次のように定式化できる。

TP :

$$\min. \quad \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} c_{ij}x_{ij} \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j\in J} x_{ij} = a_i, \quad (i\in I) \tag{2}$$

$$\sum_{i\in I} x_{ij} = b_j, \quad (j\in J) \tag{3}$$

$$x_{ij}\geq 0, \quad (i\in I, j\in J) \tag{4}$$

ここで，制約条件 (2), (3) 及び (4) で制約される実行可能領域を X で表し，一つの実行可能解を $\mathbf{x}\in X$ で表す。

一般に，輸送費 c_{ij} は意思決定者によって確定値として与えられるが，情報の不足や不確定な場合もありうる。このような場合，無理に確定値として与えると得られた解が現実に即さない場合が起こりうる。そこで，c_{ij} をファジィ数で表現する方が現実に即している。ただし，本論文で考える輸送費は，常に変動しているためにファジィ数で表現するのではなく，輸送費は確定値であるにもかかわらず，意思決定者の情報や知識の不足のために確定値として表現できない場合を考える。

ファジィ輸送問題の解法として，輸送問題の一般的な解法であるハウザッカー法と跳び石法を適用し，解を次々を更新し，それまでに得られたすべての解と比較して，最適解になりうる可能性のある解を複数個求める解法を提案する。

2 準 備

三角型ファジィ数 $\tilde{a}$ のメンバシップ関数 $\mu_{\tilde{a}}(x)$ を，左端 a^l，中心 a^M および右端 a^R を用いて，$\tilde{a}=(a^l,a^M,a^R)$ と表記する。$a^l>0$ のとき，$\tilde{a}$ を正のファジィ数という。

定義 1 ファジィ数の和は，拡張原理によって次のように定義する。

$$\mu_{\tilde{a}\oplus\tilde{b}}(x) = \sup_{x=u+v}\min\{\mu_{\tilde{a}}(u),\mu_{\tilde{b}}(v)\}.$$

定義 2 ファジィ数 $\tilde{a}$ と $\tilde{b}$ によって特徴付けられる可能性変数をそれぞれ a と b とし，これらの変数は互いに相互作用がない *(non-interactive)* と仮定する。"$\tilde{a}$ が $\tilde{b}$ 以下である可能性の度合い" を次のように定義する。

$$\mathrm{Poss}(a\leq b) = \sup_{u\leq v}\min(\mu_{\tilde{a}}(u),\mu_{\tilde{b}}(v)).$$

性質 1 ファジィ数 $\tilde{a}$，$\tilde{b}$ と $\tilde{c}$ によって特徴付けられる可能性変数をそれぞれ a，b と c とすると，次の等式が成り立つ。

$$\mathrm{Poss}(a+c\leq b+c) = \mathrm{Poss}(a\leq b)$$

[証明] 文献 [1,2] を参照。

3 問題の定式化

ファジィ輸送問題を次に定式化する。

FTP :

$$\widetilde{\min}. \quad \tilde{C}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\tilde{c}_{ij}x_{ij} \tag{5}$$

$$\text{s.t.} \quad \mathbf{x}\in X$$

ここで，目的関数 (5) 内の $\sum$ はファジィ数の加法を意味する。しかし，$\widetilde{\max}$ は未定義であり，通常の意味での最適解を求めることはできない。

4 実行可能解間の相互作用

従来のファジィ組合せ最適化問題では，各実行可能解のファジィ数で表現された目的関数値同士には相互作用はないと暗黙的に仮定されていた。しかし，この仮定は非現実的であり，矛盾点を含んでいる。ここで，表1に示す輸送費用行列とした $m=3, n=3$ の輸送問題例を考える。幾つかの実行可能解及び目的関数値を次に示す。

$$\mathbf{x}^{(1)}=\begin{pmatrix}7&0&0\\2&6&2\\0&0&12\end{pmatrix}, \mathbf{x}^{(2)}=\begin{pmatrix}7&0&0\\2&0&8\\0&6&6\end{pmatrix}, \mathbf{x}^{(3)}=\begin{pmatrix}0&0&7\\9&0&1\\0&6&6\end{pmatrix},$$

$$\widetilde{C}(\mathbf{x}^{(1)})=(398,481,568),$$
$$\widetilde{C}(\mathbf{x}^{(2)})=(362,463,550),$$
$$\widetilde{C}(\mathbf{x}^{(3)})=(369,456,564)$$

まず，実行可能解 $\mathbf{x}^{(1)}$ と $\mathbf{x}^{(2)}$ との目的関数値を比較する。両者には，共通するファジィ係数 $\widetilde{c}_{11}, \widetilde{c}_{21}, \widetilde{c}_{23}, \widetilde{c}_{33}$ が存在するため，$\widetilde{C}(\mathbf{x}^{(1)})$ と $\widetilde{C}(\mathbf{x}^{(2)})$ との相互作用を考慮すると，性質1によって，$\widetilde{C}(\mathbf{x}^{(1)})$ が $\widetilde{C}(\mathbf{x}^{(2)})$ 以下である可能性の度合いは，

$$\begin{aligned}&\mathrm{Poss}(7c_{11}+2c_{21}+6c_{22}+2c_{23}+12c_{33}\\&\quad\le 7c_{11}+2c_{21}+8c_{23}+6c_{32}+6c_{33})\\&=\ \mathrm{Poss}(6c_{22}+6c_{33}\le 6c_{23}+6c_{32})=0.73\end{aligned}$$

となる。ここで，$6\widetilde{c}_{22}\oplus 6\widetilde{c}_{33}=(186,210,252), 6\widetilde{c}_{23}\oplus 6\widetilde{c}_{32}=(150,192,234)$, である。もし，相互作用がないと仮定すると，可能性の度合いは，0.89 となる。

同様にして，各実行可能解を比較した結果を表2に示す。

5 解法

すべての実行可能解を求め，それらのすべての組合せを性質1により相互に比較して，すべての最適解になる可能性のある解を選出する手法は計算量の観点から現実的ではない。ところで，ヒッチコック型輸送問題では，北西端法あるいはハウザッカー法によって初期解を求め，跳び石法によって解を改善していく解法が一般的である。

本論文では，輸送費用がファジイ数で表現されているために最適解は得られないが，実行可能解を性質1によって比較することにより最適解になる可能性のある解及びその可能性の度合いを求めることは可能である。そこで，次に示す解法を提案する。まず，跳び石法を適用して，次々に得られる解とそれまでに得られた解とを性

表1: ファジィ費用行列 $\{\widetilde{c}_{ij}\}$

$i \setminus j$	1	2	3	供給量
1	(10, 15, 18)	(15, 18, 20)	(12, 13, 15)	7
2	(11, 15, 20)	(15, 17, 22)	(12, 14, 15)	10
3	(20, 25, 28)	(13, 18, 24)	(16, 18, 20)	12
需要量	9	6	14	29

表2: $\widetilde{C}(\mathbf{x}^{(i)})$ が $\widetilde{C}(\mathbf{x}^{(j)})$ 以下である可能性の度合い

$i \setminus j$	1	2	3
1	-	0.73	0.83
2	1.00	-	0.93
3	1.00	1.00	-

質1により比較し，最適解になる可能性のある解のみを保存する。更に，解の改善が完了した段階で，その解の近傍の解を探索して，それらと保存されている解とを比較して，最適解になる可能性のある解を追加保存する。最後に，保存されている解及びその可能性の度合いを意思決定者に提示し，意思決定者の選好に応じて取捨選択する。アルゴリズムを次に示す。

アルゴリズム

ステップ 0. ファジィ費用行列から費用 $\widetilde{c}_{ij}=(c_{ij}^L, c_{ij}^M, c_{ij}^R)$ を代表する実数 c_{ij}^M を各要素とした費用行列を計算する。

ステップ 1. ハウザッカー法によって，初期解 $\mathbf{x}^{(1)}$ を求める。

ステップ 2. 跳び石法によって新しい解を $\mathbf{x}^{(k)}$ を求め，解のリストに追加し，ステップ3へ行く。新たな解が得られなくなったらステップ4へ行く。

ステップ 3. 今までに得られた解 $\mathbf{x}^{(p)}, p=1,\ldots,k-1$ に対して，

$\mathrm{Poss}(\sum_{x_{ij}\in\mathbf{x}^{(p)}} c_{ij}x_{ij} \le \sum_{x_{ij}\in\mathbf{x}^{(k)}} c_{ij}x_{ij})=0$ ならば，$\mathbf{x}^{(p)}$ を解のリストから削除する。

$\mathrm{Poss}(\sum_{x_{ij}\in\mathbf{x}^{(k)}} c_{ij}x_{ij} \le \sum_{x_{ij}\in\mathbf{x}^{(p)}} c_{ij}x_{ij})=0$ ならば，$\mathbf{x}^{(k)}$ を解のリストから削除する。

ステップ2へ戻る。

ステップ 4. 解 $\mathbf{x}^{(k)}$ の近傍の解を探索し，ステップ3と同様の比較を行い，新たな解を追加する。近傍の解の探索が終わったら終了する。

参考文献

[1] 岡田真幸, "経路間の依存関係を考慮したファジィ最短経路問題," **第17回ファジィシステムシンポジウム**, 2001.

[2] S. Okada, "Fuzzy shortest path problems incorporating interactivity among paths," *Fuzzy Sets and Systems*, (To be appear).

問合せ先

〒 326-0808 栃木県足利市本城3丁目 2120
足利短期大学　　岡田真幸
TEL 0284-21-8242　　FAX 0284-21-1270
E-mail okada@ashikaga.ac.jp

連続領域におけるファジィ制約充足問題の反復改善アルゴリズムによる解法

Solving by heuristic repair algorithm of the Fuzzy Constraint Satisfaction Problem with Continuous Domains

須藤 康裕*1 Y.Sudo　栗原 正仁*1 M.Kurihara　三田村 保*2 M.Kurihara

*1北海道大学 Hokkaido University　*2北海道工業大学 Hokkaido Institute of Technology

Abstract: Fuzzy CSP(FCSP) is an extension of CSP(Constraint Satisfaction Problem), a powerful tool for solving various problems based on constraints among variables. In traditional CSP and FCSP, values for the variables are chosen from the discrete domains.However, this is often inconvenient when one wants to express real world problems.In this paper, we present a new technique that allows variables to have a mixture of discrete and continuous domains.We show that this model, called HDFCSP(Hybrid Domain FCSP), can be solved by a new algorithm SpreadRepair, an extension of the well-known heuristic repair algorithm.

1. はじめに

制約充足問題 (Constraint Satisfaction Problem, 以下 CSP) という問題表現の方法は，現実世界における様々な問題を表現可能であり，これまで多くの研究が行われてきた．CSP は，与えられた制約をすべて満たす変数への割り当てを求める問題である．しかしながら，制約を満たしている，いないの 2 値だけで表そうとするよりも，その制約の充足度を考慮し，出来るだけ制約を満たそうとする方がより現実的である．そこで CSP にファジィ関係を導入し，制約に曖昧さを持たせたファジィCSP が研究されている．一般に，現実の問題を CSP として定式化する上でいくつかの制限がある．CSP は通常，変数の領域は有限で離散的な集合であり，制約に曖昧さを設けたファジィCSP でもそれは例外ではない．しかしながら，一部の問題を定式化しようとしたとき，解を探索する上で不都合が生じる場合がある．本稿では，このような制限を緩和するために，ファジィCSP の変数領域に連続化した部分を持つことを許した混合領域ファジィCSP[5] と，反復改善法に基づくその解法を提案する．

2. 制約充足問題

CSP は通常，有限で離散的な領域から値を選ぶ複数の変数に対して，全ての制約を満たすような値の割り当てを探しだす組み合わせ問題と定義され，そのときの変数への割り当てを解とする．クリスプな制約（完全な充足か，完全な矛盾）C_k に含まれる変数の組は，C_k を満たすような D_i の直積集合から値を取る．

ここで制約とは，数学的には変数間の関係として表現される．例えば，$X_1 > X_2$ という制約は，$X_1 > X_2$ という関係を満たす対 (X_1, X_2) の集合，$\{(X_1, X_2)|X_1 > X_2, X_1 \in D_1, X_2 \in D_2\}$ である，それぞれの領域同士の直積集合から値を選ぶわけである．

3. ファジィCSP の拡張

3.1 ファジィCSP

Fuzzy CSP (FCSP) は，通常の CSP の制約にファジィ関係を導入したモデルであり，最適化問題の一種である．ファジィ制約 $C_k(v)$ は，ファジィ関係 $R_k(v)$ に対応付けられ，そのメンバーシップ値 $\mu R_k(v)$ は

$$\mu R_k(v) : Di \times Dj \times \cdots \rightarrow [0, 1]$$

の形式で与えられる．すなわち，領域 $D_i, D_j, \ldots$ から取られた値の組み合わせ v に対するメンバーシップ値 $\mu R_k(v)$ は，$[0, 1]$ の実数値をとり，それが制約充足の度合いを示す．また，制約 C_k と，別の制約 C_j との 2 つの制約の間に新しいファジィ関係が生まれ，それを以下のように定義する．

$$\mu R_k \cap R_j(v) = min(\mu R_k(v), \mu R_j(v))$$

これは，ファジィ制約の論理積 $C_k \wedge C_j$ をメンバーシップ値の最小値として定義することを意味する．すなわち，連鎖的に全ての制約を考慮し，CSP 全体の充足の度合いは以下のように定義される．

$$\mu \cap R_{k=1\ldots r}(v) = min_k(\mu R_k(v))$$

つまり，全ての制約の中で，最も制約を満たしていない制約の充足の度合いを CSP の充足度としている [2]．また，解は全ての制約について，少なくとも部分的に満たしている，完全な割り当てである．また最適解とは，最大の充足度を与える解をいう．したがって，FCSP を解こうとすることは，

最も制約を満たしていない制約の充足度を最大化するように変数の値を割り当てることになり，以下の式がその目的関数となる．

$$max_v(min_k(\mu R_k(v))) \qquad \cdots(1)$$

ただし，(1) 式についてのみ考慮した場合，あまりにも雑な解が得られてしまうので，最悪の制約違反以外の制約違反も出来るだけ改善すべきであり，それについていろいろ議論されている [1][6].

3.2 HDCSP の定義

領域を連続で表現することは，実に有用である．本稿では変数領域に連続領域を導入した混合領域ファジィCSP（Hybrid Domain Fuzzy CSP, 以下 HDFCSP）を導入する．HDFCSP は基本的に，FCSP を拡張したモデルであり，領域の定義以外は FCSP と同じであるので，前節を参照していただきたい．ここでは領域の定義のみ行う．

通常，CSP の変数領域は，有限で離散的とされる．すなわち有限な集合であり，大抵の場合それは列挙することによって表現された．ただしこのこと自体は欠点ではなく，列挙した方が都合の良い場合もある．HDFCSP では，変数の各領域を閉区間の和集合として，

$$D_i = \bigcup_{i=1}^{m} [l_j, u_j]$$

であるとし，$[l_j, u_j]$ は下限を l_j，上限を u_j とする連続区間，すなわち $\{x|l_j \leq x \leq u_j\}$ という領域を表す．また，$l_j = u_j$ の場合，その区間は単一の実数値を取るので，離散的な領域と

同じとなり，全ての j において，$l_j = u_j$ となるような場合，それは通常の CSP もしくは FCSP の領域と同じであるので，HDFCSP は FCSP を包含していることになる．

4. HDFCSP の解法

4.1 既存の手法

CSP の解法として大きく 2 つ，BackTrack や ForwardCheck 等の厳密解法と，Breakout 等の反復改善法がある．前章で定義した HDFCSP は，変数領域に連続領域が含まれているので，どちらの手法もそのままでは利用することが出来ない．領域の離散化は，根本的な見当違いの手法であるので，ここでは考慮しないことにする．

4.2 SpreadRepair アルゴリズム

HDFCSP を解くために，新しいアルゴリズムを提案する．基本的には局所的な改善を反復的に繰り返して最適解を探索するが，そこで必要なのは与えられた状態から近傍の状態への移行である．ここで，最悪の制約違反が，一度の変更によって改善出来ないような状況を準局所最適ということにする．また，すべての制約が一度の変更によって改善出来ないような状況を局所最適といい，その時の割り当てを局所最適解とする．

局所改善的に CSP を解く場合，何らかの評価関数を使用する．式 (1) を単純な評価関数として用いようとすると (すなわち最急降下法)，すくなくとも近傍の状態の中で最も充足度の高い割り当てに移行する必要がある．我々はこの採択を工夫し，非常に少ない候補に絞り込むことによって高速な収束が期待できるアルゴリズムを開発した．HDFCSP では最悪の制約違反を改善することが目的関数となっているが，Spread Repair アルゴリズムはそれが不可能な場合に評価関数を少し変更し，改善の対象をその周辺の変数に移す．この繰り返しにより，準局所最適の状態となっても，近傍を広げることによって準局所最適から抜け出す可能性を得，さらに目的関数値の局所最適性を保ったままそれ以外の制約違反もできるだけ改善することができる．"Spread Repair"は，改善の対象が周囲に広がっていく様子を意味している．

4.3 変更候補値の算出および選択

変更の対象になる変数のことを変更候補変数，またその変数の変更する予定の値を変更候補値として，以降本稿で使用する．また，変更候補値は最も充足度が高くなるような変更候補変数への割り当てとする．

では，まず単純な 2 項制約を例にとって考えてみる．ある変数 X との制約が存在する変数が $X_1, \ldots, X_n$ まであったとする．また，v は X への割り当てであるとする．ここで，X と他の変数 X_k の間の制約が関数 $\mu R(X, X_k)$ によって表すことが出来るとすると，変数 X の割り当てを変更する場合，X_k は固定されるので定数とすることが出来，$\mu R(X, X_k)$ を X の関数 $C_k(X)$ と表すことにする．ここで，全ての C_k について，ファジィ論理積を求めることが可能であれば，変数 X の割り当てを変更した場合の改善値が求まる．したがって，全ての変数について改善値を求め，その最大となるような変数 X を局所変更していくことによって最適解に近づくことが出来る．ファジィ論理積は 3 章で述べたように $minimum$ であり，全ての制約の積によって生じるメンバーシップ関数を C_{min} とし，次のように定義する．

$$C_{min}(v) = \prod_{k=1}^{n} C_k(v) \qquad \cdots (2)$$

X の領域に含まれる 1 つの閉区間に対して 1 つの最大値 $(max(C_{min}))$ を求め，全ての閉区間に対する $max(C_{min})$ の中から改善値が最大のものを選べば，変数 X の新しい割り当てが求まる．ところが，C_{min} が任意のメンバーシップ関数についてはこのままでは最大値を見つけるのは困難である．しかし，C_{min} のうち必要なのは最大値 $(max(C_{min}))$ だけで，関数全体の値は必要ない．筆者は $max(C_{min})$ の出現する可能性のある位置を考えてみた．1 つの閉区間について，その始点と終点は l と u で表されているが，1 つのメンバーシップ関数について l から u の間で，最大値と最小値は絶対に l か u もしくは極に存在することは，明らかである．同様に，全てのメンバーシップ関数のファジィ論理積による C_{min} は，それぞれのメンバーシップ関数がどのような形状をしていても，最大値は l か u，またはある 1 つのメンバーシップ関数の極，あるいはある 2 つのメンバーシップ関数の交点に存在し，それ以外の位置に出現する可能性は全くない（図 1）．

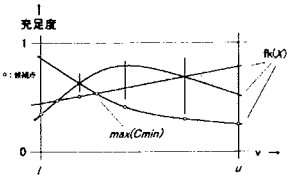


図 1: $max(C_{k_{min}})$ の候補点

したがって，ここで問題となるのはメンバーシップ関数同士の交点を求める操作と，極を求める操作である．一般には数値計算法のアルゴリズムを利用して求めることになると思われるが，1 次や 2 次の単純な関数ならば代数的に求めることも可能である．また，多くの場合メンバーシップ関数をそのような単純な関数で近似，もしくはそれらの合成によって構成しているようであるので，極や交点を解析的あるいは代数的に求めることは現実的である．

5. おわりに

本稿ではファジィ CSP の変数領域を連続化した HDFCSP と，その解法について述べた．実際，このアルゴリズムを使用して，"曖昧なスケジューリング問題" の解を得ることが出来ている．今後，最適解との精度の差や，アルゴリズムの性質に関して，様々な実験を行う予定である．

参考文献

[1] Ruttkay, Zs.: Fuzzy constraint satisfaction, Proceedngs of 3rd IEEE Intern. Conf. on Fuzzy Systems, 1263-1268(1994).

[2] Meseguer, P. and Larrosa, J.: Solving fuzzy constraint satisfaction problems, Proceedings of 6th IEEE Intern. Conf. on Fuzzy Systems, 1233-1238(1997).

[3] Bistarelli, S., Codognet, P. and Rossi, F.: Abstracting soft constraints: frameworks, properties, examples, Artificial Intelligence 139, 175-211(2002).

[4] Prosser, P.:A Reactive Scheduling Agent, Proc.IJCAI-89, 1004-1009(1989).

[5] 須藤康裕:ファジィ制約充足問題への連続領域の導入, FIT2002 情報科学技術フォーラム一般講演論文集第一分冊, 47-48(2002).

連絡先:
〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目
北海道大学 大学院工学研究科 システム情報工学専攻
TEL:011-706-6861
Email:sudoy@main.eng.hokudai.ac.jp

左右視野に提示された単語認知の半球優位性

Dominance of recognition of words presented on right or left eye

山ノ井高洋
Takahiro Yamanoi
北海学園大学
Hokkai-Gakuen University

山崎敏正
Toshimasa Yamazaki
NEC
NEC Corporation

大西真一
Shin-ichi Ohnishi
北海学園大学
Hokkai-Gakuen University

Abstract: The authors have investigated dominance of the brain hemisphere according to recognition of Japanese words written in kanji or hiragana. Subjects were presented two words, one has meaning and the other has no meaning, to the right eye and the left eye, respectively. Each word was presented on the right or the left of a CRT at random. The words were superimposed on the CRT, however, each word was presented independently to subject's each eye synchronized by liquid crystal grasses. When they recognized each meaning, they pressed the key. Each response time was recorded and analyzed statistically. Event related potential (ERP) was also recorded and analyzed by the equivalent current dipole (ECD) estimation. When the mean of response time of the left eye is statistically small, we concluded that the dominant hemisphere of the brain is on the right and vice versa. When difference of the means of response time is not statistically significant, then the difference of the variance is tested. When the variance of response time of the left eye is statistically small, we concluded that the dominant hemisphere of the brain is on the right and vice versa. The right-hander has dominance on the right hemisphere and left-handers have the left dominance. By the ECD estimation, we find responses on the Wernicke area to the right-hander, and on the Wernicke homologue to the left-hander. The differences of estimated latency times are consistent with the differences of response times.

1　はじめに

大脳半球の機能の左右差については数々の文献が示すように周知の事実である(たとえば[1]). 著者らは概算と普通の計算が左右脳それぞれで計算されることを明らかにした[7]. 本研究では, 左右の視野に独立に単語を提示し, その意味の認知に有する時間を計測し, 視野の優位性を調べた. 視野優位性が認められた被験者に対し, 単語提示時の事象関連電位(ERP)[2]を計測し, 先の反応時間計測から ERP 成分の頂点潜時を推定し, その時刻における等価電流双極子推定[5]を試みた.

右利きの被験者については, 言語野が左半球にあると言われている. 単語認知反応時間計測実験結果からは, 漢字刺激に対しては右視野優位すなわち左半球優位処理と考えられた. ひらがな刺激では明らかに右視野優位左半球優位であった. 左利き被験者(1例)については, 右利き被験者と異なり, 漢字刺激, ひらがな刺激, 共に左視野に関する反応がほとんどで右半球優位であった[9].

等価電流双極子推定実験結果からは, 右利きの被験者について, 漢字刺激では予測潜時範囲でほとんど反応が左脳に集中していた. 更に, 漢字刺激とひらがな刺激でウェルニッケ野での反応を見出した. 一方, 左利き被験者(1例)では, 右脳に多くの反応が集中し, 漢字刺激・ひらがな刺激ともに, 右脳ウェルニッケ野ホモローグ((右)上側頭回)に ECD が推定された.

2　計測実験の手順

視覚刺激として, ひらがな3文字(縦書き)で, 正順では意味をなし, 逆順では意味をなさない単語を選び, 正順と逆順を対として左右の視野に提示した. 刺激提示には, 時分割液晶シャッター眼鏡表示システムを用いた.

反応時間計測の場合, 被験者は時分割液晶シャッター眼鏡(SB300G, ソリッドレイ社)をかける. CRT 上の画面を上下 2 分割し, それぞれに単語を表示し, CRT と PC 本体の間にシンクロナイザー(SB300T, ソリッドレイ社)を挿入する. シンクロナイザーにより, 上下の単語は縦に2倍に拡大され, 60Hzごとに液晶シャッターと同期されて, 交互に画面に表示される[7]. 単語はファイル内から逐次自動的に提示され, 被験者が単語の意味を理解した時点で Enter キーを押下し, 提示からこの時点までの間隔時間をファイルに記録した[8].

さらに, この際の ERP を 19ch で計測し等価電流双極子推定を行った. ERP 計測時には, 運動準備関連電位の混入を防ぐために, キー押しは刺激提示から 3000msec 後とした. 被験者が判断に迷うときは 5000msec で打ち切り, 次の単語提示を行った[8]. 脳波計測用電極は, 国際 10-20 法に従い, 頭皮上に 19ch(電極付キャップ), 眼球運動モニター用に両下瞼に 1ch ずつ装着した. 各電極のインピーダンスは 2～5kΩになるようにした. リファレンス電極は両耳介, グランド電極は鼻根部にそれぞれ装着した. 計

測にはデジタル脳波計(Synafit EE2500, 日本GEマルケット)を用いた. 脳波計からのアナログ出力は記録用PC(PC-9821Xt, NEC)に転送され, A/D ボードによりサンプリング周波数 1kHz で変換された. 被験者は男子学生3名であった.

3 解析方法

各視野に提示される単語に対する反応時間を比較した. 提示時間の平均の有意差を検討し, これが明らかでない場合は分散の有意差について検討した.

ERP 計測実験では, 加算平均後の脳波データに対し, 平均反応時間以前の潜時において等価電流双極子推定法を用い, 反応源を詳細に調べた. 加算平均後の脳波データのダイポール解析には市販のソフトウエア(SynaPointPro, 日本GEマルケット)を利用した. 原データが 19ch 脳波データなので, ダイポール解析では最大3個のダイポールを仮定し, 各時刻で unconstrained ダイポールを推定した.

4 解析結果

言語情報の処理は左脳優位といわれているが, 本実験でもこの傾向は一般に確認された. しかしながら, 左利きでは, 一貫して右脳優位であった. 平均反応時間については, 漢字の場合表1, ひらがなの場合表2に示すとおりである.

表1 漢字認知の反応時間と優位視野

被験者	視野優位の有無	平均反応時間
MY	○(右)	2368ms
NS	○(右)	3163ms
MT	◎(左)	2717ms

□ :片視野のみ反応 ○:分散に有意差あり

表2 ひらがな認知の反応時間と優位視野

被験者	視野優位の有無	平均反応時間
MY	◎(右)	2260ms
NS	◎(右)	2260ms
MT	◎(左)	3152ms

□ :片視野のみ反応 ○:分散に有意差あり

平均反応時間の潜時以前の脳波データを用い, 等価電流双極子推定を試みたところ, 潜時800-900msecにおいて, 右利き被験者2名で(左)上側頭回(ウェルニッケ野)に, 左利き被験者で(右)上側頭回に, それぞれ, ダイポールが定位された. 後者の(右)上側頭回はウェルニッケ野のホモローグと考えられる. 特に, 漢字ではウェルニッケ野・縁上回・紡錘状回, ひらがなではウェルニッケ野・角回にダイポールが推定された.

表3 上側頭回の反応源推定の潜時

被験者	漢字提示	ひらがな提示
MY	851ms	819ms
NS	841ms	761ms
MT	911ms	928ms

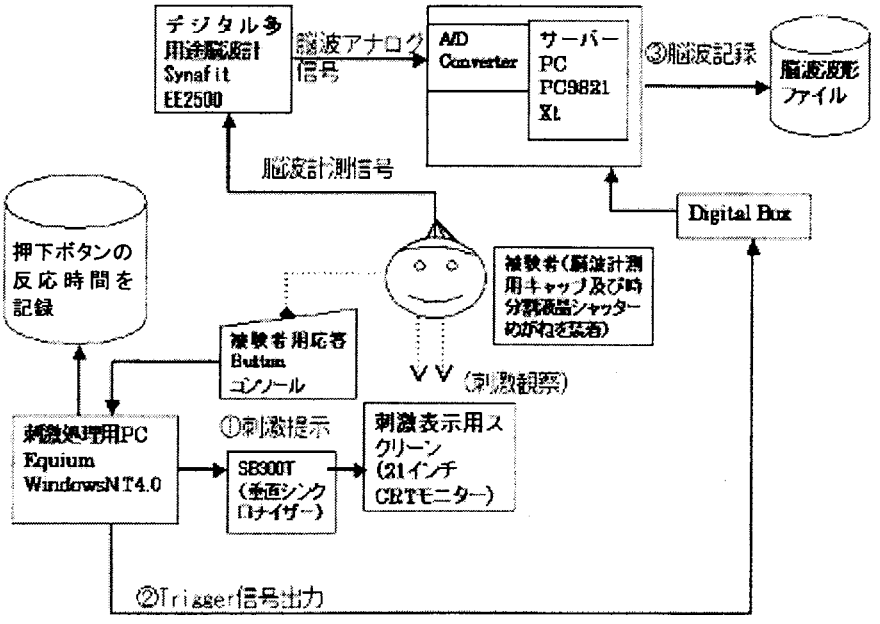


図1 本実験の装置構成図

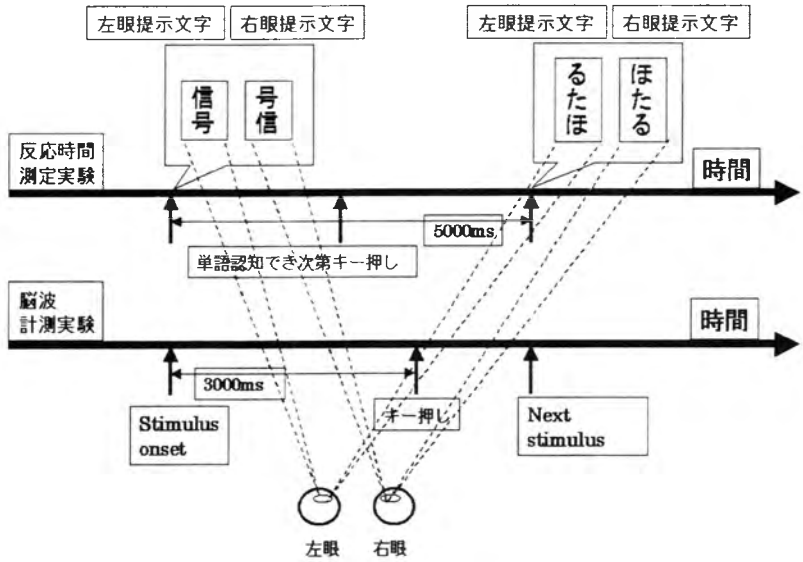


図2　文字提示実験の時間推移

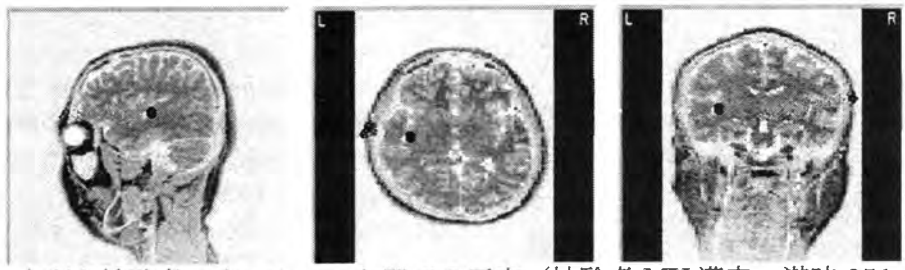


図3　右利き被験者のウェルニッケ野での反応（被験者 MY 漢字；潜時 851ms）

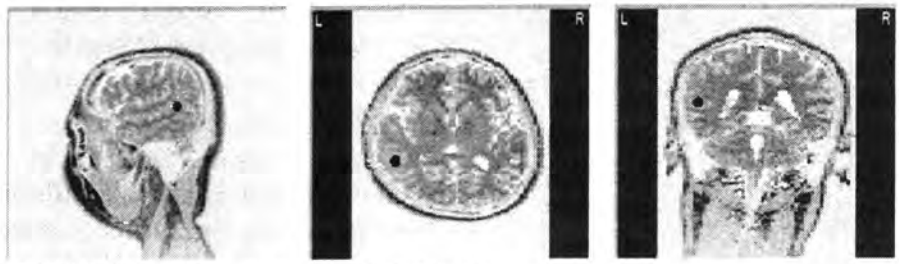


図4　右利き被験者のウェルニッケ野での反応（被験者 MY ひらがな；潜時 819ms）

図5　右利き被験者のウェルニッケ野での反応（被験者 NS 漢字；潜時 841ms）

図6　右利き被験者のウェルニッケ野での反応（被験者 NS ひらがな；潜時 761ms）

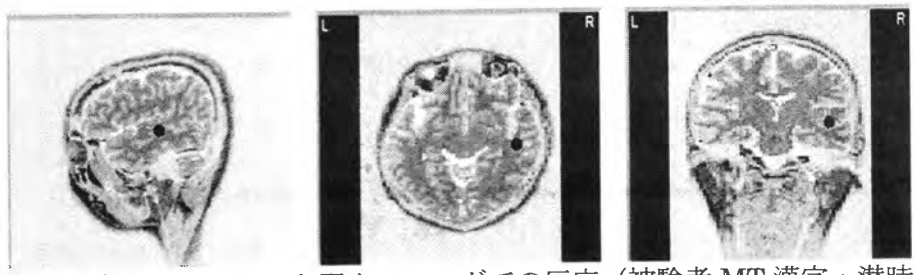


図7 左利き被験者のウェルニッケ野ホモローグでの反応（被験者 MT 漢字；潜時 911ms）

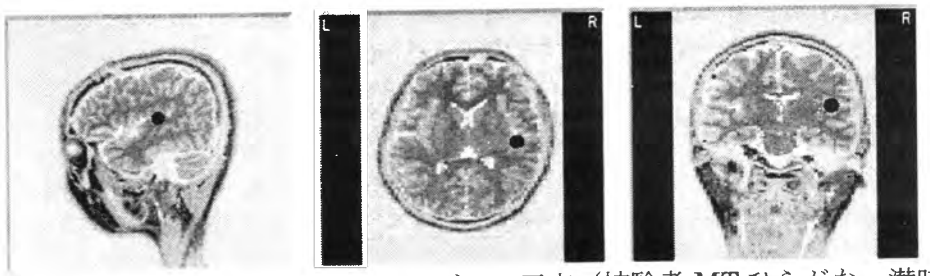


図8 左利き被験者のウェルニッケ野ホモローグでの反応（被験者 MT ひらがな；潜時 928ms）

5 まとめ

漢字・ひらがな刺激に対する脳半球優位性の計測実験を試みた．反応時間の計測および事象関連電位の等価電流双極子推定により，右利き被験者は左脳優位，左利き被験者は右脳優位のように対称性がみられた．さらに，漢字・ひらがなの平均反応時間の大小関係が反転していた．等価電流双極子推定によりウェルニッケ野あるいはウェルニッケ野ホモローグでの反応が見られた潜時に関しても同様に右利きと左利きで反転している結果が得られた．今後，被験者を増やしてこのことを詳しく検証したい．本研究は北海学園大学ハイテク・リサーチ・センターの研究の一環として行われた．

参考文献

[1] Geschwind, N. & Gelaburda, A. M.（品川嘉也訳）：右脳と左脳，東京化学同人(1990).
[2] 鶴紀子：事象関連電位，振興医学出版社(1997).
[3] 砂盃尚子，竹内文也，平田恵啓，栗城真也：視覚提示された3文字かな単語のカテゴリ弁別に伴う脳磁界の計測と解析，信学技法 MBE97-30, pp. 35-42(1997).
[4] Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R., Tsickin, S. : Source of Mathematical Thinking: Behavioral and Brain-Imaging Evidence, Science, Vol.284, No. 5416, pp. 970-974(1999).
[5] Toshimasa Yamazaki, Ken-ichi Kamijo, Akihisa Kenmochi, Shin-ichi Fukuzumi, Tomoharu Kiyuna, Yoko Takaki, and Yoshiyuki Kuroiwa : Multiple Equivalent Current Dipole Source Localization of Visual Event-Related Potential during Oddball Paradigm with Motor Response, Brain Topography, Volume 12, Number 3, pp. 159-175(2000).
[6] 山崎敏正：“32チャンネル電極キャップによる脳内等価電流双極子推定”．Clinical Neuro Science, Vol.18, No.2 186/190, 2000
[7] 斎藤正明，山ノ井高洋，大西真一，山崎敏正：両眼立体視の脳内情報処理過程－事象関連電位の双極子解析による検討－，医用電子と生体工学，Vol.39, No.4, pp. 40-45(2001).
[8] Takahiro Yamanoi, Masaaki Saito, Michio Sugeno and Elie Sanchez : Difference in Areas of the Brain for Fuzzy and Crisp Calculation. JACI, Vol.6, No.1, pp. 51-55(2002).
[9] 山ノ井高洋，大西真一，山崎敏正，Jean-Louis Vercher：左右視野に提示された単語の大脳での優位性，工学研究，第2号，北海学園大学工学研究科，p.p. 153-163(2002).

連絡先：
〒064-0926
札幌市中央区南 26 条西 11-1-1
北海学園大学　工学部　電子情報工学科
山ノ井高洋
電話：011-841-1161 内線 7874, 2111
FAX：011-551-2951
Email：yamanoi@eli.hokkai-s-u.ac.jp

Fuzzy Cluster Analysis of fMRI Data on Long-term Memory by the Method of Loci

Hidetomo Ichihashi[1], Katsuhiro Honda[1], Yuji Takai[1], Shoichi Araki[2]
[1]Osaka Prefecture University, JAPAN [2]Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. JAPAN

Abstract: **A brain mapping in recalling long term memories consolidated by a mnemonic called the Method of Loci was carried out using fMRI experiments. A Japanese subject memorized 2,000 English sentences, each of which consisted of about 10 words, during the last three years. The brain images when the subject was recalling the sentences were acquired in the activation and baseline epochs. The fMRI signals were analyzed using SPM99 and a modified fuzzy *c*-means clustering. The clustering results revealed the functional specialization of Broker's area and visual area. Broader areas in visual cortex are detected.**

I. Introduction

For most Japanese, efficient way of brushing up English language is becoming increasingly important as the globalization of the society is starting to arise. In this study, a Japanese right-handed subject at age 53 participated in the experiment and memorized 2,000 English sentences each of which consisted of about 10 words. For consolidating memory, the subject took 3 years of elaborative rehearsal by the Method of Loci. In the search for efficient way of mastering English, a study on brain mapping using fMRI experiments was carried out. In the Method of Loci, items to be recalled are imaginably placed in a larger image, such as a room, a post office and a station. Brain images acquired in the activation and baseline epochs were further analyzed using SPM99 for statistical inference and a newly developed modified fuzzy *c*-means clustering algorithm. A simple linear regression to prototypes of clusters is adopted in the clustering. The prototypes represent the functional activation reference waveforms of different regions and the clustering results reveal functional specialization of brain areas especially in the motor speech area of Broka and visual cortex more clearly than the standard SPM analysis.

II. Experiments

The paradigm of fMRI measurement starts with a warm-up period of 12 seconds followed by 25 identical cycles of "read and recall (active, experiment task)" and "passive reading (resting, control task)". In this fMRI experiment, a block design was used in which the subject is instructed to perform experimental and control tasks in an alternating sequence of 30-30sec blocks. Each of the blocks of active and rest is chosen to be 30 seconds long, thus each session takes 25 minutes. When an English sentence with a numerical number is presented on a CRT screen, then the subject recalls its next sentence that is not shown on the screen. When the sentence is presented without the number, the subject passively reads it. Consecutive sentences are shown on the screen one by one as follows:

578. Mr. Samson couldn't withstand the onset of the media attack.
582. Household conservation tips include closing off unused rooms and insulating roofs.

Mr. Samson couldn't withstand the onset of the media attack. Household conservation tips include closing off unused rooms and insulating roofs.

Each of the sentences is presented for 15 seconds. The former two sentences are for the active block and the subject recalls 579th and 583th sentences respectively. The correct answers are as follows:

579. Mr. Cassani treats all of his employees with paternal kindness.
583. President McAckey handpicked his office staff.

Then the subject passively reads the latter two sentences for the rest block of 30 seconds.

The third (last) session was conducted with eyes closed. The head of the subject was firmly fixed by a bite-bar and he only covertly recalled the English sentences (inner speech). The functional data were acquired on a GE 1.5T LX scanner using EPI(TE=50msec, TR=3000msec, voxel size=3.75x3.75x6 mm, whole brain) and analyzed using the statistical parametric mapping software(SPM99).The chosen voxel level threshold of significance was $p < .001$ (not corrected for multiple comparisons).

III. Method of analysis

Many of the current analytical techniques such as voxel-by-voxel linear regression applied to fMRI data require a priori knowledge or specific assumptions about the time courses of processes contributing to the measured signals. In FCM analysis, similarity between each waveform of measured signals and cluster centroid determines the membership values in a cluster. With a proper selection of the fuzzification factor and cluster number, FCM is shown to be able to identify various patterns, such as artifact-related activities, venous contribution, and different activation levels from the brain[1]-[3]. We used modified fuzzy c-means clustering algorithm. The objective function is defined as:

$$J = \Sigma_i \Sigma_k u_{ik} d_{ik} + w_1 \Sigma_i \Sigma_k u_{ik} \log u_{ik} - w_0 (\Sigma_i u_{ik} - 1) \quad (1)$$

$$d_{ik} = |x_k - b_{ik1} v_i - b_{ik0} I|^2 \quad (2)$$

where u_{ik} denotes membership of kth voxel in the i th cluster. b_{ik1} and b_{ik2} are determined for each voxel. x_k represents an averaged waveform of kth voxel during 10 time points in the block of 60 seconds. v_i is a cluster centroid of averaged waveform of measured signals. The second term is for fuzzification and w_0 is a Lagrangian multiplier. As we are interested in the time course of the sequences, not in its magnitude, we should take the standard deviates of the

original sequences. Instead of the standardization of x_k, b_{ik0} and b_{ik1} in (2) are determined to fit the baseline and variation respectively. Since the errors in (2) are calculated in the same scale as x_k, when the variation of x_{kj} is small, the membership to all clusters becomes somehow equal. In this way, the set of voxels whose responses to the task block structure are small can be classified as a noise cluster.

IV. Results

Recall of the sentences showed significant clusters of activation in the motor speech area of Broka, primary visual area, motor area, sensory speech area of Wernicker, insula, putamen, anterior cingulate and cerebellum are detected by SPM99. Wide areas of visual cortex in cuneus are detected by the proposed fuzzy c-means clustering and this result well matched with the elaborative rehearsal using visuo-spatial images in the method of loci. It is shown from the centroid of clusters that the responses of hemodynamics in the visual cortex are different from that of the motor speech area. In Fig.1 and 2, activated areas in the visual cortex are represented by the cluster in bright gray. The cluster centroids shown in Fig.1(right) explains the visuo special recalling task at the beginning and the middle of each experimental block. A small difference in responses between the motor speech area and the insula is discovered as shown in Fig.1(left).

V. Conclusion

Complex activities induced by memory related tasks call for powerful methods to detect local responses of different signal waveforms. It is necessary to develop simultaneous method of partitioning of brain areas and detection of activation by statistical inference. Enhancement by using non-averaged signals and introducing t-statistics in the cluster analysis is a prospective research direction.

References

[1] G. Scarth, M. Alexander, M. McIntyre, B. Wowke, and R. L. Somorjai, "Artifact detection in fMRI using fuzzy clustering," in *Proc. ISMRM 4th Annu. Meeting*, New York, NY, 1996, p.1783.

[2] R. Baumgertner, C. Windischberger, and E. Moser, "Quantification in functional magnetic resonance imaging: Fuzzy clustering vs. correlation analysis," *Magn. Reson. Imag.*, vol. 16, no. 2, pp. 115-125,1998.

[3] K-H. Chung, M-J. Chiu, C-C. Lin, and J-H. Chen, "Model-free functional MRI analysis using Kohonen clustering neural network and fuzzy c-means," *IEEE Trans. Medi. Imag*. Vol. 18, no.12, 1999.

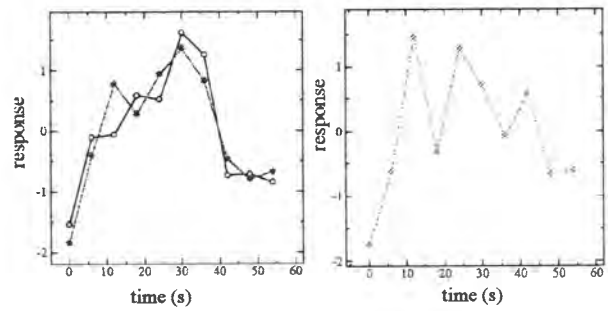


Fig.1 Averaged waveforms represented by cluster centroids. Responses are normalized. Each line corresponds to respective cluster in Fig.2(lower).

Address correspondence:
Hidetomo ICHIHASHI,
Industrial Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuencho, Sakai, Osaka 599-8531 Japan , TEL:0722-54-9352 FAX:0722-54-9915
E-mail ichi@ie.osakafu-u.ac.jp

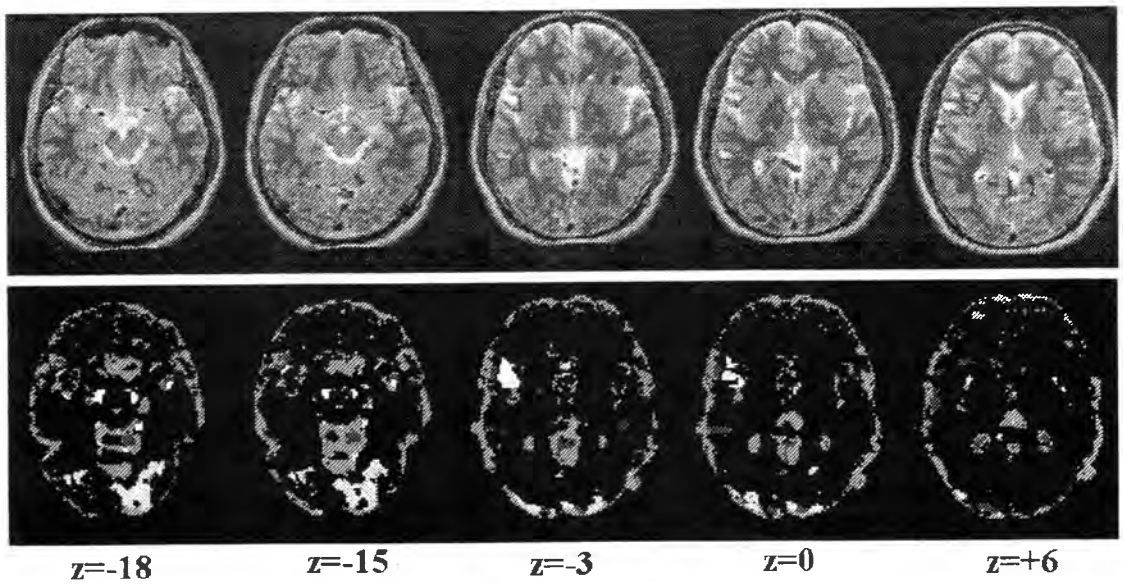


Fig.2 Transversal sections. Upper: SPM99, Lower: Modified fuzzy *c*-means. Five clusters of interest are depicted in gray color with different brightness. The surrounding circular cluster is a noise cluster whose boxels have maximum membership less than 0.7.

解離培養系における自発的神経活動パターンの動的制御

Dynamic regulation of spontaneous neuronal activity in dissociated neurons.

工藤 卓
Suguru N. Kudoh
産業技術総合研究所／科学技術振興事業団
AIST / JST

田口 隆久
Takahisa Taguchi
産業技術総合研究所
AIST

Abstract: Neurons form complicated neural networks and perform a higher order information processing, but neuron itself is also an advanced information-processing element. It is important for elucidation of a brain function to consider correlation of network functions and cellular function, analyzing network dynamics and behavior of functional molecules in a cellular level simultaneously. I propose the dissociated culture system on multi-electrodes array as a useful system, in which can operate molecular functions of living cells and detect electrical activities of an overall network simultaneously. In this report, we will show that synaptic potentiation was induced by a transient exposure to Mg^{2+}-free condition for 15 min and calphostin C and KN93, a selective inhibitor of protein kinase C (PKC) and CaM kinase Ⅱ, inhibited the induction of the potentiation. In addition, activity patterns of action potentials in a neural network actually changes dynamically by the potentiation of synaptic transmissions induced by a temporal increase of neuronal activities. These results show a series of flows that behavior of a functional molecule is changed by an activation of neuronal activity, the functional combination between neurons changes and the information processing style of a neural network is changed by this.

1. はじめに

神経細胞は複雑な神経回路網を形成して高次情報処理機能を発現するが、細胞それ自体が高度な情報処理素子でもある。細胞レベルでの現象・機能分子の挙動を見据えつつ、同時に回路網動態を解析してその相関を考察することは脳機能解明に重要である。生きた神経細胞の分子機能を操作しながら、同時に全体的な神経回路網の電気活動を捉えることができる系として細胞外電位多点測定電極上の解離培養系を提案する。培養神経回路網の細胞外液を一時的に Mg^{2+}を除去したものに置換することによって神経活動レベルを増加させると、シナプス伝達が増強されることを細胞レベルで解析した [1,2]。さらに、これに伴って神経活動電位パターンが変化し、このパターンの細胞間の相互相関がダイナミックに変更された。 これらの結果は、実際に神経回路網の活動パターンが外部環境刺激を知覚して生体神経回路網が自らの機能的結合を変更することを示唆しているものである。神経活動により、神経細胞内外の機能蛋白質分子の挙動が変化し、これによって細胞の出力特性が変更され、結果として神経回路網の情報処理様式が変更される一連の流れを繋いで生体神経回路網における情報処理の全体的なアウトラインを描くことが最終的な目標である。

2. 実験方法

ニワトリ大脳及びラット海馬解離培養系はすでに報告した手法によっている。動物実験のすべての手続きについて、産業技術総合研究所 関西センター 動物実験ガイドラインに準拠している。以下に概要を示す。胚令10日ニワトリ胚の大脳半球を取り出し、トリプシン処理により神経細胞を解離した。これをあらかじめ25 μg/ml Poly-D-Lysineコートを施した35mmプラスチック培養皿に撒き、5%CO_2雰囲気でインキュベーターで培養した。培養液は10%牛胎児血清を含むD-MEM/F12培地中で培養し、3日-2日おきに半量を交換した。電気生理学的実験は培養開始後6～10日のものを用いた。ラット海馬培養系についても、一般的な手法によっている。胚令17から18日のラット胎児から海馬を取り出して、同様にトリプシン処理により解離、5%牛胎児血清と10%馬血清を含むD-MEM/F12培地中で14～20

日培養したものを電気生理学的実験に用いている。

シナプス電流の解析は、ホールセル記録法により行った。35mm培養皿で培養した神経細胞に、倒立顕微鏡下で微小ガラス電極を接触させ、吸引してギガオームシールを形成した。その後、細胞膜を吸引破壊し、-60mV膜電位固定下でシナプス活動に伴う微小電流をアンプ(CEZ-2400、日本光電社製)により増幅、A/D変換ボード(AXON instruments社製)を経由して測定し、パーソナルコンピューターのハードディスクに記録した。

神経回路網の解析には、細胞外電位多点計測システム(MED64、アルファメッドサイエンス社製[3])を用いた。多点電極皿であるMEDプローブ上に神経細胞を培養し、自律的に形成された神経回路網の活動電位スパイクを記録した。解析は、独自に開発した解析ソフトウェア(MEDFAUST)を用いて信号の傾きを主な指標とするアルゴリズムにより活動電位を検出し、k-means法を改変した手法により全自動でクラスターカットを行い、得られた信号を単一神経細胞由来と見積もられるクラスターに分類した。

3. 結果・考察

解離培養された神経回路網は培養日数の経過に伴い、刺激を全く加えなくても自律的に電気活動を行い始める。ニワトリ大脳培養系の場合胚令10日目培養5日目程度から、ラット海馬培養系の場合は胚令18日目培養7日～10日目程度から、このような自発的な活動電位とこれによる自発性シナプス後電流(SPSCs)が観察される(図1)。

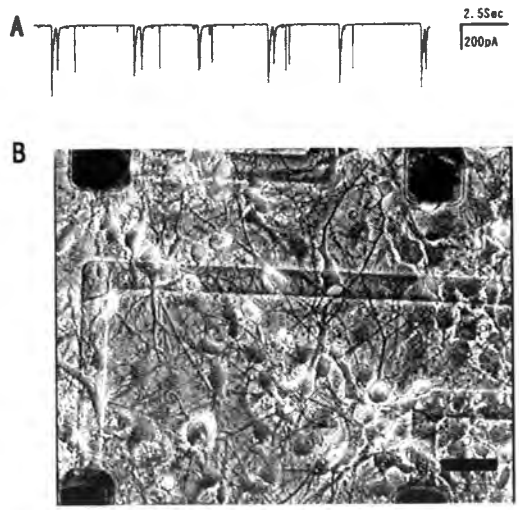


図1.
A.胚令18日培養9日目のラット海馬神経細胞から記録された自発性シナプス後電流。
B.多点細胞外電位記録電極皿上に培養された胚令18日培養9日目のラット海馬神経細胞の位相差顕微鏡像。スケールバーは 50 μm。

これと同時期に、回路性の活動電位が観察される(図2)。

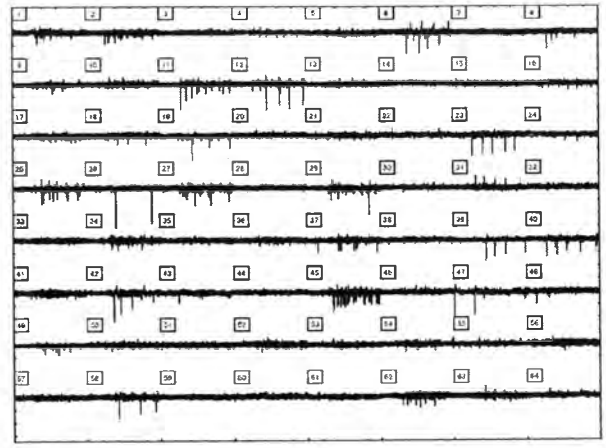


図2.
胚令18日培養26日目のラット海馬神経細胞から記録された自発性の活動電位。各ポイントは64点の多点電極それぞれから得られた細胞外電位記録を示す。

この活動電位は、CNQX等この系における主要なシナプス伝達を担うA/K型グルタミン酸受容体の阻害剤で消失するので、シナプス伝達を介した神経回路網の自律的な電気活動である。

細胞外記録外液をMg^{2+}を含まないものに置換して一時的に神経回路網の活動頻度を上昇させることによって、SPSCsの振幅が40分以上持続して上昇する(図3)。

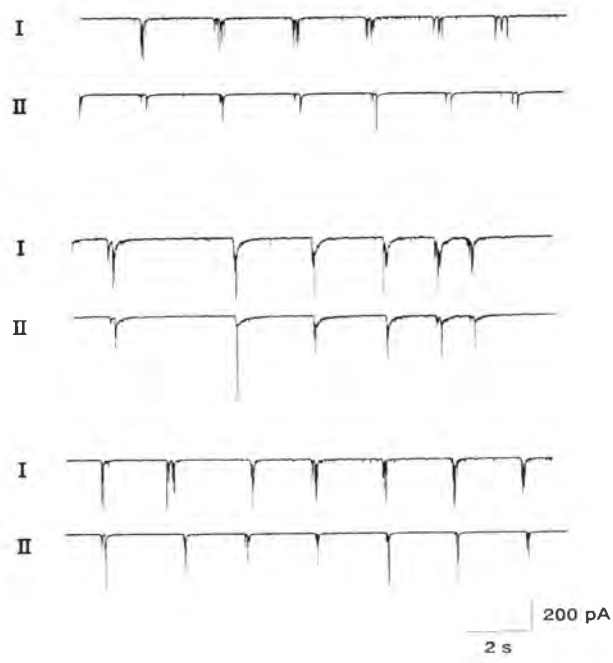


図3.
胚令10日培養7日目のニワトリ大脳神経細胞から記録された自発性シナプス後電位。Ⅰ、Ⅱは同時に記録された細胞ごとの記録をそれぞれ示す。
上段パネルは Mg^{2+}除去条件前、中段は Mg^{2+}除去条件中、下段は20分間の Mg^{2+}除去条件後、通常の記録外液に戻して10分後の記録をそれぞれ示す。Mg^{2+}除去条件により、シナプス電流の振幅が増大している。

この増強は、シナプスの活動によるNMDA型グルタミン酸受容体の活性化、新規タンパク質合成が必要である。さらに、この増強が蛋白キナーゼC(PKC)の特異的阻害剤であるcalphostin C、カムキナーゼⅡ(CaMKⅡ)の特異的阻害剤であるKN93によって阻害されることから、細胞内情報伝達において重要なPKC、CaMKⅡが増強の発現に必須であることが明らかになった(図4)。

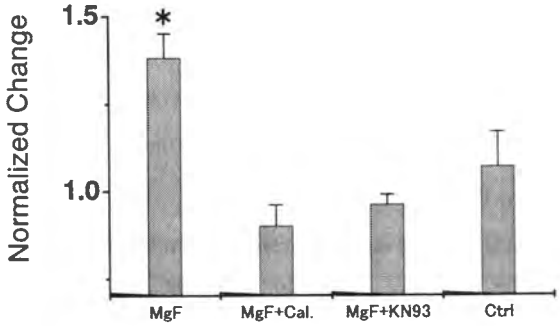


図4. 蛋白キナーゼの阻害剤による増強の阻害効果。
シナプス電流記録の3分間の振幅の平均値を算出し、その誘導前後における変化率をグラフに示す。＊は対照実験との有為差を示す。エラーバーは標準誤差、N=5。

これらの結果が示すように、器官組織から分離して解離培養した小規模な神経回路網であっても、それを構成する神経細胞の機能は維持されており、神経活動の活性化によってシナプス伝達の長期的な増強を誘導することが出来る。また、この増強には細胞内情報伝達系と呼ばれる一群の蛋白質機能分子ネットワークが重要な機能を果たしていることが示唆される[4,5]。

個々のニューロン間のシナプス伝達が増強されるとき、実際の生体神経回路網の活動パターンがどのように影響を受けるかMEDプローブ上に解離培養したラット海馬神経回路網を用いて解析した。細胞外電位多点計測系では個々のシナプス電流を計測することは不可能なので、フィールド電位に現れる活動電位スパイクの時空間パターンを指標として解析を行った[6,7]。胚齢18日から10日以上培養したラット海馬培養系に於いては、周期的なクラスター化したバースト発火が観察されるが、一つのクラスターを構成するスパイクの頻度は記録した神経細胞によりばらつきがあった。単一神経細胞の解析と同様に記録外液を20分間一時的にMg^{2+}を除去したものに置換し、この前後で活動電位パターンを比較すると興味深いことに、Mg^{2+}を含んだ記録外液中でも、一つのクラスターにおけるバースト発火の頻度は上昇して自己相関関数のピークの数が増加した。この変化は30分以上の長期間にわたって持続した。さらに、いくつかの記録では各クラスターの間隔が長くなる変化が観察された(図5)。

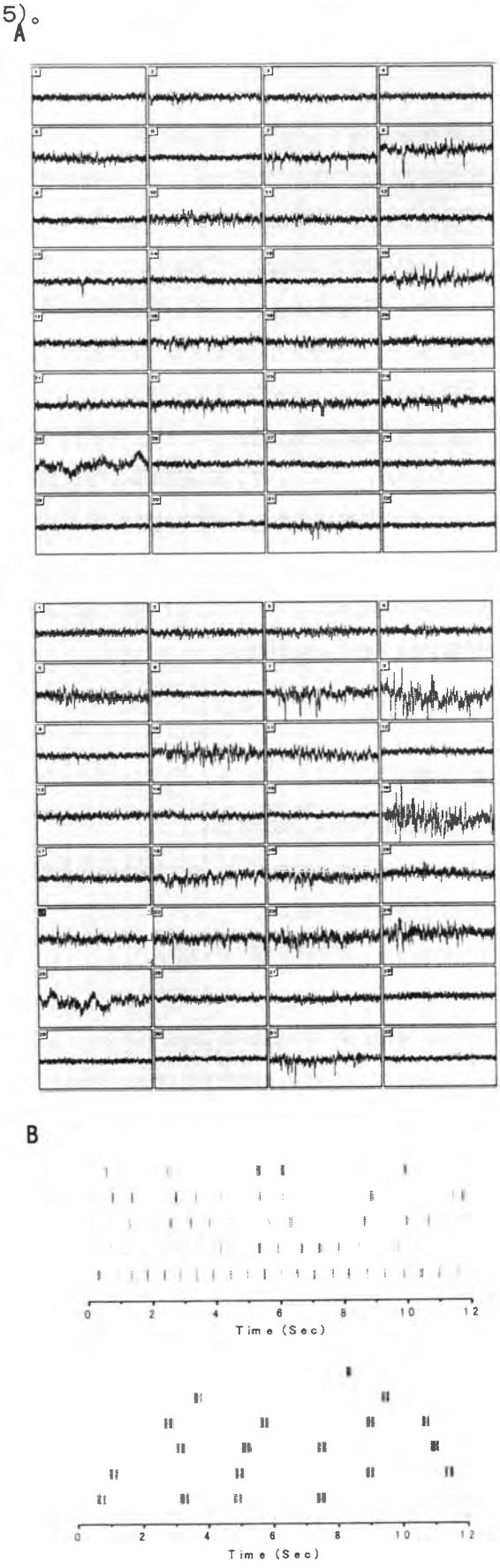


図5.
A.自発性の活動電位パターンの神経活動依存的変化。上段パネルは Mg^{2+}除去条件前、下段は20分間の Mg^{2+}除去条件後、通常の記録外液に戻して10分後の記録をそれぞれ示す。Mg^{2+}除去条件により、バースト状のスパイクが増大している。

B.自発性の活動電位パターンのラスタープロット。各バーは単発のスパイクを表す。上段パネルはMg^{2+}除去条件前、下段は20分間のMg^{2+}除去条件後、通常の記録外液に戻して10分後の記録をそれぞれ示す。Mg^{2+}除去条件により、バースト状のスパイクが増大し、各クラスターの間隔が長くなっている。

神経回路網全体の情報処理の流れがどのように変化しているか解析するため、このような変化が見られた神経細胞のスパイク活動パターンと他の63点の電極から記録されたスパイクパターンの相関を解析した。その結果、シナプス増強とスパイクパターンの変化に伴って、各神経細胞間の活動相関がダイナミックに変更されて機能的結合状態が変化している様子が観察された(データは示していない)。

以上の結果は、神経活動の活性化により、機能分子の振る舞いが変更され、これによって神経細胞間の機能的結合が変化して神経回路網の情報処理様式が変更されるという一連の流れを示すものである。今後さらに解析を進め、この小規模な神経回路網で行われている情報処理と機能分子の関係をあきらかにしていきたい。

5. 参考文献

[1]Kudoh SN, Kiyosue K, Taguchi T.
A synaptic potentiation by a protein factor distinct from those induced by neurotrophins.
Int J Dev Neurosci. 20(1):55-62. (2002)

[2]Kudoh SN, Nagai R, Kiyosue K, Taguchi T.
PKC and CaMKII dependent synaptic potentiation in cultured cerebral neurons.
Brain Res. 915(1):79-87. (2001)

[3]Oka H, Shimono K, Ogawa R, Sugihara H, Taketani M.
A new planar multielectrode array for extracellular recording: application to hippocampal acute slice
J Neurosci Methods. 93(1):61-7. (1999)

[4]Kudoh SN, Matsuo A, Kiyosue K, Kasai M, Taguchi T.
Long-lasting enhancement of synaptic activity in dissociated cerebral neurons induced by brief exposure to Mg^{2+}-free conditions.
Neurosci Res. 28(4):337-44. (1997)

[5]Kudoh SN, Kiyosue K, Kasai M, Taguchi T.
Synaptic potentiation induced by a protein factor in cultured cerebral neurons.
Cell Mol Neurobiol. 19(5):575-85. (1999)

[6]Jimbo Y, Kawana A, Parodi P, Torre V. The dynamics of a neuronal culture of dissociated cortical neurons of neonatal rats. Biol Cybern 83(1):1-20. (2000)

[7]Tateno T, Jimbo Y.
Activity-dependent enhancement in the reliability of correlated spike timings in cultured cortical neurons.
Biol Cybern.Biol Cybern. (1999) 80(1):45-55.

連絡先:
〒563-8577
大阪府池田市緑丘 1-8-31
産業技術総合研究所 人間系特別研究体
ニューロニクス研究グループ
工藤 卓
電話: 072-751-9524
FAX: 072-751-9628
Email: s.n.kudoh@aist.go.jp

階層的神経回路による輪郭の帰属領域の特定

Assignment of border-ownership by hierarchical neural network

菊池 眞之

Masayuki Kikuchi

東京工科大学 コンピュータサイエンス学部

School of Computer Science, Tokyo University of Technology

Abstract: Recet studies suggested that the visual system in the brain processes local contour elements in the images with the property of the side of the figural region to which contour elements belong (*border-ownership*), in addition to the properties such as orientation, potision, and polarity of edge. This nature is thought to give the neural basis of figure/ground organization in the visual system. This study proposes the possible principle to determine figural side against the contour, and the hierarchical neural network model embedded this principle. The model was tested by computer simulation.

1 はじめに

3次元空間の物体群が2次元網膜に投影されると，複数の輪郭と，輪郭によって区分される複数の領域とが生じる．脳の視覚系では，この網膜像より物体形状の認識を行いつつ，どの領域が，隣接する他の領域に対し手前に位置するか，という領域同士の相対的な奥行関係を判断する．相対的に手前に位置する領域は図となり，奥に位置する領域は地として知覚されることになる．

図地分離に関し，これまでに輪郭と領域との間の関係についていくつかの重要な研究がなされてきている．Rubinによる顔と杯の両解釈が可能な多義図形を使った観察では，顔と杯とが同時には見えないことが報告されている[1]．Nakayamaらによる理論的考察[2]で，輪郭は遮蔽関係にある2つの物体表面のうち，手前に位置する表面の境界を示すものであり，その表面のみが輪郭を所有し得るというownershipという観念が述べられている．Zhouらは，視野の中に4角形や凹図形などのパターンが含まれる単眼画像を呈示したときの，初期・中期視覚領野の方位選択性細胞の反応について調べたところ，V2, V4野のかなりの割合の細胞は，位置，方位といった従来から知られる刺激選択性の他，輪郭に対し特定の側に図の領域が存在するときに強く反応するという，性質も備わることを見出し，border-ownership codingと呼んだ[3]．Driverらも2次元刺激を使った心理実験により，輪郭は，それが接する2領域の両方にではなく，図となる側の領域にのみ帰属するものとして知覚されることを見出している[4]．これらは視覚系における図-地の表現様式について示す重要な知見である．

視覚系における図地分離の表現様式は明らかになってきたが，それはどのようなメカニズムで発現するのだろうか．相対奥行手掛かりとして，両眼視差，遮蔽（T-junction），物体の大きさ（領域の広さ）の違い，領域の色合いの違いなど，いくつかが挙げられる．それら全てがそれぞれ視覚系で処理され，相対奥行判断に寄与しているとも考えられるが，ここでは最も単純化された場合，すなわち視野一面に広がる表面の中に，1つの物体がおかれており，その物体の内部の表面と外部の一面に広がる表面との属性が同一で，輪郭のみがそれらから区別されて知覚される場合にも，図・地分離が成立することに注目することで一般に成立する原理を導く．

物体領域の境界は閉曲線を形成する．そして，閉曲線を見ると，その内部が物体の領域としてまとまって知覚され易いことが古くから指摘されている．このとき，閉曲線の内部の領域は，閉曲線の外部の領域に対して，3次元空間で手前に位置するように解釈される．すなわち，知覚的には閉曲線の内部が図，外部が地となり，閉曲線で囲まれる領域が，地となる外部の表面の一部を遮蔽しているという解釈になる．

閉曲線が与えられたときに，その内部領域の側を特定できればborder-ownershipが求まることになり，図地解釈が成立する．それにはどのような方法があり得るだろうか．これまでに，いくつかの案が提案されてきているが，局所的な観察範囲を逐次的に移動させるもの，複数の物体が存在する場合に正しく機能しないもの，極めて長距離な結合の存在を仮定するものなど，初期・中期視覚領野の神経ネットワークの行う処理として不自然なものが多かった[5][6]．一方でKikuchiらは閉曲線上を反時計周りに1周すると全曲率関数の値が2πになるという閉曲線の幾何学的性質に着目し，閉曲線の内側と外側に設定される信号の連鎖のうち，内側だけに反応が残る繰り返し計算の方法を考案した[7]．これは初期視覚に存在することが報告されているcolinearな結合[8][9]を仮定するだけでよく，その点では生物的であると言える．しかし，輪郭上の局所隣接箇所間の信号伝播という機構の性質上，特に入力パターンが凹凸を含む場合，最終的なownershipの解に収束するまでに長い時間がかかるという欠点があり，極めて短い時間に輪郭の両サイドでownershipの反応の差が生じるというZhouらの生理学的知見にも合致していなかった．

本研究では，Kikuchi らのモデルに Roelfsema[10] の提案する階層伝播機構を取り入れることで，生物的なアーキテクチャとしての特質を維持しつつ反応収束までの時間を短縮させることを試みる．

2 モデル

まずはじめに，基盤となる単層の Kikuchi らのモデルを概観する．次にモデルの階層化について説明する．

2.1 単層ネットワークモデル

曲線の曲率は，

$$k(s) = \lim_{\Delta s \to 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta s} \tag{1}$$

で与えられる．ただし，s は曲線長，$\Delta\theta$ は，Δs の曲線長の変化に伴う接線の方位の変化量を表す．また，ここでは曲率は符号付きで考える．

全曲率関数を $T(s)$ とすると，

$$T(s) = \int_0^s k(s)ds \tag{2}$$

しかし，全曲率関数は L-junction などを含まない連続な曲線のみに対し定義される．Shimaya は，全曲率関数の概念を，方位が不連続な L-junction を含む一般の曲線に対して適用できるよう拡張した [11]．曲線が m 個の部分連続曲線 $l_1, l_2, \cdots, l_m$ から成るとしたときの，l_i と l_{i+1} のなす不連続なコーナーの外角を α_i とする (図 1 参照)．また，s_i は始点から部分曲線 l_i の終点までの長さとする．s を始点からの距離 (ただし，$s_n \leq s < s_{n+1}$) とすると，拡張された全曲率関数 $T(s)$ は，以下のように定義される．

$$T(s) = \sum_{i=1}^{n} \left[\int_{s_i-1}^{s_i} k_i(s)ds + \alpha_i \right] + \int_{s_n}^{s} k_{n+1}(s)ds \tag{3}$$

閉曲線を反時計周りに 1 周トレースすると，(3) 式は，

$$T(L) = 2\pi \tag{4}$$

となる． ただし L は閉曲線の 1 周の長さを表す．これは，閉曲線上の反時計回りのトレースにより途中方位の増減があっても，結局 $+2\pi$ 分方位が変化することを表す．ここで，$T(L)$ の 増加，減少に寄与する曲率の積分値及びコーナー外角の総和をそれぞれ T_+, T_- と表すと，

$$T_+ - T_- = 2\pi \tag{5}$$

となる．幾何学的には，T_+ は閉曲線を反時計周りに見たときに左側に曲がっている区間，すなわち凸の輪郭部分の曲率の積分値及び角の外角の値の総和を意味し，T_- は右側に曲がっている区間，すなわち凹の輪郭部分の曲率の積分値及び角の外角の値の総和を意味する．すわなち，(5) 式は，常に凸部分の総和が凹部分の総和より大きいことを表す．以下にこの性質を利用した border-ownership の決定原理を述べる．なお，ここまでの議論には輪郭のトレースの方向が含まれていたが，以下のメカニズムの議論では，このトレース方向は関係なくなる．

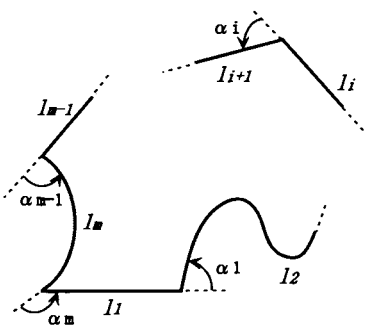


図 1: 全曲率関数の拡張 (Shimaya, 1997 を変更)

輪郭に沿って両サイドに細胞が設置されると考える．各細胞は，輪郭が該当サイドに彎曲しているときに，曲率及び L-junction での外角に比例した初期値が与えられる．各サイドで信号を輪郭に沿った 2 方向に伝播し，サイドごとに積分値に対応する “平均値” を求める．これらを P, Q とおく．すると，P, Q と T_+, T_- の対応関係は，

$$P > Q \text{ のとき } \begin{cases} P \to T_+ \\ Q \to T_- \end{cases} \tag{6}$$

$$P < Q \text{ のとき } \begin{cases} P \to T_- \\ Q \to T_+ \end{cases} \tag{7}$$

のようになる．P と Q の大小比較は両サイド間の競合により行われる．すなわち，競合の結果，値が残っているサイドが ownership のある側となる．

輪郭に沿った信号の伝播機構，輪郭の 2 サイドの信号経路の競合は図 2 で表される．伝播結合としては，反応の空間的平滑化が実現されるものであれば良いが，ここでは近傍が負，それより遠方が正で，結合総和が 0 になる反応拡散系を実現する結合を考える．このような結合様式は Polat らの心理学的知見に沿ったものと言える [12].

2.2 階層化モデル

上記の単層ネットワークモデルでは ownership のサイドを正しく特定するまでに長い繰り返し計算を要するこ

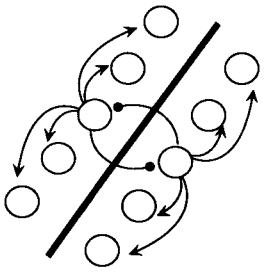


図 2: 輪郭に沿った信号の伝播と競合 (単層ネットワーク)

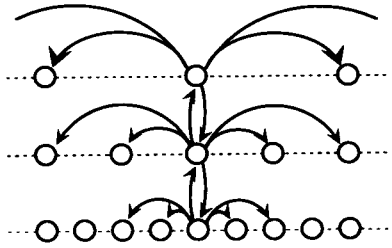


図 3: 階層的伝播機構

とがある．そこで，この計算回数を減らすべく階層構造を導入する．ownership 特定の為の基本アイディアは単層ネットワークモデルと同一である．違いは，Roelfsema[10] によって提案された輪郭のつながり具合について調べる階層神経機構と類似した構造を伝播機構として取り入れた点にある．提案するモデルの構造を図 3 に示す．単層ネットワークでの結合のうち，近傍結合として自分自身の層の細胞への結合のみならず，他の階層への結合も備えたものとなっている．階層数は多いほど収束までの時間が短縮される性質がある．

3 シミュレーション

階層性の導入の有効性を確認すべく，コンピュータによりシミュレーションを行った．3 層のネットワークと，単一層のネットワークそれぞれにつき，凹凸を含むパターンを入力した場合の反応の収束までの早さを比較した．なお，ここではネットワークは簡単の為，1 次元の細胞の並びの両端を繋げた構造とし，各細胞に 2 次元輪郭における曲率・外角に比例した値を初期値として与えた．図 4〜図 6 はそれぞれ初期状態，100 回，300 回計算時のネットワークの様子である．上側が階層ネットワーク反応，下側が単一層ネットワーク反応を示す．ownership 反応は輪郭に対し垂直な線分で描かれ，線分の長さは反応の大きさに比例する．階層ネットワークのほうが早く収束に向かっているのがわかる． 図 7 は，輪郭に対し

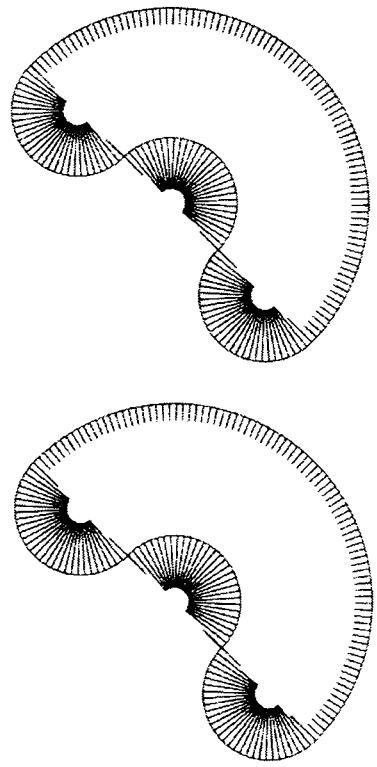


図 4: シミュレーション結果 (1)． 初期状態の様子．上側 : 階層ネットワーク，下側 : 単一層ネットワークの反応．輪郭に垂直な線分の向きと長さは ownership 反応のあるサイドと反応値に対応する．(以下の図も見方は同じ)

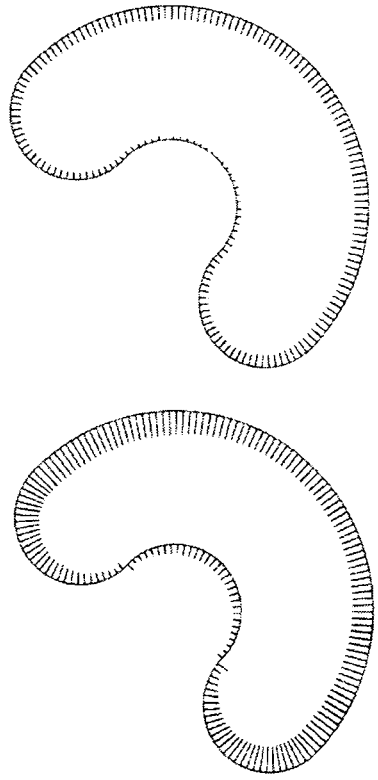


図 5: シミュレーション結果 (2)．100 回計算後の様子．

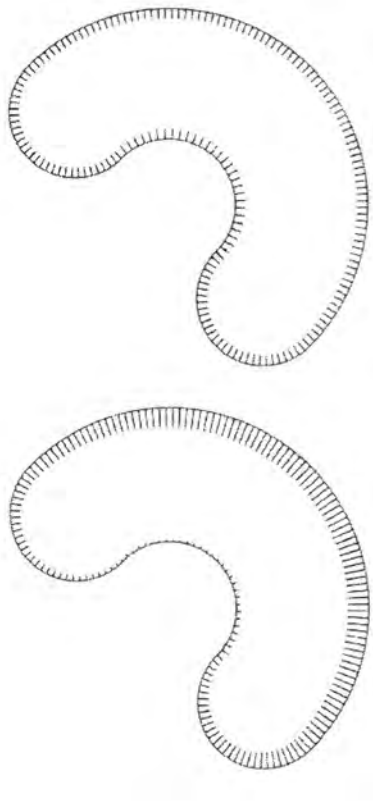


図 6: シミュレーション結果 (3). 300 回計算後の様子.

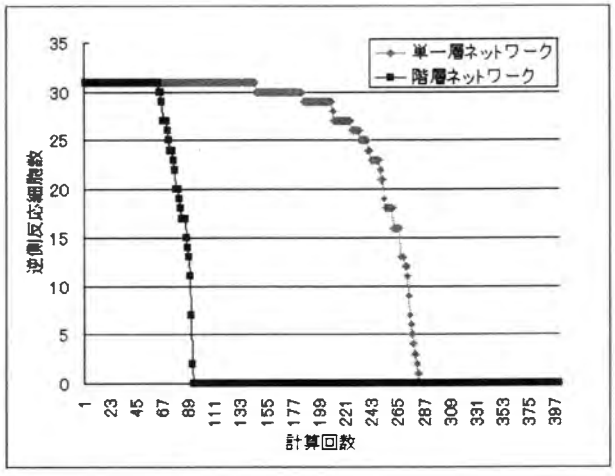


図 7: 図の領域側と反対側に反応する細胞数の時間変化の比較

図の存在する領域側と逆の側に反応をする細胞数の時間変化を，単一層ネットワークと階層ネットワークとで比較したグラフである．こちらからも階層ネットワークの反応の速さが読み取れる．

4 まとめ

本研究では，輪郭の帰属する物体領域の側を求める階層的神経回路モデルを提案した．コンピュータ・シミュレーションにより，階層化されたネットワークでは単層ネットワークに比べ反応収束までの時間が短くなることが確認された．

参考文献

[1] Rubin, E.: *Visuall wahrgenommene figuren*, Copenhagen (1921)

[2] Nakayama, K., He, Z.J., Shimojyo, S.: Visual surface representation: a critical link between low-level and higher level vision, *Visual Cognition*, Kosslyn, S.M., Osherson, D.N. eds., MIT Press, pp. 1–70 (1995)

[3] Zhou, H., Friedman, H.S., von der Heydt, R.: Coding of border ownership in monkey visual cortex, *The Journal of Neuroscience*, Vol. 20, pp. 6594–6611 (2000)

[4] Driver, J., Baylis, G. C.: Edge-assignment and figure-ground segmentation in short- term visual matching, *Cognitive Psychology*, Vol. 31, pp. 248–306 (1996)

[5] Ullman, S.: *High-level vision*, MIT Press (1995)

[6] Sajda, P., Finkel, L. H.: Intermediate-level visual representations and the construction of surface perception, *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol. 7, pp. 267–291 (1995)

[7] Kikuchi, M., Akashi, Y.: A model of border-ownership coding in early vision, *Lecture Notes in Computer Science 2130 Artificial Neural Networks-ICANN2001*, Dorffner, G., Bishop, H., Hornik, K. eds., Springer, pp. 1069–1074 (2001)

[8] Field, D., Hayes, A., Hess, R. F.: Contour integration by the human visual system: evidences for a local "association field", *Vision Research*, Vol. 33, No. 2, pp. 173–193 (1993)

[9] Kapadia, M. K., Ito, M., Gilbert, C. D., Westheimer, G.: Improvement in visual sensitivity by changes in local context: parallel studies in human observers and in V1 of alert monkeys, *Neuron*, Vol. 15, pp. 843–856 (1995)

[10] Roelfsema, P. R., Singer, W.: Detecting connectedness, *Cerebral Cortex*, Vol. 8, pp. 385–396 (1998)

[11] Shimaya, A.: Perception of complex line drawings, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 23, pp. 25–50 (1997)

[12] Polat, U., Sagi, D.: Lateral interactions between spatial channels: supression and facilitation revealed by lateral masking experiments, *Vision Research*, Vol. 33, No. 7, pp. 993–999 (1993)

連絡先

〒 192-0982　東京都八王子市片倉町 1404-1
東京工科大学 コンピュータサイエンス学部
菊池 眞之
電話： 0426-37-2696
FAX : 0426-37-2112
E-mail: kikuchi@cs.teu.ac.jp

情報量最大化学習と視覚システム

A visual neural network self-organized through an infomax learning

岡島健治
Kenji Okajima
NEC 基礎研究所プロテオミクス研究センター
Proteomics Research Center, Fundamental Res. Labs., NEC Corporation

Abstract: A neural-network learning algorithm is proposed according to an information-maximization approach. A basic module of the model neural network consists of two simple cells and one complex cell. Each simple cell calculates a linear summation of input image. The complex cell calculates a squared sum of their outputs. The algorithm updates the synaptic weights of simple cells so that the information obtained from the output of the complex cell is increased. A computer simulation was carried out, and it was found that the algorithm generates Gabor-wavelet-like weights similar to those observed in visual cortical neurons.

1. はじめに

サルやネコなど高等動物の視覚野の細胞は，大別すると単純型細胞と複雑型細胞とに分類されるが，これらの視覚細胞はいずれも，視野中の特定の領域に，特定の方位を持つ線分やエッジを見せた場合に激しく反応するという「方位選択性」を持つことが知られている．中でも単純型細胞の受容野は Gabor 関数，すなわち次式のようなガウス関数 $G_\sigma(x)$を包絡面とする正弦波

$$\phi_\varphi(x) = G_\sigma(x)\cos(kx+\varphi)$$

によって良く近似できることが明らかになっている．

このような視覚細胞の性質を情報論的な観点から理解，解明しようとする研究が活発に行われている．Olshausen と Field による「スパースコディング」に基づく研究 [1]，Bell と Sejnowski による独立成分解析に基づく研究 [2] 等である．本研究ではこれらとは別のアプローチ，Linsker[3] が提唱した情報量最大化のアプローチに基づいてニューラルネット学習則を導出する．そしてコンピュータシミュレーションによってこの学習アルゴリズムが脳の視覚細胞に類似の性質を持つ細胞群を生成できることを示す．

2. 基本モジュールの神経回路モデル

ここで基本となる神経回路は2つの「単純型細胞」と1つの「複雑型細胞」とから構成されるものとする．全体のネットワークはこれを多数並べて構成する．Hubel とWiesel による階層仮説に従い，各単純型細胞は外側膝状体に相当する入力層から入力を受けその出力が複雑型細胞へと流れるものとする(図1)．

まず各単純型細胞はそれぞれ結合重み $W_i(x,y)$によって入力パターン $f(x,y)$を線形加算する．

$$S_i = \sum_{x,y} W_i(x,y) f(x,y) \qquad i=1,2 \quad (1)$$

次に複雑型細胞は，これら2つの単純型細胞から入力を受けその2乗和を出力するものとする．

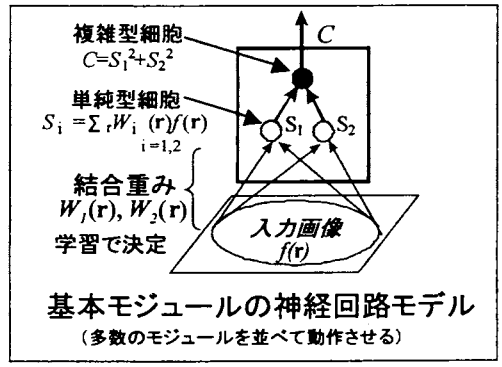


図1 基本モジュールの神経回路モデル

$$C = S_1^{\,2} + S_2^{\,2} \qquad (2)$$

この2乗和は複雑型細胞の(出力が飽和しない動作領域での)非線形性を近似したもので「エネルギーモデル」でよく使われる近似である．(1)式の結合重み $W_i(x,y)$を以下に述べる学習によって決定していく．

3. 学習アルゴリズム

学習に用いる学習パターンは予めクラス分けがなされているものとし，クラスγに属する m 番目のパターンを $f_{\gamma,m}(x,y)$と表わすことにする．

学習の評価関数としては，ネットワークの出力 C を知ることによって画像が属するクラスに関して得られる情報量，すなわち C とγとの間の相互情報量

$$MI[C,\gamma] = H[C] - \langle H[C|\gamma]\rangle_\gamma \qquad (3)$$

を用いる．ただしここで $H[C]$，$\langle H[C|\gamma]\rangle_\gamma$ はそれぞれ C のエントロピー，及び条件付エントロピーを表わす．$\langle\ \rangle_\gamma$はクラスγに関する平均化操作を表わす．

学習則はこの評価関数 MIを増加させるように結合

重みを更新することによって得られる.

$$\Delta W_i \propto \partial MI / \partial W_i, \qquad i=1,2 \qquad (4)$$

残念ながら一般の場合には右辺の微分を計算することは容易ではない. そこで, ここでは加法的なガウスノイズを仮定し, さらに低 S/N 比の近似を行う. この場合, 相互情報量 MI を SN 比で展開することができ, 結局次式の Hebb 則類似の学習則が得られる[4].

$$\Delta W_i(x,y) \propto (\overline{C}_\gamma - \overline{C}) S_i f_{\gamma,m}(x,y) + B'[W_1, W_2] \qquad i=1,2 \qquad (5)$$

ただしここで $\overline{C}$ は出力の平均値, $\overline{C}_\gamma$ は出力のクラス内平均値を表わす. B' の項は数値的に計算される項で, モジュール内の2つの単純型細胞の重み W_1, W_2 を正規直交させるように働く.

4. シミュレーション

学習データ 学習に用いた入力画像は次のような手順で生成した. まずランダムに選択された位置にランダム画像を生成する. さらにその画像の位置を上下左右にわずかに(4画素以内)ずらした一連の画像を生成する. これを繰り返し多数の学習データを生成する. ところで, 短い時間間隔(例えばサッケードと次のサッケードとの間)では, 網膜像の位置は多少ずれるかもしれないが, 位置がずれてはいても同一の物体が映っている, と考えることは合理的だろう. これを勘案し, 上記で生成された画像データのうち位置だけが互いにわずかにずれた画像は「同じクラスに属する」ものと定義し学習を行った.

結果 ランダムな結合重みを初期値とし, 実際に画像を入力し学習を進めると, 報告されている単純型細胞の受容野と類似の, 異方的な結合重みパターンが生成されてくることが分かった(図2). 学習終了後の複雑型細胞の性質も報告されている実際の複雑型細胞と類似していた.

5. まとめ

本研究で得られた結果は, 視覚細胞がある意味で「最適」に作られていることを強く示唆する結果であると言える. また, ここで述べたアプローチは, 識別に有効な特徴を学習によって決定するという問題にも応用できる. 実際, 筆者らは視覚細胞類似の特徴抽出セルと情報量最大化学習をベースにしたシステムを顔検出の問題に適用し, 高い検出性能が実現できることを確認している[5].

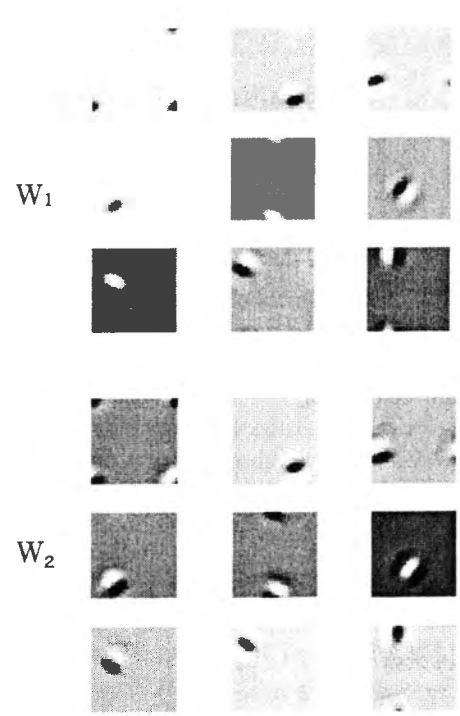


図2 学習で生成された単純型細胞の結合重み
(方位選択性を示す異方的パターンが得られた. 9個のモジュールを学習させた結果を示す. 学習時にモジュール間には抑制性の相互作用が導入されている. 周期的境界条件を用いた.)

参考文献

[1]B.A.Olshausen, and D.J.Field, "Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code from natural images," Nature, vol.381, pp.607-609, 1996.

[2]A.J.Bell, and T.J.Sejnowski, "Edges are the 'Independent Components' of natural scenes," in Advances in Neural Information Processing Systems 9, eds. M.C. Mozer et al., pp.831-844, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1997.

[3]R.Linsker, "Self-organization in a perceptual network," Computer, vol.21 (3), pp.105-117, 1988.

[4] K.Okajima, "An `infomax-based learning rule that generates cells similar to visual cortical neurons. Neural Networks, vol.14, pp.1173-1180, 2001

[5] H.Imaoka and K.Okajima, "An algorithm for the detection of faces on the basis of Gabor features and information maximization, to appear in Neural Computation. 2003

連絡先
〒305-8501
つくば市御幸が丘34
NEC 基礎研究所プロテオミクス研究センター
岡島健治
電話: 029-850-1137
FAX; 029-856-6136
Email: okajima@frl.cl.nec.co.jp

平面の空間認識を行うMST野神経網モデル

A model for detecting a plane spatially in area MST of the visual cortex.

岡本　浩明　　川上　進
Hiroaki Okamoto　　Susumu Kawakami
富士通(株)　　東北大学
Fujitsu Ltd.　　Tohoku Univ.

Abstract: A neural network model for perceiving a plane from visual motion was proposed. Integrating the local velocities detected by MT cells, MST cells detect the plane's spatial parameters; orientation and time-to-contact. Simulation of modeled network, linking retinal and MST cells, showed selective responses for the parameters of a moving plane correctly.

1　はじめに

我々が動きながら周囲の環境を認識して行動する際，網膜に写るオプティカルフローを手掛かりとしていることがGibson[1]によって提唱された．このオプティカルフローに基いて，自己運動の知覚や対象物の奥行き認識が行われているが，その神経メカニズムについてはまだ分かっていない．

オプティカルフローを用いた心理実験により，ヒトが障害物の回避行動などを取る際，衝突するまでの時間(time-to-contact)を基準にしていることが分かった[2]．また，カツオドリやハエの行動実験からも，到達時間／衝突時間を基準にしていることが観察された．両眼立体視を利用できない場合，視覚情報だけから対象物の絶対距離を測ることは難しく，このような到達時間が生物の行動の基本になっていると考えられる．

一方，神経生理学的には，空間認識は大脳のMT野からMST野へと至る運動視経路（図1）で処理されている．MT野の細胞は局所速度に選択的に反応するが，対照的にMST野の細胞は視野の広い範囲の動き（オプティカルフロー）に反応する．しかも，単純な平行運動だけでなく，視覚刺激の回転や拡大縮小，さらに，自己移動方向に対しても選択的応答を示す．またハトの視覚中枢には，近付いて来る物体の衝突時間に反応する細胞も見付かっている[3]．

これらの知見に基き，広視野運動視の中枢であるMST野において，平面（3次元空間の基本的な構成要素）の方位，及び，その平面までの到達時間を空間的に認識していると考え，網膜からMST野までの神経網のモデル化を行った．

2　空間認識アルゴリズム

2.1　平面検出の原理

網膜に映った画像から，平面の「方位」と「到達時間」を検出するアルゴリズムについて説明する．平面が到達した時とは，平面が眼球中心を通っている状態を言う．静止した平面に向かって一定速度で直進する場面を想定

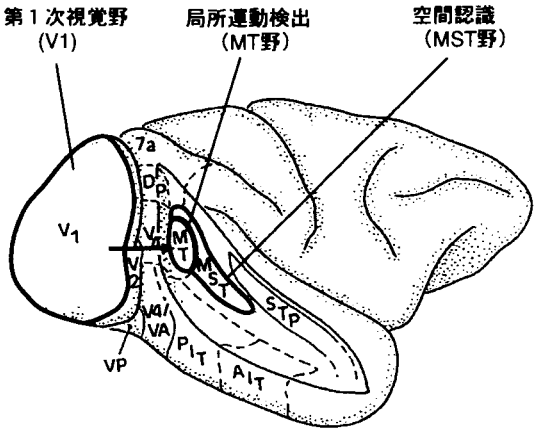


図1　運動視の視路

しているが，相対的には同等であるため，図2では静止した眼球に平面が一定速度で接近して来るものとして描いてある．移動方向vは分かっているが、その速度は未知であると仮定する．

この平面上にある3点$\{P_0\}$を考える（時刻T_0）．平面上のこれら3点は中心投影によってそれぞれ球面（眼球面）上の点群$\{p_0\}$に投影される．もしこの時，ある投影点が乗る平面が球中心を通っていると仮定すると，平面の方位（法線ベクトル）は，球中心からこの投影点へのベクトルと直交していることになる．従って，この投影点を極変換によって大円に変換すると，平面の法線ベクトルはこの大円上のどこかに存在することが分かる．ここで極変換とは，各点を球面上で，その点を北極とみなした場合の赤道に変換する処理を言う．

初期時刻T_0から平面が移動するにつれて，投影点$\{p\}$も順次動いて行く．それに合わせて，極変換した大円も次第にシフトする．平面が一般的な位置にある時（時刻T_0, T_1），この3個の大円は1箇所で交わることは無いが，平面が球中心を横切る瞬間（時刻T_C）には，これらの投影点$\{p_c\}$は全て一つの大円上に乗る．従って，その極変換群はその大円から90°離れた1点で交差する．この交差点の位置が平面の方位（法線ベクトル）n

を示す．また，初期位置からこのように 1 点で交差する瞬間までの時間 $(T_C - T_0)$ が，この平面の到達時間 (time-to-contact) を表す．

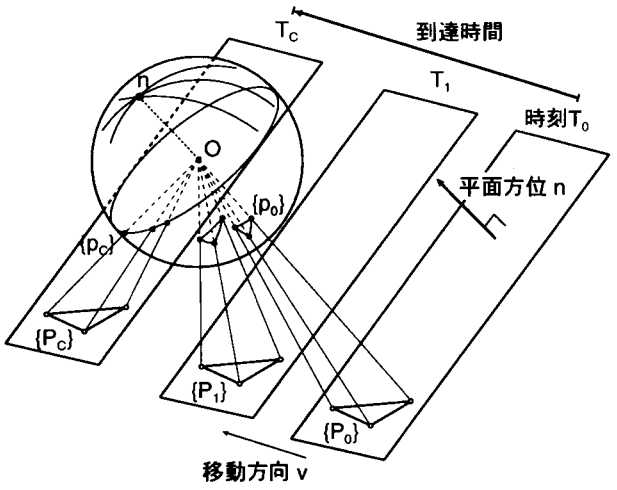


図 2　平面検出の基本原理

2.2　平面パラメータの検出

次に，この基本原理を実行する具体的なアルゴリズムについて説明する．

平面上の点の 3 次元位置や速度は分かっていないため，未来の各時刻での球面上の投影点を直接知ることはできない．従って，画像から得られる球面上の各位置の局所速度（オプティカルフロー）から各々の投影点を予測する必要がある．その方法を複比変換によって定式化した．

図 3(A) は半球面を平面に押しつぶして表現した図である．移動方向 $p_\infty = v/|v|$ を既知とした場合，初期位置 p_0 の投影点の通る移動軌跡 $p_0p_1p_cp_\infty$ は図中の点線の大円となる．予測投影点 p_c を極変換したものが大円 g_c である．$T_1 - T_0 = \Delta T$ とした場合，規格化到達時間 t_c（到達時間を ΔT で規格化した量）は複比変換によって次式で表わせる．(詳細は文献 [4] を参照)

$$t_c = (p_\infty p_0 p_1 p_c) = (p_\infty p_1/p_0 p_1)/(p_\infty p_c/p_0 p_c)$$

この移動軌跡の断面図を図 3(B) に示す．このように，中心角を用いて初期位置を a，局所速度を τ，予測位置を x として表すと，規格化到達時間 t_c は次式となる．

$$t_c = (\sin(a+\tau)/\sin\tau)/(\sin x/\sin(x-a))$$

この式を，予測投影点の位置 x について解くと次式が得られる．

$$x = \tan^{-1}((\sin a \sin(a+\tau))/(\cos a \sin(a+\tau) - t_c \sin\tau))$$

規格化到達時間 t_c をある値に設定した場合，局所速度 τ により，球面上の予測投影点 p_c が中心角 x で決定される．設定する到達時間を変えれば，この予測投影点 p_c も順次移動し，それを極変換した大円 g_c も次第に変化する（図 3(C)）．平面上に 3 点がある場合，各点を複比変換＋極変換によってパラメータ空間内の大円に変換すれば，それらが 1 点で交わる交差点の座標によって，平面方位と規格化到達時間が決定される．

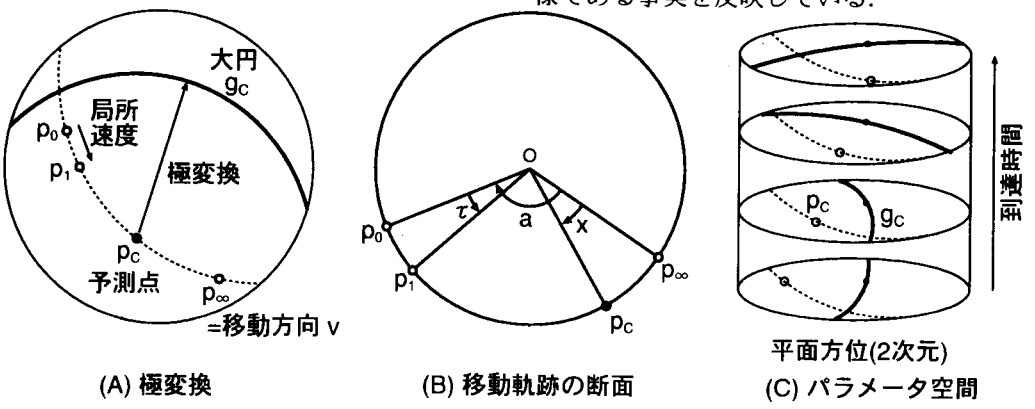
以上の平面検出アルゴリズムをまとめると次のようになる．(1) 球面上の投影点の局所速度と移動方向から，未来の各時刻の投影位置を複比変換によって予測する．(2) その予測投影点を極変換によって大円に変換する．(3) 変換された大円が 1 点で交差する時，その交差点が平面の方位を表し，交差する時刻が到達時間を表す．

3　神経網モデル

前節のアルゴリズムに基づいて網膜から MST 野までの一連の神経網をモデル化した．

モデルの全体像を図 4 に示す．移動方向は視野中心に一致している．視野全体を小領域（受容野）に分割し（図 4A），それぞれの受容野において局所運動検出処理を行う（図 4B）．この局所運動を統合して，MST 野の細胞コラム（図 4C）が平面のパラメータを検出する．

なお生理学的知見を考慮して，網膜細胞の間隔と受容野サイズを，網膜偏心度に応じて拡大させている．網膜間隔と受容野サイズの比率は一定としているため，受容野内の網膜細胞数および各階層の細胞配列の大きさは偏心度によらず一定であり，皮質コラムのサイズが一様である事実を反映している．



(A) 極変換　　(B) 移動軌跡の断面　　(C) パラメータ空間

図 3　平面パラメータの検出アルゴリズム

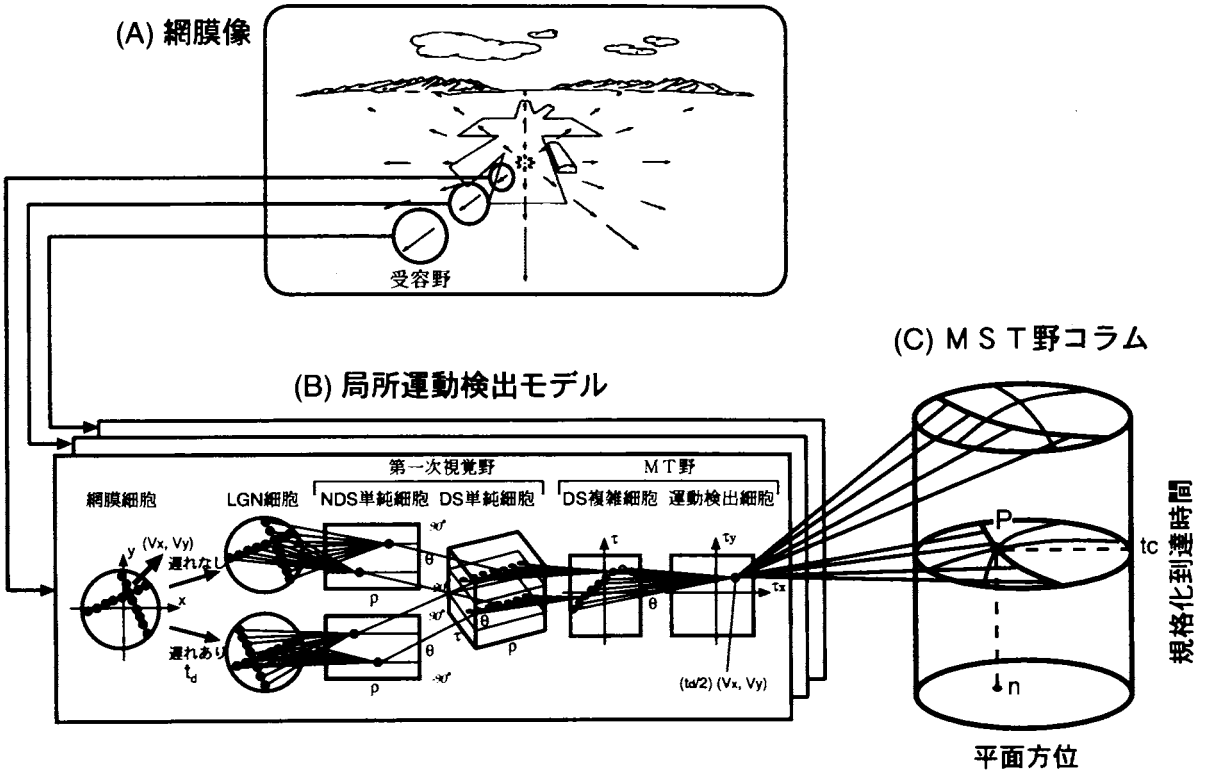


図 4　全神経網モデル

3.1　局所運動検出モデル

各々の受容野の局所運動を局所運動検出モデル [5] によって検出する．このモデルは，網膜から外側膝状体 (LGN) を通り V1 野・MT 野へと至る運動視経路に存在する 5 種類の細胞の階層構造からなる．LGN 細胞・NDS 単純細胞・DS 単純細胞・DS 複雑細胞・運動検出細胞が，それぞれ画像遅延・ハフ変換・時空間相関・集積・逆ハフ変換の処理を行い，最終的に MT 野で局所運動を検出する．LGN での遅れあり・遅れなしの 2 種類の細胞により生成された空間的な変位をもとに Reichardt 型の時空間相関により動きを検出するものである．遅れあり LGN 細胞の遅れ時間として，ネコでの実験報告を基に 50ms と設定しており，規格化到達時間も $\Delta T = 50ms$ で規格化した時間とする．

なお，この局所運動検出モデルでは，MT 野の DS 複雑細胞で 1 次元速度を検出し，運動検出細胞でそれらの 1 次元速度を統合して 2 次元速度（局所運動）を検出する．これらの 2 種類の MT 野細胞が，それぞれ特定の条件において双峰的な運動方向選択性を示すメカニズムを明らかにし，ニホンザル MT 野の検証実験において予測通りの双峰性を記録することに成功した [6]．

3.2　MST 野の神経網モデル

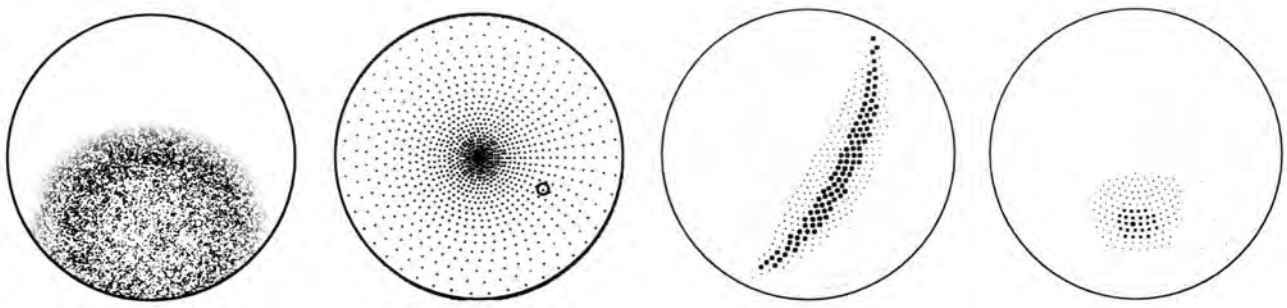
基本的には，MT 野－ MST 野間の神経網モデルは図 3(C) で示したアルゴリズムを細胞配列に置き換えて表現したものである．

MST 野の細胞配列として，平面方位（2 次元）と規格化到達時間を座標軸とする 3 次元コラム構造を仮定する．これは図 3(C) に示したパラメータ空間と同じである．図 3(C) の空間内の大円群は，局所速度 τ から求まる大円を各到達時間毎に並べたものである．それに従い，局所速度 τ に相当する MT 野運動検出細胞と，大円群上に位置する MST 野細胞の間を結ぶ神経網を生成した．このように，1 個の MT 野運動検出細胞は MST 野コラム内の大円群上の多数の MST 細胞に神経投射を行っている．図 4(C) ではその一部（2 箇所の到達時間）の神経結線を模式的に描画してある．更に，別の 2 つの受容野における神経結線も描き加えてある．3 個の受容野の神経網は点 P において 1 点で交差する．点 P に対応する方位 n，到達時間 tc の平面が網膜像に映った場合，局所速度を検出して各受容野の運動検出細胞が強く反応する．それらの反応を集積して，点 P の位置の MST 細胞が最も強く反応することになる．その他の MST 細胞は，神経網が 1 点で交差しないので，相対的に小さな反応にしかならない．このようにして，最大応答の MST 野細胞の座標によって平面パラメータ（方位と規格化到達時間）が検出される．

4　シミュレーション

本モデルによるシミュレーションの結果を示す．

図 5(A) が網膜像（直径が視野 180 ° ）である．下向きに 45 ° 傾いたランダムドットの乗った平面が，距離 1m の位置から速度 1m/s で近付いて来ている．移動方



(A) 網膜画像　(B) 受容野の配置　(C) 単一受容野の応答　(D) 全受容野の応答

図 5　シミュレーション結果

向は視野中心軸に一致している．ここでは最初の網膜像だけを表示してある．規格化時間は $\Delta t = 50ms$ で，規格化到達時間は 20 になる．網膜細胞の間隔は偏心度に応じて次第に増加し，受容野サイズもそれに比例して拡大している．図 5(B) に受容野中心の配置を示す．受容野サイズは中心部で 2°，最外周部で 12° となっている．視野全体で網膜細胞数 50 万個，受容野数は 1000 個である．受容野の大きさは直径 33 細胞で一様である．

MST 細胞は，平面方位に対応して 1280 個の細胞が 2 次元に並んでおり，対応する方位は均等に分布している．その 2 次元配列が規格化到達時間軸に沿って 36 層並んでコラムを構成する．図 5(B) の丸印で示した受容野に対しての MST コラム応答を図 5(C) に示す．規格化到達時間 20 の断面を表示しており，各点の大きさが MST 細胞の応答強度を表している．極変換による大円状の神経網を反映して，大円状の反応分布が生じている．このような単一受容野の応答を全受容野にわたって集積した結果が図 5(D) である．これも，正しい規格化到達時間 20 の断面応答だけを示している．平面方位が下向き 45° の細胞が最も強く応答しているのが分かる．コラム全体でもこの細胞が最大応答となっており，平面を正しく空間認識できることを確認した．

5　まとめ

空間認識機能として重要な平面の 3 次元方位と規格化到達時間を検出するアルゴリズムを開発し，複比変換＋極変換で数理的に表現した．広視野運動視の中枢である MST 野でこのような認識を行っているものと推定し，MT 野の局所運動検出モデルと組み合わせて「網膜から MST 野までの神経網モデル」を構築した．

このモデルを，約 2000 万個の細胞とそれらを結ぶ約 3 億本の神経結線としてコンピュータ内に構築し，運動する網膜画像を入力してシミュレーションを行った．その結果，画像中の平面の空間パラメータ（方位と規格化到達時間）を正しく検出できることを確認した．

参考文献

[1] J. J. Gibson: The perception of the visual world, Houghton Mifflin, Boston (1950)

[2] D. N. Lee: A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision., Perception, Vol.5, No.4, 437-459 (1976)

[3] H. Sun and B. J. Frost: Computation of different optical variables of looming objects in pigeon nucleus rotundus neurons., Nature Neurosci., Vol.1, No.4, 296-303 (1998)

[4] 川上進，松岡雅弘，岡本浩明，細木信也：オプティカルフローを統合して平面の空間認識を行う大脳 MST 野神経網のモデル，電子情報通信学会論文誌 D2，Vol.J83-D-II, No.12, 2786-2797 (2000)

[5] S. Kawakami and H. Okamoto: A cell model for the detection of local image motion on the magnocellular pathway of the visual cortex., Vision Research, Vol.36, No.1, 117-147 (1996)

[6] H. Okamoto, et al.: MT neurons in the macaque exhibited two types of bimodal direction tuning as predicted by a model for visual motion detection, Vision Research, Vol.39, No.19, 3465-3479 (1999)

謝辞 本研究の一部は，文部科学省科学技術振興調整費「視覚系におけるニューロインフォマティクスに関する研究」で実施されたものであり，深く感謝する．

連絡先：

〒 243-0197
厚木市森の里若宮 10-1
富士通 厚木研究所自律システム研究部
岡本浩明
TEL: 046-250-8840
FAX: 046-250-8841
Email: h-okamoto@jp.fujitsu.com

Aperture問題における輪郭運動知覚と注意との関連について

On the relationship between perceptural grouping to motion and attention in apertures

林　勲
Isao Hayashi
阪南大学 大学院
Hannan University

親泊 元太郎
Gentaro Shinpaku
阪南大学 大学院
Hannan University

Abstract The physical data in the aperture experiments is significant to analyze human visual system. In this paper, we analyze the relationship between the perception and the attention mechanism when four types of stimuli are given.

1．はじめに

網膜での視覚情報は視野内の受容野に対応した各細胞で処理され，対象全般の知覚はより上位の外側膝状体や視覚野で認識される．しかし，各細胞から全体像を処理するメカニズムはいまだ解明されていない．視覚構造を解析する実験の一つに Aperture 実験 [1] がある．モニターに円が表示され，基本線分が円内を法線方向に右下から左上方向に移動する．基本線分の移動中に円の両側に 2 つの別の円が表示され，刺激線分が円内を法線方向に鉛直上方向か水平左方向に移動する．基本線分と刺激線分が連続した一直線として知覚グルーピングされた場合には，基本線分の運動方向は変更したように知覚され，刺激線分と同方向となる．この知覚は呈示時間が長くなるにしたがい高くなる傾向として観測される．しかし，呈示時間が 550ms 以上の低速度領域では，むしろ知覚認識率が下降する傾向がある [2].

本論文では，この下降現象が基本線分の移動によって注意が中心円に集中するために，対応する受容野が小さくなり，周辺方向に知覚が拡散しないことで起ると予想した．具体的には，周辺円付近に刺激信号を与えてより大きい受容野への信号を増大させ，呈示時間が長い領域で知覚認識率を上昇させることを試みた．ここでは，この仮説に基づいた輪郭運動知覚と注意との関係について実験結果を報告し，低速度と高速度の運動刺激に対する視覚機構の違いについて考察する．

2．Aperture 実験

被験者をコンピュータ前面の支持装置で緩やかに固定し，ディスプレイとの距離の剰余変数を 50cm に統制した．コンピュータは富士通製 PC(FMV-6550DX4e)，ディスプレイは 17 インチカラーモニター FMV-DP9713(垂直周波数 85.0KHz, 水平周波数 68.7KHz) を用いた．すべての実験は，円の半径：35mm，円間距離：95mm，基本線分の方向角：135° に固定し，刺激線分の挿入角度：-45° (鉛直上方向)，0° (左上方向)，+45° (水平左方向)，呈示時間：100. 250. 400. 550. 700, 850. 1000. 1150ms に対して運動知覚の認識を調べた．与える刺激信号として次の 4 種類を設定した．

(1) 挿入円の円弧を太くする．
(2) 挿入円の円弧を点滅させる．
(3) 挿入円外部に赤点滅刺激を与える．
(4) 挿入線分を赤色にする．

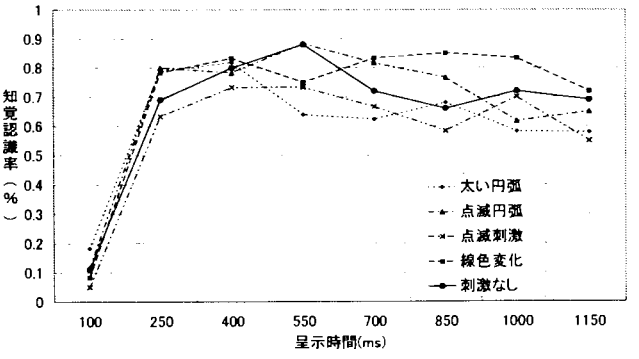


Fig. 1: Total Results

20 歳代の 3 名の被験者に対し，刺激信号を与えない実験との合計 5 種類を行ない，一人当たり 10 回の知覚の有無の回答を得て知覚認識率を計算した．結果を図 1 に示す．呈示時間 550ms を境として長い呈示時間に対して知覚認識率が降下している．刺激信号を与えた場合と与えない場合との一致性を見るために，相関係数を計算した．結果を表 1 に示す．刺激信号なしと刺激信号を挿入した知覚認識率との相関は高く，長い呈示時間における知識認識率の低下は刺激信号に依存しないことがわかる．

Table 1: Correlation Coefficient

	信号なし	太い円弧	点滅円弧	点滅刺激
太い円弧	0.41	–	–	–
点滅円弧	0.65	0.12	–	–
点滅刺激	0.71	0.51	0.26	–
線色変化	0.48	0.74	0.33	0.59

当初，周辺円付近に刺激信号を与えることにより，注意が周辺に拡散し呈示時間 550ms 以上でも知覚認識率は低下しないだろうと予想した．しかし，この予想に反して，刺激信号を与えた場合でも知覚認識率は上昇しなかった．この原因を解明するため，刺激信号を与えた各実験についてより検分した．円弧を太くする刺激を加えた場合の実験結果を図 2 に示し，挿入円外部に点滅刺激を加えた場合の実験結果を図 3 に示す．ただし，知覚認識率は実線で示し標準偏差値は波線で示している．また，知覚認識率の最大値と最小値を帯幅で表した．知覚認識率と

標準偏差値はともに，呈示時間が550msより短い場合には上昇傾向にあるが，550msより長い場合には一貫性がない．特に，図3において，呈示時間850msにおける知覚認識率は700msより下降していているが標準偏差値は上昇しており，最大値と最小値の偏差も大きい．さらに，850ms付近での標準偏差値は，100ms〜550msでの同じ知覚認識率の標準偏差値と比較しても同じとは限らない．他の実験結果でも同様な現象が見られた．この知覚認識率と標準偏差との関係を明らかにするため，各呈示時間tにおける次のγ_tを計算した．

$$\gamma_t = \frac{SD_t}{|PR_t - 0.5|}$$

ただし，SD_tは呈示時間tでの標準偏差値であり，PR_tは知覚認識率である．

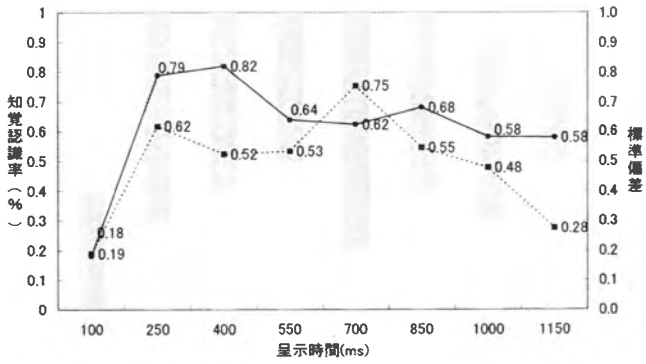


Fig. 2: Bold Arc

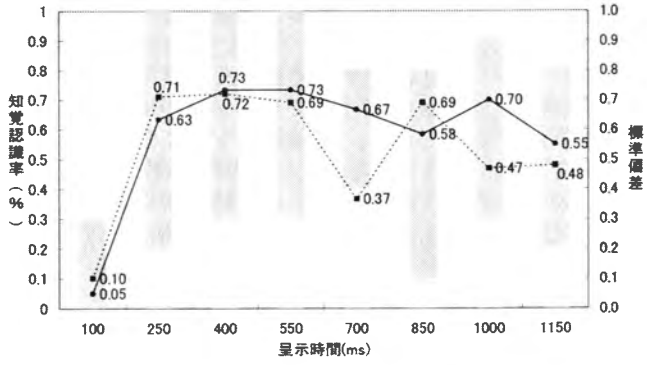


Fig. 3: Flashing Stimulus

知覚認識率は0か1に近づくと分散が小さくなる傾向にある．同じ知覚認識率に対するγの値を比較することにより，知覚認識率と標準偏差との関係を検分できる．図3の結果を表2に示す．ここで，VARは分散値であり，$Com.$は呈示時間850msを1とした場合の標準偏差値の比較である．呈示時間850msにおけるγは高く，前後の700msや1000msの呈示時間値と比較しても高い．また，知覚認識率が類似の250msと比較してもその標準偏差値は高い．他の実験結果でも同様に呈示時間700ms〜1000msにおいてγが高くなる現象が見られた．

Table 2: Result of Flashing Stimulus

	Display Time							
	100	250	400	550	700	850	1000	1150
PR	0.05	0.63	0.73	0.73	0.67	0.58	0.70	0.55
max	0.3	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.9	0.8
min	0.0	0.2	0.3	0.3	0.4	0.1	0.3	0.2
VAR	0.01	0.50	0.52	0.48	0.13	0.48	0.22	0.23
SD	0.10	0.71	0.72	0.69	0.37	0.69	0.47	0.48
γ_t	0.22	5.46	3.27	3.00	2.18	8.63	2.35	9.60
Com.	-	0.63	-	-	-	1.00	-	-

3．考察

呈示時間550ms以上での知覚認識率の下降が注意に由来すると考え，各種の刺激信号を与える実験を行なった．しかし，予想に対して知覚認識率は上昇しなかった．結論として，注意の機構は知覚認識率の下降と関係がない．

一方，呈示時間700ms〜1000ms付近においてγの値が高くなる現象を確認した．Hawken[3]は低速度と高速度の運動刺激では色と輝度情報を処理するメカニズムが異なると述べている．また，Cropper[4]は短い刺激信号の呈示に対して通常と異なる視覚メカニズムが存在すると述べている．こららの報告によれば，視覚機構は呈示刺激の速度に依存してその処理過程を切り替えている可能性を示唆している．

本実験でのγが高くなる現象が呈示刺激に対する視覚機能の切り替えを示しているかは明らかでないが，知覚認識率が上昇する短い呈示時間帯と知覚認識率が下降する長い呈示時間帯の境界において，γが高くなることは興味深い．今後，この現象をより詳細に検証する必要がある．本研究の一部は，文部科学省科学研究補助金(基盤研究C)課題番号14580433の一環として行われた．

参考文献

[1] 仁科 繁明，岡田 真人，川人 光男．輪郭運動方向の計算における充填過程と大局的バインディング．**電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会予稿集**, 1998.

[2] 林 勲，親泊 元太郎．Aperture問題における輪郭運動方位と速度に対する知覚について．**第18回ファジィシステムシンポジウム予稿集**, pages 513–514, 2002.

[3] M.J.Hawken, K.R.Gegenfurtner, and C.Tang. Contrast dependence of colour and luminance motion mechanisms in human vision. *Nature*, 367:268–270, 1994.

[4] S.J.Cropper and A.M.Derrington. Motion of chromatic stimuli: First-order or second-order? *Vision Research*, 34:49–58, 1994.

[連絡先]

Isao Hayashi, Hannan University
5-4-33, Amami-higashi, Matsubara, Osaka 580-8502
e.mail ihaya@hannan-u.ac.jp
http://www.hannan-u.ac.jp/~kcn/

視覚探索課題における視線移動とパターン処理/シリアル処理の関係に関する考察

A Study on Relationships between Eye Movement and Pattern/Serial Processing in Visual Search

小山　茉利
Koyama Mari
三重大学
Mie University

川澄　未来子
Kawasumi Mikiko
愛知淑徳大学
Aichi Shukutoku University

古橋 武
Furuhashi Takeshi
三重大学
Mie University

Abstract – A car navigation system should avoid attracting drivers' too much attention. This paper is aimed at clarifying a guideline for effective display of information for quick recognition by humans. The authors have conducted experiments called "visual search" and measure subjects' reaction time in order to clarify the relationships between visual information on a display and the ability of human cognition. The experimental results showed that the processing mechanism changed from parallel processing to serial processing and vice versa depending on both the number of targets and that of test stimuli, and on the difference between the brightness of the targets and that of the disturbing stimuli. But, the stimuli lied beyond human's effective sight, the reaction time was supposed to be affected with the eye movement. This paper conducts an experiment that restricts the area, where the stimuli are displayed, within the range of human's effective sight, and measures the eye movement and the subjects' reaction time. This experimental results show that (i) the switching point from parallel processing to serial processing does not depend on the number of targets; (ii) the way of eye movement changes at the switching point.

1．はじめに

今日の携帯情報端末などの普及により，コンピュータの画面から視覚情報を受け取る機会が増大している．カーナビゲーションでは，多くの場合ユーザの運転中に視覚情報を表示するため，注意を過度に引き付けることは許されない．このような状況下では適切な情報を素早く，かつ効率的に伝えることがより重要になってくる．人間の認知的側面を踏まえた視覚情報の呈示方法の研究が重要となっている．

人間は，外部から与えられる視覚情報を視覚系を通して並列的に絶えず受け取っているが，認知できる情報はそのうちの一部であるといわれている．視覚系の初期視覚においてはパターン処理とシリアル処理の二つの処理形態があると考えられている[1-4].

難波[5]は，呈示する視覚情報と呈示時間の関係の評価基準を検討し，表示された画面の持つ情報量を情報理論におけるエントロピー理論を応用して定量化した．これにより，経験的に扱われることが多かった画像の呈示時間の問題が，情報システムを設計する際の方針として利用できる可能性が示された．難波の情報量によれば，視覚情報の物理量は，表示されている文字や項目を数え上げることで定義づけられるとされている．しかし，同じ文字であっても例えば周囲との輝度差によって表示情報量は異なる可能性がある．

本研究では，カーナビゲーション等における表示画面の情報呈示形式を定量的に評価し，効率的な情報呈示方法を確立することを目的とする．上記目的のための基礎的検討として，これまでに呈示情報のパラメータをテスト刺激とターゲット刺激のそれぞれの個数および両刺激間の輝度差に絞り，視覚探索実験[6]を通して，これらのパラメータが反応時間に及ぼす影響について調べてきた．これまでの実験では，パターン処理からシリアル処理への切り替え点は，ターゲット刺激とテスト刺激のいずれの個数にも依存して変化し，輝度差が小さくなるにつれてパターン処理からシリアル処理への切り替えがターゲット刺激数の少ないほうへ移動する結果を得た[7].また，刺激の呈示時間を短くして，被験者がアイコニックメモリに蓄えられた情報のみに頼らざるを得ない状況を作り，視覚探索課題の実験を行い，アイコニックメモリに依存した場合でもパターン処理からシリアル処理への切り替え点が存在する結果を得た．しかし，これらの結果において，テスト刺激の呈示領域が有効視野の外にまで広がっていたため，被験者の反応時間には視線移動の影響が混在している可能性が指摘された．

本稿では，視線移動とパターン処理/シリアル処理の関係について検討する．視線の動きをアイカメラにより測定しながら文献[7]の視覚探索実験の追試を行う．次に，有効視野内にテスト刺激を納めて同様の実験を行う．得られた結果は，有効視野内にテスト刺激がある場合には，(1)反応時間はテスト刺激の個数に依存しないこと，(2)パターン処理とシリアル処理の切り替え点を境に視線の動かし方が変化することを示唆している．

2．視覚探索課題を用いた従来実験

文献[7]では視覚情報の呈示条件により人間の初期視覚におけるシリアル処理とパターン処理の変化の様子を調べるため，視覚探索課題を用いた実験を行った．

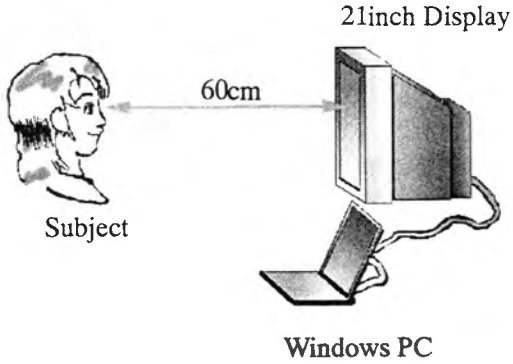


図１　実験の設定

視覚情報内のテスト刺激個数，ターゲット刺激個数を変化させ，タスク達成のための反応時間との関係を調べた．ターゲット刺激と妨害刺激の輝度差を変え，この実験を繰り返した．

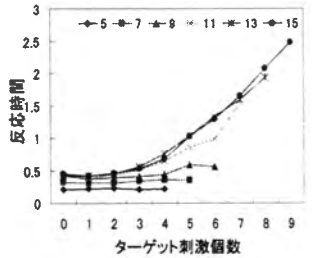
2.1 実験の設定

実験環境を図１に示す．被験者は 22 歳から 25 歳までの大学院生 3 名である．被験者は暗室で 21 インチ CRT ディスプレイ(FlexScan T962)に表示される視覚刺激を正面から観察する．被験者とディスプレイの距離は 60cm である．実験者は Windows PC(NEC LaVieC LC700J/5)で実験制御を行う．被験者にはボタンが渡されており，タスクに対する反応時間が PC 上に記録される．

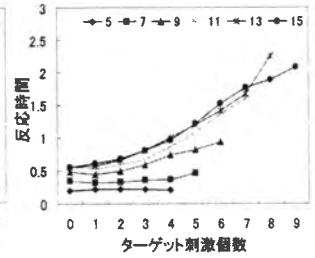
実験におけるテスト刺激，ターゲット刺激にはそれぞれ同じ形で輝度の異なる記号(●記号)を用いた．まず被験者には探索すべきターゲットが画面に呈示される．ターゲットが消えた後，横一列に並んだ複数個の記号から構成されるテスト刺激が表示される．被験者はテスト刺激の中からターゲット刺激を探索し，その個数が判明した時点でボタンを押す．その後，個数の回数分ボタンを押すことにより解答する．計測するのは，テスト刺激が表示されてから最初にボタンを押すまでの反応時間である．なお，テスト刺激の内のターゲット刺激の並びは，ランダムに決定する．各被験者の反応時間の平均を実験結果とした．

本研究では，視覚情報の複雑さを特徴付ける代表的な要因を取り上げ，これらの要因の相互の影響と認知に与える影響を調べた．

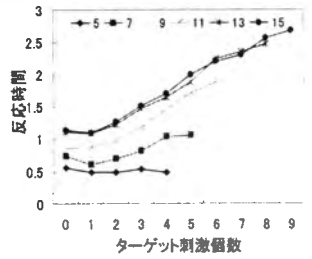
全体のテスト刺激個数は，5 個，7 個，9 個，11 個，13 個，15 個の 6 通りとした．テスト刺激はターゲット刺激と妨害刺激からなり，それぞれが白色と黒色である場合，両者の輝度差を 100%とした．実験では輝度差 100%, 60%, 20%の 3 通りを用いた．実験内の 1 つのセッション中はテスト刺激個数，ターゲット刺激と妨害刺激の輝度差は一定とし，ターゲット刺激個数のみを毎回変化させた．ターゲット刺激の出現確率を 1/2 から 1/8 の範囲で変化させ，ターゲット刺激個数の変化に伴う反応時間を計測した．ここで，出現確率が 1 である場合，呈示されるテスト刺激はすべてターゲット刺激となる．被験者はターゲット刺激の出現確率を予測することはできない．テスト刺激個数およびターゲット刺激と妨害刺激の輝度差を変化させて全 18 セッション行った．



（a）輝度差 100%



（b）輝度差 60%



（c）輝度差 20%

図２　反応時間（従来実験）

2.2　実験結果と考察

実験結果を図２に示す．それぞれ輝度差 100%，60%，20%の場合のターゲット刺激個数に対する反応時間を示す．テスト刺激個数毎に折れ線グラフが示されている．

図２(a)からは，ターゲット刺激個数，テスト刺激個数が共に少ない場合には反応時間はターゲット刺激個数に依存しないことが分かる．しかし，テスト刺激が増えるにつれて，反応時間はターゲット刺激の増加と共に増加している．ターゲット刺激数の増加のある時点でパターン処理からシリアル処理への切り替えがなされていると考えられる．この切り替え時点は，図２(b)(c)からターゲット刺激と妨害刺激間の輝度差の減少と共にターゲット刺激数の少ない方へと移動していることが分かる．

3．本実験

これまでの実験では，図3のようにテスト刺激個数が増加するにつれて，テスト刺激の表示領域が広くなり，有効視野外にまで出ていた．そこで図4のようにテスト刺激を有効視野内に納めた場合について2節と同様の実験を行った．その際には眼球運動測定装置（竹井機器工業（株）製 T.K.K.2920c Free View HMS）を用いて視線移動の測定を行った．併せて，文献[7]の実験についても視線移動の測定を行いながら追試を実施した．

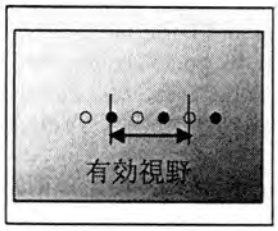
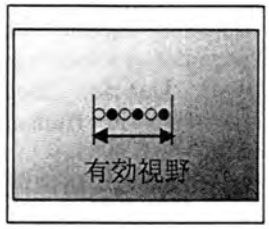


図3　従来実験の設定



（有効視野：10.5cm）

図4　本実験の設定

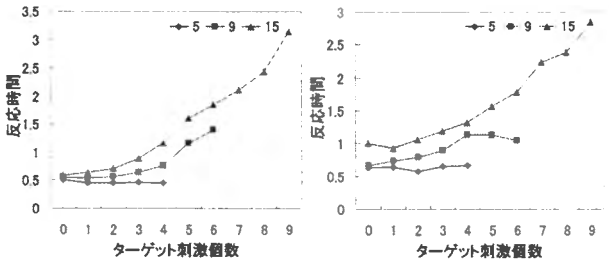
3.1　実験の設定

被験者は21～22歳の大学生2名である．全体のテスト刺激個数を5個，9個，15個の3通りとした．実験では輝度差100%，60%の2通りを用いた．

3.2　実験結果と考察

反応時間の結果を図6，7に示す．それぞれ輝度差100%，60%の場合のターゲット刺激個数に対する反応時間をテスト刺激個数毎の折れ線グラフで示す．

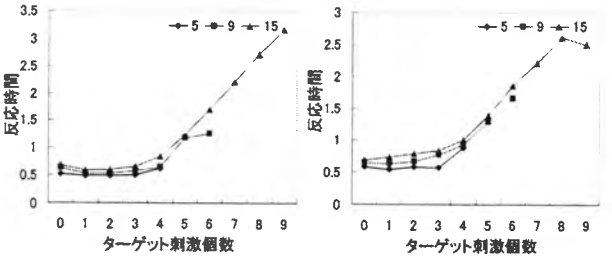
図6の従来実験の追試結果からは，反応時間はテスト刺激の個数と輝度差に依存してばらついてしまい，パターン処理とシリアル処理の切り替え点が不明確となっていることが再確認された．一方，図7の本実験の結果からは，反応時間はテスト刺激の個数には依存しないことを示唆している．パターン処理とシリアル処理の切り替え点は明瞭となった．



（a）輝度差100%　　（b）60%

図6　反応時間

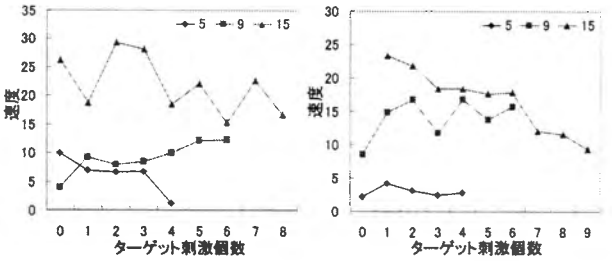
（テスト刺激：有効視野外にまで存在）



（a）輝度差100%　　（b）輝度差60%

図7　反応時間

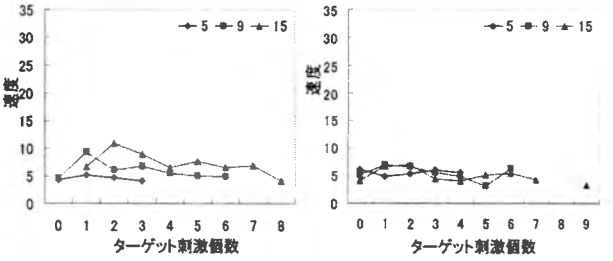
（テスト刺激：有効視野内に存在）



（a）輝度差100%　　（b）輝度差60%

図8　視線移動の平均速度

（テスト刺激：有効視野外にまで存在）

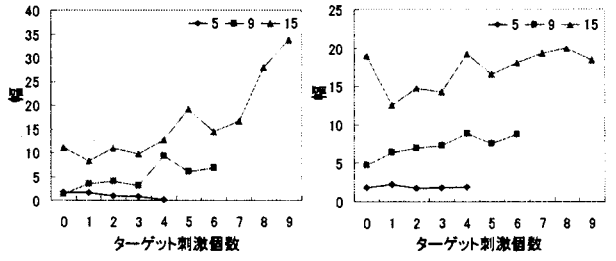


（a）輝度差100%　　（b）輝度差60%

図9　視線移動の平均速度

（テスト刺激：有効視野内に存在）

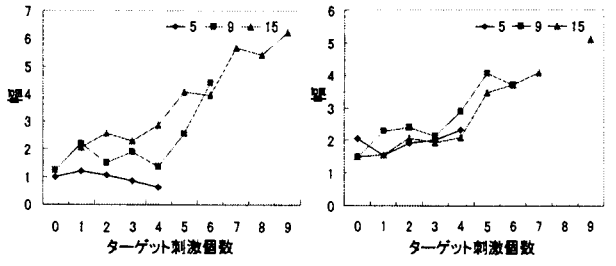
視線移動の平均速度の結果を図8，9に，視線の移動幅の結果を図10，11に示す．それぞれ5，9，15個のテスト刺激毎に折れ線グラフで示している．図8，10の従来実験の追試結果からは，視線移動の平均速度と視線の移動幅は，テスト刺激の個数に依存してばらついている．一方，図9から，速度はほぼターゲット刺激とテスト刺激のいずれにも依存せず一定であることが分かる．図11からは，視線の移動幅はターゲット刺激の個数が少ない場合はあまり変化がないが、ターゲット刺激の個数が増えるにつれて，視線の移動幅も増加している．また，図7のパターン処理からシリアル処理への切り替えと同様の傾向が見てとれる．図9，11の実験結果は，パターン処理からシリアル処理への切り替え点を境に視線の動かし方が変化していることを示唆している．



(a) 輝度差 100%　　(b) 輝度差 60%

図 10　視線の移動幅

(テスト刺激：有効視野外にまで存在)



(a) 輝度差 100%　　(b) 輝度差 60%

図 11　視線の移動幅

(テスト刺激：有効視野内に存在)

4．まとめ

視覚の認知情報量は受け取る人間がどのような認知処理を行うかによって変化すると推定される．難波の情報量では一定と見なされた情報が，従来実験により，輝度差を変化させることによって，認知される情報量が変化すると推測された．人間は，パターン処理で処理できる情報の場合はほぼ一定の時間で，シリアル処理の場合はターゲットの個数に比例した時間で情報を受け取る．さらに，認知情報量は，テスト刺激個数の増大と共に増大し，ターゲット刺激と妨害刺激の輝度差によっても変化することが示唆された．しかし，従来実験ではテスト刺激個数が増加するにつれて，表示領域が広くなり，有効視野外にまでテスト刺激が存在していた．そのために，視線移動の影響が混在している可能性があると指摘された．

本実験では，有効視野内にテスト刺激を納め，視線の動きをアイカメラにより測定しながら従来と同様の実験を行った．その結果，反応時間はテスト刺激の個数に依存しないこと，パターン処理とシリアル処理の切り替え点を境に視線の動かし方が変化することが示唆された．

本実験では簡単な視覚探索課題を用い，妨害刺激やターゲット刺激の形態を限定した．しかし，コンピュータの画面などでは様々な情報がユーザに呈示されている．視覚情報の表示形態やユーザが表示画面を見る状況は様々であり，より複雑な視覚情報に関する実験を行う必要がある．また，表示された情報に関する知識や経験を人間があらかじめ持っていた場合，画面から受け取る情報量が変化することが予想される．こうした人間の側で変化する要素の検討も必要であると思われる．

参考文献

[1] A. Treisman and A. Gelad, "A Feature Integratin Theory of Attention," Cognitive Psychology, Bol.12, pp97-136, 1980.

[2] H. Parshler, "Detecting Conjunctions of Color and Form: Reassessing the Serial Search Hypothesis," Perception & Psychophisics, Vol.41, pp.191-201, 1987.

[3] J. T. Mordkoff, S. Yaantis, and H. E. Egeth, "Detecting Conjunctions of Color and Form in Parallel, " Perception & Psychophysics, Vol.48, pp.157-168, 1990.

[4] J. Duncan, "Boundary Conditions on Parallel Processing in Human Vision," Perception, Vol.18, pp.457-469, 1989.

[5] 難波誠一「画像情報量と呈示時間」NHK 技術研究，Vol.35, pp.1-19, 1983

[6]横澤一彦，熊田孝恒「視覚探索　現象とプロセス」認知科学，Vol.3, pp.119-138, 1996.

[7] 板谷，川澄，古橋「視覚情報のパターン処理とシリアル処理に関する基礎検討」第 18 回ファジィシステムシンポジウム，pp.477-480，2002

[8] 中井，川澄，古橋「アイコニックメモリに依存した視覚探索課題におけるパターン処理/シリアル処理の切り替えに関する一考察」第 14 回東海ファジィ研究会，pp.6-1～6-6，2003

問い合わせ先

小山　茉利(Koyama Mari)
三重大学大学院　工学研究科
情報工学専攻
〒514-8507　三重県津市上浜町1515
E-mail：koyama@pa.info.mie-u.ac.jp

知覚情報としての不変項

Invariants as Perceptual Information

三嶋博之
Hiroyuki Mishima
福井大学 / ATR人間情報科学研究所
Fukui University / ATR Human Information Science Laboratories

Abstract: James J. Gibson's idea of ecological *invariants* instead of the traditional idea of *stimulus energy* is introduced as the basic unit of perception. The extraordinary nature of invariants and its implications for communication theories are discussed.

1 はじめに

一般に，伝統的な心理学においては，認識の基本単位としての「刺激」と，その内的処理の過程が重要視されてきた．一方，J. J. Gibson の生態心理学においては，「刺激」に替わって「アフォーダンス」と呼ばれる特別な情報が，人間や動物の行動を制約する生態学的単位として提案される[1][2]．本報告では，これら二つの主張を比較・対照しつつ，人間や動物にとっての基本的知覚単位に関する生態心理学の見解について報告する．特に，アフォーダンス知覚のアイディアの背景にある「不変項の知覚」という考え方について議論し，「公共的知識の共有」の問題に関する生態心理学的な立場を提案する．

2 刺激：知覚の伝統的単位

伝統的な心理学においては，1)まず物理的エネルギーが動物の感覚受容器を「刺激」し，2)その反応出力が信号として中枢に向けて伝達され，3)これを材料にして低次の感覚が生じ，4)それらがさらに処理されることによって高次の知覚が構築される，という一連の流れが仮定されている．

多くの場合，ここで「刺激」と呼ばれている物理エネルギーそれ自体には心理的意味や価値はなく，そもそも中枢系へと入力されているものは――外部の刺激そのものではなくて――感覚受容器の反応出力でしかないため，それは動物の側に備わった認知的な能力によって「意味づけられる」ものとみなされている．また，これら刺激が及ぼす動物への影響は，その刺激が動物に対して直接作用している場所・期間に限局されていると考えられているため，刺激の無いところに知覚は生じえず，ただ推測されるのみであると考えられている．さらに，これらのプロセスは個体の内側に閉じられたかたちで進行し，したがって私たちの心的経験は私的なものであるとされる[3][4]．

このような感覚あるいは知覚に関するモデルは，本質的に，個体間で情報の不均衡を生じさせるだろう．結果として，コミュニケーション研究において特別な種類の――いわゆる「情報伝達」による――コミュニケーション・モデルを仮定させる動因となっていると考えられる．

3 不変項：生態学的知覚情報

果たして人間や動物は，環境においてその振る舞いを上述のモデルに基づいて決定しているのであろうか．Gibson生態心理学においては，人間や動物の行動を特定する要因として「刺激」とは異なる単位を採用する[3][4]．

たとえば，建物内の「部屋」のような，開口部の設けられた閉じた空間の中に一人の知覚者がいたとする．部屋の壁は，知覚者から外の世界を覆い隠し，一つの出入口のみが外界に開いているとする．部屋の中の知覚者がこの開口部に向かって行こうとするとき，その移動を知覚的に導くものは何か．

伝統的な心理学で仮定されているように，知覚が刺激にのみ基づいているならば，知覚者が得られる外界についての手掛かりは開口部からもたらされる物理的エネルギーのみである．開口部を構成する壁面で遮蔽された外界の表象を得ることについては「推論」に頼ることとなる．

しかし，「刺激」とは異なる知覚の単位が存在する．それは，Gibson生態心理学において「不変項」と呼ばれるものであり，人間や動物の「知覚システム」[1]がその感受に敏感であるならば，外

界の見えない部分――現在は見えないこと――についての，伝統的な意味での「推論」は不要となる[2].

たとえば，図1で表されているような，視覚的パターンの漸進的な変形を考えてみる[2]．静止画で見るのと違い，これら一連の変形を動画として提示された被験者は，(「欠けていく円盤」ではなく)「隠されていく円盤」を見る．これはすなわち，円盤の「見えない部分（もしくは全体)」についての「存在」の情報が，提示された動画の特別な変形の形式として含まれているということを示唆している[2]．これは，被験者が変化の中にそれと相補的な持続性を知覚しているということであり，生態学的不変項の代表的な例として考えてよいであろう．

このような光学的パターンの変形は特別なものではなく，たとえば部屋の開口部を構成する壁と外界の景色との縁，廊下の曲がり角の壁と先の通路との縁など，人間や動物を包囲する環境のあらゆる場所で生じている．それら不変項を知覚できる限りにおいて，人間や動物は推論に頼ることなく「今ここ」に見えないものを特定し，その行動を予期的に制御することができる．

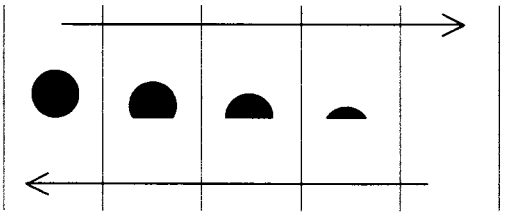


図1 連続的に変形する円盤

（本来は動画として提示されるが，ここでは連続的な静止画として表されている．）

4 知覚の公共性：公共的知識の共有にかんする新しいモデルに向けて

人間や動物が上述した生態学的「不変項」を利用可能であるとしたとき，知識の公共性の問題に関する新しい展望を得ることができる．

「実際，それぞれの観察点ごとに異なる光学的配列があり，異なる観察者が同時に同じ観察点を占有することはできない．しかし，観察者は動き，同じ経路を別の観察者が通ることもあるかもしれない．もし，一群の観察者があちこちと動きまわるなら，光学的な変形と遮蔽の下で，すべての観察者は同じ不変項を利用できることになるだろう．その不変項が知覚される限り，すべての観察者は同じ世界を知覚するだろう．おのおのの観察者は，世界における自身の位置が，いまここでは他人と違っていることにも気づくだろう．」(文献[2], p.200)

このように，Gibsonは，たとえば「知識を共有する」，あるいは「他の人の立場で考える」ということが，内的な思考や推論によって達成されるのではなく，文字通り他人の位置に自身を置くという行動によって経験的にもたらされることを示唆している[2]．これは，知覚あるいは認識の公共性という，伝統的な理論の上での取り扱いが非常に難しかった問題に対して，科学的あるいは実証的に取り組むことが可能であることを理論的に明確に裏付けるものであり，新たなコミュニケーション・モデル（たとえば文献[6]）を構築するための知覚的な基盤となるものであると考えられる．

引用文献

[1] Gibson, J. J.: The senses considered as perceptual systems, Westport, CT: Greenwood Press, (1983). (Original work published in 1966).

[2] Gibson, J. J.: The ecological approach to visual perception, Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, (1986). (Original work published in 1979).

[3] 三嶋博之:ギブソン知覚理論の根底：刺激情報，特定性，不変項，アフォーダンス．システム/制御/情報（システム制御情報学会誌），46(1), 35-40, (2002).

[4]三嶋博之: ギブソン生態心理学のアイディア：刺激から情報へ，人工知能学会誌，18(2), 163-169, (2003).

[5] 岡田美智男: 社会的な相互作用とそのリアリティを支えるもの，岡田美智男・佐々木正人・三嶋博之（編）；身体性とコンピュータ，pp.221-232，共立出版，(2001). (Original work published in 2000).

付記：

本報告は，総務省による戦略的情報通信研究開発推進制度の補助を受けて行われた研究（スキルの獲得・伝承を行う関係発達論的なインタフェースに関する研究，研究代表者：ATR HIS 岡田美智男）の一部である．

連絡先:

〒910-8507
福井市文京3-9-1
福井大学 教育地域科学部
三嶋 博之
電話: 0776-27-8742
FAX: 0776-27-8742
E-mail: a980014@icpc00.icpc.fukui-u.ac.jp

レンズモデルを用いた人間—自動化のコラボレーション知覚とメタ評価

Perception and Meta-Evaluation of Human-Automation Collaboration Using Lens Model

○ 椹木 哲夫　堀口 由貴男
Tetsuo Sawarag　Yukio Horiguchi
京都大学大学院　京都大学大学院
Kyoto University　Kyoto University

Abstract: In this paper, we propose a new designing method using the *ecological approach*, since we would like to stress the importance of the agent's ability to create reciprocal relationships with the human user (i.e., a social ability), rather than its knowledgeable ability enclosed within the agent itself. We propose to use Brunswik's Lens Model Analysis to model the agent's meta-recognition mechanism. Based on this analysis, then, we designed an agent that can infer the coordination level with a particular human, identify his/her skill levels, and adjust the level of shared situation awareness with its human partner.

1．はじめに

近年，人間と機械（自動化）との間での分業化はさまざまな負の効用をもたらし始めている．実際，自動化の能力が単純に人間の労働を代替するだけの道具（task-offloading tool）としての人工物から，判断や意思決定・学習までをも自律的に行うほどに知能化の進んだ自動化エージェントとの協調系のデザインは必ずしも固定的な分業ではうまくいかない．我々は，このような人間が本来有する行動多様性と，人間のタスクを部分的に代行しるような自動化機器との関係が，作業環境場の要因によってどのような影響を受けるものであるかについての研究を遂行している．本稿では，自動化と共生する人間の作業環境を人間－機械－環境協調系（共創場）として捉え，生態学的アプローチに基づいて，環境（手がかり）から判断を分析する手法であるレンズモデルを用いて人間の行為の多様性を説明する．そして，人間と自動化の協調が進む段階をレンズモデルにおける諸指標により同定し，その機構を機械に導入することで相互の間のインタラクションをメタ評価して状況認識をモニタリングするためのモデルを構築する．

2．人間—自動化エージェントの共創におけるメタ認知

2.1 人間—自動化—作業環境で形作られる制約

従来の人間の認知モデルを見直す考え方として**分散認知**（distributed cognition）の研究領域がある．分散認知においては，外部環境あるいはパートナーとしての他者との間での「能動的」な関係構築が，認知主体（行為主体）の認知負荷を減ずる有効な手だてとなっている点が強調される．ここでの「能動性」とは，寄与の環境パラメータのみに依存するのではなく，行為者自ら環境・他者に作用を起こしその応答を観察することで得られるより有効な新たな手がかりを収集することができることを意味する．さらに多数の直接知覚可能な諸変数間の相関関係から，自らの行動決定にとって有意な要因となりえる少数の潜在的な深層変数を抽出し，これによって行動決定の自由度の低減化を計ることができる．このことは自律性を前提とするエージェントと人間とのコミュニケーションにおいても同様で，両者が自然な多様性に富む相互作用の中から，互いの相補的な役割を自ら見いだしていけるようなボトムアップ型のインタラクション設計原理の究明が必須となる．

我々はこのような人間—自動化—作業環境からなる３者間の関係を捉えるにあたり，人間操作者に利用可能な手がかりとしてシミュレーション環境場で直接利用可能な諸変数群と捉え，人間操作者がシミュレータ環境で参照できる手がかりと，一方自動化の側でシミュレータ環境から参照できる手がかりに違いがある際に，両者が相互に相手に合わせるという共適応の形態がどのような違いとして現れるかについて研究を行っている（**図１**）．

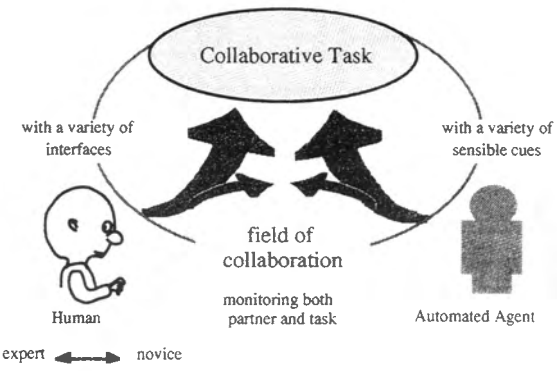


図１　人間とエージェントの共創場

2.2 共創におけるメタ認知の役割

共創とは異なる背景を持つ人々が目標を共有し，その実現に向かって一緒になって創造を行う共同的活動のことを言う．そこでは，互いの主体性や独自性を侵犯することなく，互いが文脈をリアルタイムに創出し，共有しつづけていくという相矛盾した状態を自身のうちに整合させることが必要となる．人間と機械の共同作業において共創とは協調を行っている両者が互いの役割をあらかじめ固定することなく，能動的に振舞いつつも両者を拘束する条件に対して自身を調節していくプロセスである．新しい状況に対して，その状況と自身との関係を知ることが，複雑で無限定な環境の中で両者が文脈を生成するために必要なことであり，自身の行為を環境の中に照らし合わせ，客観的に見つめる能力が不可欠となる．

共創において，自身の行為と環境の変化を照らし合わせ，その変化を自身にフィードバックすることによって**文脈**は生成される．注目すべきは協調を行う両者が直接行為のやり取りを行うのではなく，両者を取り巻く環境を介して振舞い，知覚するという点である．

文脈が生成されるということは，それぞれの行動主体の**主観的認識世界**としての環境の秩序が高まるということであり，そのことが行動主体の環境への作用や判断の仕方に関する基準を変容させていくことである．このときの自身の行為と環境の変化を照らし合わせるときの判断基準に関する活動が**メタ認知**である．協調行為を例にとって見ると，ある評価基準に沿って協調を試行錯誤的に行っている状況において，それをモニタし，いつ協調がうまくいっており，いつうまくいってないのかを知った上で評価基準が妥当であるのかどうかを判断することである．

人間と自動化エージェントが共同作業を行う際にも，環境が動的である以上，あらかじめ固定的なモデルを導入して振舞いを決定することは困難であり，一方完全な自己組織化に任せることも収束性からみて好ましくない．人間と自動化が高度な協調活動を行うためには，エージェントが人間と自身の行動をメタなレベルで監視し，協調具合がどうであるかを判断する状況認識の能力が必要となる．すなわちある規範のもとでのユーザ行動の評価を試み，これが整合しない場合にはこれまでの評価規範を見直し再評価を試みるようなメタ認知機能である．本研究ではこのような観点からレンズモデルの適用を考える．

3．共創場における人間判断の変容のレンズモデル分析

Brunswik の提案による元来のレンズモデルは単一の行為者と環境との関係を捉えるモデルであるのに対して，本研究ではこれを人間－エージェント－シミュレーション環境からなる三者間の関係に拡張したモデルとして考える．すなわち判断主体となる人間とエージェントに利用可能な手がかりを，シミュレーション環境における直接利用可能な諸変数群として捉え，各主体の判断をそれらの諸変数群から説明することを試みる．

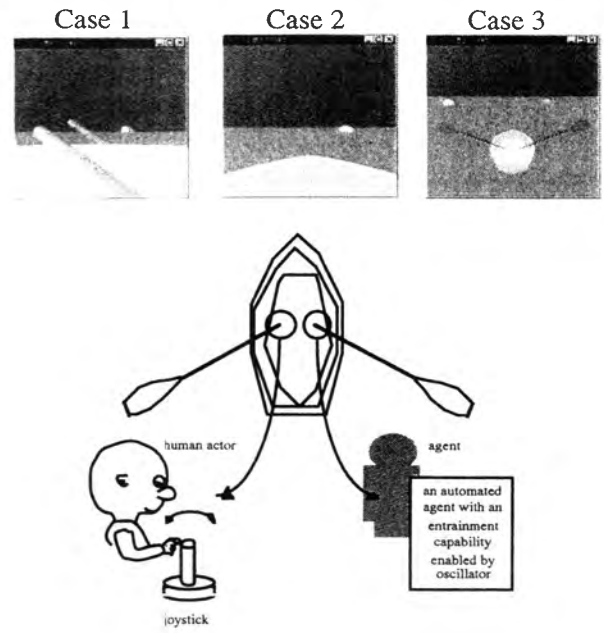


図２　ボート漕ぎシミュレータ

ここでは図に示すように，PC 上に構築したボート漕ぎシミュレータを用いて，２本のオールの運動を各々人間と自動化エージェントが担ってボートを目標地点まで進めるタスクに対し，種々の作業環境設計のパラメータが両者の協調の進み具合に与える影響について考える．

操作者に提示するインタフェースの設定としては以下の３パターンを用意した．

- Case1：　相手のオールの動きを主に観察できるような視点
- Case2：　前方のブイを主に観察できるような視点
- Case3：　ボート，オール，ブイを全て見ることが可能な鳥瞰的な視点

操作者に提示する情報を変化させるということは，参照できる手がかり利用の程度を意図的に変えることであり，共創場においては環境を変化させることに相当する．

さらに，相手となるエージェントの設定としても同様に以下の３パターンを用意した．

- Type Ⅰ：　相手のオールの動きに合わせる
- Type Ⅱ：　ブイが正面にくるように調整
- Type Ⅲ：　Type Ⅰ と Type Ⅱ について均等な重み配分

このエージェントを実現するにあたって，リズム発生器である振動子の機構を導入した．わずかに異なる周期を持つ振動子同士がその周期をそろえる現象は**引き込み現象**と呼ばれ，これが共創における互いの関係を擦りあわせる過程を表現できると考えた．以上の設定に基づき，共創場における環境の設定（Case の設定に相当），相手エージェントの設定（Type の設定に相当）の組み合わせを変化させることによって人間の判断がどのように変化

するのかをレンズモデルによって分析した．

一連の実験を通して，手がかり集合を表示項目として冗長性を変化させた場合に協調作業のパフォーマンスがどのように変化するかについて調べた結果，人間と自動化エージェントの共存する中での習熟において，競合の認識→文脈の生成→文脈の共有→文脈の崩壊→競合の認識→……という固有な熟達のライフサイクル・プロセスが普遍的にみられることを確認した．そしてこのような両者間で生起している競合の認識ならびにそれの解消状況の監視を円滑に行う上で，作業環境場の設計が大きな因子となっていることを確認した．

この詳細を解析するために，本研究ではレンズモデル分析によりそれぞれの状況設定のもとでの操作者判断に関する定量的評価を行った．**エージェントが参照できる環境中の手がかりを変化させることで，これと協調すべき人間の側の役割形成にどのような変容が見られるか**について検討した結果は，**図３**（a）(b) に示す通りである．例えば図のSetting2（Case1－Type II）とSetting4（Case2－Type I）の関係のように，人間とエージェントの参照できる対象を置換した場合，つまり共同作業者の作業環境が異なるとき，当然パフォーマンスに決定的な違いが見られるはずである．実際初心者の試行においてはその事実が反映された結果になっているが，より興味深いのは，熟練者の場合において，役割の分担を変更しても結果としてのパフォーマンスの違いが見られなかったという事実である．これは熟練者がタスク達成に対して，利用可能な手がかりやパートナーとなるエージェントの特性に合わせて適応的に判断方策を変更し，振舞いを変容させたことによるものである．

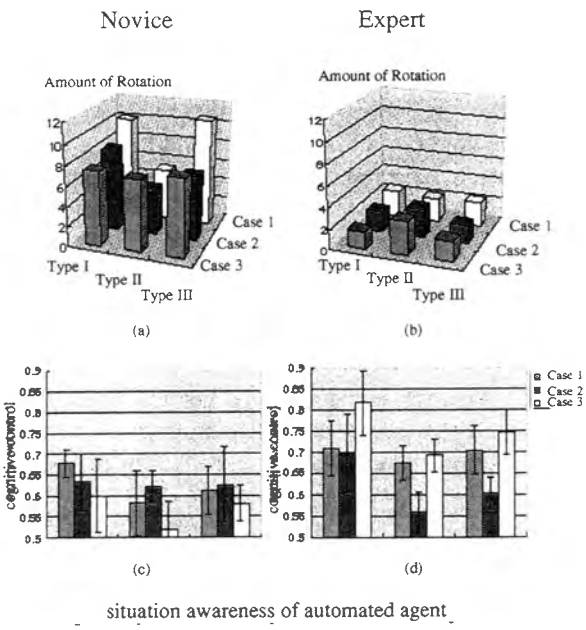


図３　実験結果

人間の判断を上述した手がかり（Cue1～Cue7）によって重回帰分析を行ったときの重相関係数である**認知整合性**（Rs）の値を，各状況設定について平均して比較した結果を**図３**（c)(d) に示す．この値は実際の判断がどこまで線形な近似モデルに沿ったものであったかを表す指標である．この指標が低くなる要因としては以下の２つが挙げられる．

1）　判断方策が与えられた手がかりの線形関係としては記述できない場合

2）　人間の判断が線形モデルによって説明可能であるにもかかわらず，その判断に一貫性がなく同じ状況において異なる判断を下すように判断の再現性がない場合

ここでパフォーマンスが良かった熟練者の場合について，指標の変化を見ると，Case2 の場合，Case1，Case3 に比べて相手がどの Type のエージェントであっても有意に低い値となった．パフォーマンスが良かったことを考慮に入れると，指標が低くなる要因としての後者の場合，つまり一貫性に欠くという状況は考えづらく，インタフェース設定がCase2 の場合は自身と他者の漕ぐ動作が観察不可能なために，協調作業を円滑に進めるにはこれらの観察不可能な変数の状態をボート舳先部の動きから推論することを余儀なくされることになるが，その際非線形な判断方策を強いる状況であることを表している．

さらに，初心者の場合について，Case3 の 指標の変化を見ると，他の２つのCase に比べて有意に低い値となった．熟練者においてはこの値は高いことも考慮に入れると，初心者における Case3 の場合は前者の要因によるものではなく，後者，つまり判断にゆらぎが生じていると言える．これは Case3 では Case1，Case2 に比べ，インタフェースにおける情報提示量の項目数が多いために，注意が分散し，見るべき対象が一貫していないことによるものである．情報提示の項目数の多さがそのまま判断に必要な情報量にはつながらないことを示唆しており，このことは特に初心者への情報提示において顕著な判断の一貫性欠如につながることを表している．これに対して熟練者は Case3 でも高い値になったことから，熟練者にとっては多くの情報項目数にもかかわらず，必要・不必要，関連・非関連な項目を的確に見極め，ノイズ下でも一貫した判断政策を確立できていることが読み取れる．このことはよりよいインタフェース設計としては熟練度に応じた情報提示というものが必要となることを裏付けている．

レンズモデルにおいて，判断を手がかりから線形回帰する際の回帰係数に対して，手がかりとなる独立変数を標準化したときの回帰係数は標準化回帰係数（β）と呼ばれる．各手がかりに対してこの値を比較することにより，どの手がかりが判断に利いているのかを調べることができる．同時に，状況設定（Setting）の違いにおいてこれらに差が見られるということは，手がかり利用の程度が異なることを意味する．**図４**にこの結果を示す．

これら4つの状況設定について全て手がかり利用に差異が生じていることから，相手となるエージェントが異なる場合においても（Typeの相違），人間に対する情報提示が異なる場合においても（Caseの相違），異なった判断根拠を求めていることが分かる．これは人間－機械－環境が密接な三項関係にあることの証明であり，インタフェースとしての環境が，人間－機械協調系を考える際に分かちがたい要因であるとともに，人間と機械の相互作用を対象化して，環境から切り離し，モデル化する手法が動的な環境では適用できないことを示している．

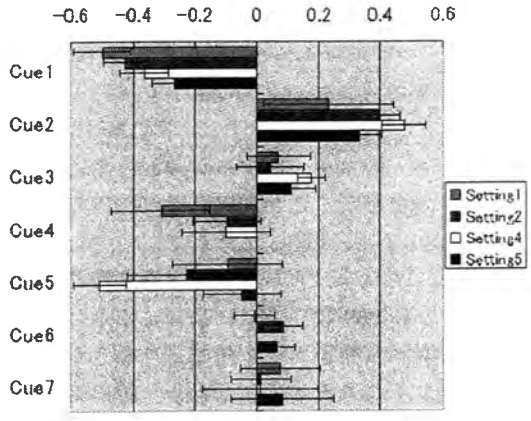


図４　手がかり利用の差異

４．エージェントへのメタ認知機構の実装

エージェントをパートナーとする際の人間の協調パフォーマンスは，最初はほとんど「手探り的」なフェーズを経るのが通常であり，そのようなインタラクションの中から相手の判断方策を推し量り，それに従って，自身の判断政策を調整していくという能動的な解釈努力を伴うものである．実際，人間と自動化エージェントの共存する中での習熟における前述の固有な熟達のライフサイクル・プロセスを繰り返す背後には，**状況認識共有**（Shared Situation Awareness）のダイナミクスが観察される[1]．

準自律的なエージェントとの協調作業を行う際には，エージェントの判断方策は人間操作者にとっては**遠隔な変数**であって，直接利用可能な手がかりと自らの行為を通して，協調の良し悪しを判定するしか術がない．実際，人間の側はこの種の調整を行っている．従ってこのようなコンピテンスを有する人間と協調していくエージェントには，インタラクションの全試行を通じて，

1)　人間の意図した通りの正しい判断方策が適正に実施されているか否か
2)　人間の意図している判断方策がその状況に対して適切なものであるか否か
3)　人間の判断方策がいつ変更されたか

の3つの段階を，エージェント自らがメタ認知として見極めていかねばならない．我々は，このような社会性の評価のための推論のモデルを提案し，さらに協調作業の進行状態と，人間のメタ認知モデルとしてのレンズモデル指標との関係を明らかにし，この関係を社会性のメタ認知の仕組みとして埋め込んだエージェント設計を行っている（**図５**）．紙面の関係上，詳細は文献に譲る[2]．このような機構を実装することで，ユーザの行動変容が習熟に向かって一貫性を増しつつあることを適確に検出し，その塗り替えられた規範のもとでユーザ行動を他視点から評価をしていくことの出来る能力，すなわち社会性をもったエージェント構築が可能になる[3][4]．

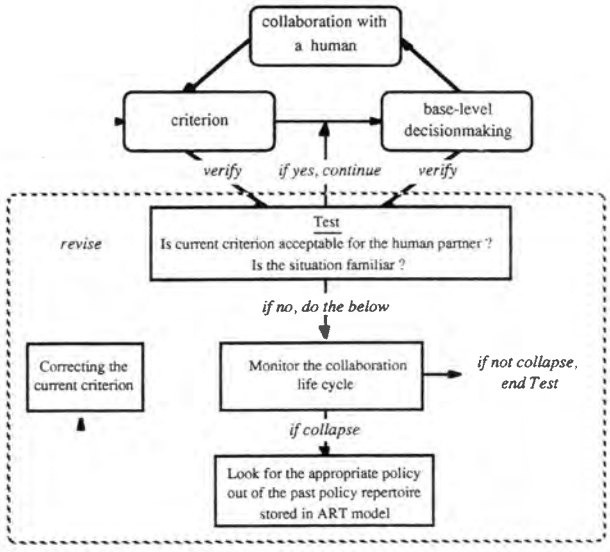


図５　エージェントのメタ認知機構

参考文献

[1] Nosek, J.T.: Social Construction of Knowledge in Teams: Issues for Computer Support, in McNeese, M. et al. eds., New Trends in Cooperative Activities, HFES, Santa Monica, US, 218-229, 2001.

[2] Sawaragi, T., Horiguchi, Y. and Suzui, Y.: Meta-Evaluation of Human-Agent Interactions using Lens Model Analysis, Proc. of SICE Annual Conference 2002, pp. 2066-2071, 2002.

[3] 椹木，北村，稲垣：自動化におけるヒューマン・システム・インタラクションの諸相，ヒューマンインタフェース学会誌，**2**(1)，pp.30-39，2000.

[4] 椹木：人間を内部に含む系の創発：インタラクションの内包する複雑性，システム／制御／情報，**45**(11)，pp.615-622，2001.

連絡先

椹木 哲夫

〒606-8501 京都市左京区吉田本町

電話 075-753-5266　FAX = 075-753-5233

Email: sawaragi@prec.kyoto-u.ac.jp

情報抽出と行為制御の基礎としての協調

Coordination as a basis of information pick-up and control of action

古山宣洋
Nobuhiro Furuyama
国立情報学研究所
National Institute of Informatics

Abstract: Traditionally, perception and action have been thought to be separate from each other and control of action has been explained to be achieved by two separate systems; a command system and an execution system. Despite their plausibility, these explanations have received serious questions over the years from an ecological approach to perception and action. This paper reviews the ideas of "information" and "coordination" as used in ecological psychology and attempts to draw insights into the role played by the brain in perception and action.

1 はじめに

身体と環境との協調、特に環境内に存在する他の有機体との協調の基礎となる知覚情報とはどのようなものだろうか。また、そのような協調を成立させる運動制御機構とはどのようなものだろうか。伝統的に、これら２つの問は相互に独立した問題として取り扱われてきた。しかし、このようなアプローチは果たして正当なのだろうか。二者間で身体的な協調が成立するためには、個々の観察者のパースペクティヴを超えた知覚の公共性、すなわち異なる観察者が同一の環境を同一なものとして知覚することが必須となる。知覚の公共性を保証するものがどのようなものであるかを考えたとき、知覚の基底にあるものと運動制御の基底にあるものが実は同一の過程であることが見えてくる。本稿ではこのような探求の鍵を生態心理学における「情報」の概念とダイナミカル・システムズ・アプローチ（以下 DSA）における「協調」の概念に求めて議論を進めていきたい。

2 生態心理学における情報

生態心理学における情報の概念を理解するために正三角形を特定するということを考えてみよう。ある三角形が正三角形であることを特定するには、「三辺が等しい三角形」とか、「三角が等しい（つまり各々60度である）三角形」等々の定義を適用することによって可能である。勿論これらの定義は、飽くまでも問題となっている図形が三角形であることが既にわかっている場合にその三角形が「正」三角形であるかどうかを決定する基準となる。ところで、今述べた２つの定義は一定の静止した観察点を要請する点で静的な定義と言うことができる。また、時間的な要因を排し、空間的な要因のみに言及している点で排他的に空間的な定義だとも言える。

さて、このような正三角形の定義は、数学的には勿論正しいが、知覚を考える上では極めて深刻な問題をもたらす。言うまでもなく人間の網膜は二次元であり、しかも湾曲しているので、網膜に投影される網膜像もまた湾曲した二次元である。このことから、観察点が少しでも斜めに傾いたり、観察者が動くことによって網膜に対する光の入射角が変化すると「三辺が等しい」と言うことも「三角が等しい」と言うことも、少なくとも網膜に投影される像に関しては成立しなくなってしまう。従って、このような観察点を越えて比較することができないような網膜像を出発点として理論を立てる場合、感覚与件である網膜像にどのような意味があるかに関する推論をすることで問題となっている環境内の対象がどのような形をしているかを推し量る必要が生じる。

先に触れた通り、網膜像を基礎に知覚像を推論する場合、必然的に観察点が固定し、静止している必要がある。しかしながら、動物が環境を知覚する際観察点を静止させていると考えることには相当の無理がある。それは、動物が基本的には環境の中を動き回ったり、環境に存在する他の動物を捕まえたり、植物の葉を採ったり、実を拾ったりして、それらを餌として食べるために、また逆に自身を狙う敵から逃げて身を守ったりするために知覚するからである。動物の知覚は、観察点が静止した状況とは程遠い、基本的には絶えず観察点が変化するような状況で達成されている。従って、静止した網膜像を知覚過程の出発点としての感覚与件とする理論には必然的に無理が生じてしまう。

網膜像に基づいて推論を立てる場合に障害となるのは観察点が動くことだけではない。網膜像に依拠して推論する限り、両眼視であること、及び事前に両眼の２つの観察点を相互に較正し、また両眼の網膜像に映った対象が環境のどの部分に対応しているかを較正することで、推論の際に基準として参照すべき値が外部から教示されていなければならない。つまり、そのような準備作業なしには２つの網膜像からそこに投影されている環境の意味を解釈することはできないのである。勿論、このように外部から教示を与えることは動物や人間の実際の知覚において可能である筈がない。もし可能だとしてもそのこと自体どのように知覚されるのかと言う今、正に問題としているのと同じ問題に突き当たり、解決へ向けて一歩も進んでいること

にはならないからである。外からの教示によって与えられる基準がなければ推論ができないと言うことは、裏を返せば、例え推論が実行されたとしてもそのような教示なしに推論の結果が正しいかどうかを確認する手立てが存在し得ないことを意味している。これが問題なのは、間接的知覚理論に厳密に従うと、実際の観察者の知覚の場合、外部からの教示も、他のモダリティによって得る知覚も、また同じモダリティによる同一の対象の更なる知覚も、全てそれ自体としては結果が正しいかどうかに関して確認されることを要請する推論を介してしか得られないとされているからである。ここでも網膜像に基礎を置く間接的知覚理論の限界が明らかとなる。

幸いなことに、ある三角形が正三角形であるかどうかを特定するのは上記の２つの静的で排他的に空間的な定義に限られる訳ではない。正三角形を特定するには、静的な定義とは対照的な、言わば動的な定義を与えることもできる。正三角形を一回転させると全く同一の図形が3回同定される。正三角形には120度回転対称があるからである。興味深いことに、この一回転させると全く同一の図形が3回同定されると言うのは、観察者の観察点が多少斜めに傾こうとも、三角形が回転する代わりに観察者のほうが三角形の回りを1周しようとも、三辺がはっきりと区別して見える角度から図形を見る限り一貫して成立する。また、問題の図形が回転の開始時点でどちらに向いていようとも同様の規則性が認められる。更に、１：３と言う相対的な周期もしくは相対位相を検知するために両眼視は必要ない。そして、知覚に先立って、両眼の２つの観察点を相互に較正する必要も、推論の際基準として参照する値を外部から教示しておく必要もない。メリットはまだある。眼球の形状にはある一定の範囲内ではあるが個体差が厳然として存在するし、それに伴って網膜及び網膜像にも個体差が生じるだろう。しかし、そのような相違にも拘わらず、この1周につき 3 回同じ形が再認されると言う関係は眼球や網膜の形状に関する個体差を越えて観察者が異なっていても維持される。また、一定の限度内でではあるが、三角形が部分的に遮蔽されていたとしても１：３の相対位相が確認できる限りその三角形が正三角形であることを特定することができるだろう。この意味で、1周につき3回同じ形になると言う時空的に相対的な関係（相対位相）は観察点を越えて不変であると言うことができる。そして、観察点を越えて不変なこの相対位相こそ問題となっている三角形が正三角形であるかどうかを特定する情報となるのである。筆者の知る限りギブソン自身は「相対位相」と言う用語は使っていない。しかし、ここにはギブソンが提唱する情報と言う概念のエッセンスの少なくとも一側面が非常に上手く捉えられている[1][2]。

一回転あたり 3 回の周期で同一の形が現れると言う相対位相が、ある三角形が正三角形であることを特定する情報となっていると言うことは、推論を介さずに対象を直接特定していると言うことである。ここで説明の出発点となっているのは網膜像ではなく、環境の中にある対象そのものであり、その対象が観察点を越えて動きの中で示す法則性である。それを網膜像を含む知覚システムでピックアップすると言うのは飽くまでも付随的なこと、つまりたまたまそうであったと言うに過ぎない。言い換えるならば、この情報をピックアップする知覚器官は、網膜像であっても構わないが、網膜像である必然性はない。実際、いわゆるカメラ眼に特徴的な網膜を持たない視覚システムであっても原理的には対象が動きの中で示す法則性をピックアップすることができるだろう。また、正三角形が示す相対位相のリズム構造は、正三角形型に切り取られた少し厚みのある板などであれば、手による触覚システムなど視覚以外の知覚システムでもある程度なら検知することができるであろう。観察者がしなければならないのは、それ自体意味を持たないとされる感覚与件を基礎に推論することではなく、正三角形が回転運動する中で示す１：３と言う相対位相の規則的で周期的なリズム構造に自身の身体の波長を合わせて共鳴もしくは協調させることである[1]。従って、ギブソンの理論に依拠するならば、一般に受け入れられている知覚と行為の二分法も知覚者と環境の二分法も成り立たない。知覚は、行為の中でしか成立しない点で行為とは不可分だからであり、また、知覚者と環境との共鳴においてしか成立しない点で知覚者と環境もまた不可分だからである。

ギブソンは、刺激には常に隣接性と連続性があるとした[1]。隣接性とは「空間」におけるパターンのことであり、連続性とは「時間」におけるパターンのことである。そしてさらに、これらの性質ゆえに、刺激は、時間・空間の両方の次元で境界や変わり目を作り出し、常に不変と変化の両方の要素を有すると主張した。我々は「持続するパターンそれぞれが独立した一つの刺激だと考えがち」であるが、ギブソンによればそれは間違いである。「パターンが刺激作用を及ぼすのと同様に、パターンの変形も刺激作用を及ぼ」し、「動物は、動きを位置の変化から間接的に演繹するのではなく、即時的に検知する」のである[1]。

このように、観察点の変化を超えて持続する相対位相＝不変項によって特定され、時間の推移の中で示す不変と変化のパターンによって成立する情報には公共性があり、その点でそのような情報は異なる有機体間での身体的協調の生態学的な基礎と言うことができる。知覚情報の公共性に関してギブソンは、1979 年に出版された彼の最晩年の著作である「生態学的視覚論」の「遮蔽縁の発見とその知覚上の意味」と題された一節で次のように述べている[2]。「世界が観察点においてどのように見えるかは観察者によって異なる。それにも拘わらず同一の世界が異なる観察者によって知覚されるのは如何にしてであるかと言う謎は、可逆性を備えた光学的な変形と遮蔽の仮説によって説明することができる。世界が観察点においてどのように見えるかは、知覚の成立に必要な基礎とはならないのである。確かに、光学的配列が観察点によって異なり、また異なる

観察点がどのような時点においても異なる観察者によって占められなければならない、と言うのは正しい。しかし、観察者は動くのであるから、同じ経路が別の観察者によって通過されることはあり得ることであるし、また、仮に観察者が集団で動き回ったとしても、光学的な変形と遮蔽の下で生じる同一の不変項は全ての観察者にとって利用可能である筈である。そのような不変項が検知されるならば、その限りにおいて、同じ世界が全ての観察者によって知覚されることになるだろう。」

共有できることが保証された情報が個別の観察点を越えて利用可能であると言うことはいくら強調しても強調し過ぎることはない。それは、変化する観察点を越えて持続する不変な相対位相が環境の中にある対象や事象を特定すると言うことが、個人内での観察点の変化に対して不変であるだけでなく、個人間での異なる観察点間でも不変であること、及び対象の変化を相対位相の時間推移の中における変化と持続のパターンによって成立する情報によって特定することを保証するからである。以上を踏まえて、知覚情報抽出の中心となる共鳴/協調について、今度は運動制御という観点から考察してみたい。

3 DSAにおける協調

古典的な運動制御理論に従えば、身体を動作させるには身体が有する自由度の値をすべて特定しなければならない。ところが、例えば人間の身体を構成する関節システム、筋システム、神経システムの自由度はそれぞれ10^2、10^3、10^{14}というオーダーであり、このような膨大な量の自由度の個々の値すべてを命令系としての中枢システムが特定することは生理学的な観点から原理的に不可能である[3]。これがいわゆる自由度問題である。この難問を解くために生理学者のベルンシュタインは「協調」という概念を導入した[4]。ベルンシュタインによれば、身体の異なる部位間が協調することで自由度が減少し、より少ない数の自由度を特定するだけで運動制御が可能となる協調システムが成立するのだと言う。

身体の様々な部位が互いに連結し、協調構造を形成すると捉えることによってもたらされる帰結は、単に特定すべき自由度の数を減らし、中枢系の負荷を「量的」に減じさせるということには留まらない。身体は協調構造を備えることで、中枢系が動作を制御するということだけでは捉えることができない、いわゆる生態力学的な法則に従った振る舞いを示すのである。このことは、古典的運動制御理論の主張に反し、運動が命令系によってすべて決定されているのではなく、生態力学的にも制約されていることを示唆している。

例えば、段階的に周波数が高くなるように設定されたメトロノーム音に合わせて、両手の人差し指を、Figure 1のように、両人差し指が対称的な位置を保ちながら動かす同位相モード、または両人差し指が非対称の位置で、交互に動かす逆位相モードで同期させる課題を被験者に与えると、どちらのモードでも周波数の増加に伴って位相差の標準偏差SDϕが増大するが、増大の仕方は同位相モードよりも逆位相モードでのほうが激しく、また、逆位相モードから同位相モードへの相転移現象が観察される一方、逆方向での相転移現象が観察されないことが報告されている[5][6]。このことは、運動制御が意図的な制御のみによって成立しているのではなく、生態力学的な法則にも従って成立していることを示している。興味深いことに、同様の結果が、個人間の肢体間協調に関する実験でも再現されている[7]。

このような現象は肢体間の運動だけに限られるわけではない。呼吸運動と、重りがついた棒を重りが上に、棒が下に来るようにして手首で振る運動とを、二つの振り子が同時に同じ位置にくる同位相モード、または、二つが同時に異なる場所に交互にくる逆位相モードで振り、それらを次第に周期が速くなるように設定されたメトロノーム音と同期させるように被験者に求めると、周期が速くなるのに伴い、位相差の標準偏差が増加すること、特にそれが逆位相モードにおいて顕著であることが報告されている[8]。また、運動の周期を速めていったときに、呼吸運動と手持ち振り子の運動との協調が、逆位相モードから同位相モードに移行する相転移が見られた[8]さらに興味深いことに、これらの現象は個人間の協調実験においても再現されている[9]。

DSAでは、このような現象を説明するのに、当該の運動に直接的・間接的に関与するシステムを構成する下位システム間の結合と競合の結果として創発するリズム、すなわちいわゆるベルンシュタイン問題を解決するためにベルンシュタイン自身が提唱した「協調」[4][3]が生じているという説明がなされている。意図された運動の位相が崩れるのは、2つの振り子の固有周波数間に生じる安定した協調関係が、異なる運動周期で変化するためである、と言うのである。つまり、2つの身体運動間の協調は、このようなダイナミック（力学的）に成立するシステムと、意図的な制御との緊張関係のなかで達成されると言うことになる。これは個人間での協調の場合、より説得力のある説明

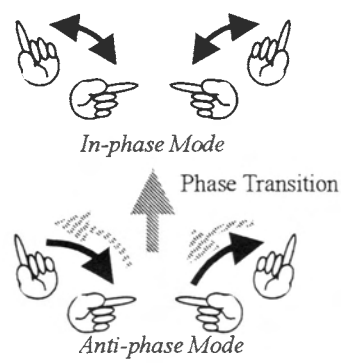


Figure 1. In-phase mode and anti-phase mode of coordination of fingers tested by Kelso et al. [5][6]

となる。何故なら、そこには単純に考えても２つ以上の「中枢」が下位システムとして関与しているからである。このようにDSAには、個人と環境との協調、及び個人間での協調現象に対して一貫した説明を加える可能性が秘められており、今後のさらなる発展が期待されている。

展望～まとめにかえて

本稿では生態心理学における「情報」とDSAにおける「協調」について概説し、知覚と行為がその基底において協調という一つの過程の異なる局面であることを確かめた。本稿では触れなかったが、知覚-行為システムには双対性があることが指摘され、意図ダイナミクスの立場からさらに研究が深化・発展されている[10]。また、運動制御研究に関しては、Kelsoを中心とする研究グループによって、本稿で触れたような知覚行為レベルでの協調に関する研究が続けられる一方、脳そのものがどのように自己組織化しているのかという問題に関する研究が進められている。特に、身体運動で観察されたのと同様の相転移現象が脳内の神経活動レベルでも確認されており、協調が脳の様々な領野が集合的な単位を形成して機能する自己組織的な過程であること、また、生物システムが、環境的または内的な変化に伴う不安定性によってある協調状態から別の協調状態へと転移することが示されており、脳そのものの活動も自己組織的な協調システムとして捉える試みが進められている。さらに、DSAの観点から言語コミュニケーションに切り込む試みも始められている[11][12]。今後は、このような異なるレベルで確認された協調現象が、どのように相互に繋がっているかを明らかにしていくことで、意図の発生及び意図とダイナミクスの関係についての研究をさらに深める必要があると思われる。

参考文献

[1] Gibson, J.J.: *The senses considered as perceptual systems.* Boston: Houghton Mifflin. (1966)（邦訳「知覚システムとしての諸感覚（仮題）」佐々木正人・三嶋博之・古山宣洋・鈴木健太郎・黄倉雅広（訳）東京大学出版会 近刊予定）

[2] Gibson, J.J.: *The ecological approach to visual perception,* Lawrence Erlbaum Associates. (1979)

[3] Turvey, M.T.: Coordination. *American Psychologist,* 45, 938-953. (1990).

[4] Bernstein, N.: *The coordination and regulation of movements.* London: Pergamon. (1967).

[5] Kelso, J.A.S.: On the oscillatory basis of movement. Bulletin of the Psychonomic Society, 18, 63. (1981)

[6] Kelso, J.A.S.: Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative,* 246, R1000-R1004. (1984).

[7] Schmidt, R.C., Carello, C., & Turvey, M.T.: Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 16,* 227-247. (1990)

[8] Takase, H., Mishima, H. & Haruki, Y.: *Coordination between breathing and limb movement,* Poster presented at ICPA-X at Edinburgh University. (1999).

[9] 高瀬弘樹・古山宣洋・三嶋博之・春木豊：「二者間の体肢運動と呼吸運動の協調」心理学研究，74(1), pp.36-44. (2003)

[10] Shaw, R. E., Kadar, E., Sim, M., & Repperger, D. W.: The intentional spring: A strategy for modeling systems that learn to perform intentional acts. Journal of Motor Behavior, 24, 3-28. (1992)

[11] Treffner, P. & Peter, M.: Intentional and attentional dynamics of speech and coordination. Human Movement Science. (in press).

[12] Furuyama, N., Takase, H. & Hayashi, K.: An ecological approach to intra- and inter-personal coordination of speech, gesture and breathing movements. Proceedings of the First International Workshop on Man-Machine Symbiotic Systems, pp.169-199, November 25-26. (2002).

連絡先：

〒101-8430
東京都千代田区一ツ橋2-1-2
国立情報学研究所 情報学基礎研究系
古山宣洋
電話：03-4212-2545
Fax：03-3556-191
Email：furuyama@nii.ac.jp

知覚-行為循環に基づくロボットの視覚システム

Visual System for A Robot Based on Perceiving-Acting System

○久保田　直行

Naoyuki Kubota

福井大学　Fukui University

科学技術振興事業団　Japan Science and Technology Corporation

Abstract: This paper discusses a visual system for a mobile robot from the viewpoints of computational intelligence and ecological psychology. First of all, this paper proposes the perceiving-acting cycle for a mobile robot. Next, this paper proposes a vision-based mobile robot using self-organizing map, neocognitron, and spiking neurons.

1．はじめに

心理学は，生体をブラックボックス化して，刺激に対する行動から内部での処理を研究するマクロ的なアプローチであり，生理学は，神経細胞や神経回路の構造と機能を分析するミクロ的なアプローチであるのに対し，工学は，心理学や生理学の知見に基づき，数学モデルを作成し，統合的アプローチをとる[1]．特にロボティクスの一つの目標は，様々な知的側面を持つエージェントを創り上げることである．さて，近年，身体性に基づくロボティクスの研究が盛んに行われている[4-7]．身体性の定義を「物理的な身体的特性」としてだけ考えると，「環境との直接的な相互作用が重要である」と帰結されうる．筆者は，それほど現象学に明るくないが，例えば，メルロ＝ポンティは，身体性を「すでに形成された能力の全体」と述べている[3]．これは，物理的な器官の集合が獲得した知覚システムや組織化された行為システムの能力を意味するのであろう．認知ロボティクスは，「環境と相互作用しながら経時的に発展するシステムの原理を探求する新しいロボティクス」と定義され，國吉らは，身体性を「複雑な相互作用（情報）に意味を与えるものと定義し，身体性は，相互作用に制約を与えることで情報を産出すると述べている[5]．無論，この情報とは，生態心理学で議論されているアフォーダンスを含む[8-12]．アフォーダンスは，環境の中に存在し，環境がその中で生きる動物に与える行為の機会や可能性として定義され，近年，ロボットへの応用が試みられている[6,7]．

一般にロボットへのセンサ入力情報は，環境そのものがもつダイナミクスと行為のダイナミクスにより生成される．つまり，行為が知覚情報の構造を生成するとともに，知覚情報が行為を制約する循環的な入れ子構造になっている．実際，行為が必要とする知覚情報の構造は，試行錯誤的，あるいは，投機的な行為の結果，発見されうるものであり，動き始めるまでわからない．このように知覚と行為の循環的なプロセスは，知覚-行為循環の概念と深く関係し，互いに制約しあう相互限定性に基づき議論される[9]．本稿では，このように生態心理学の知見に基づく知覚と行為が相互循環的に限定しあうマクロ的な関係と神経生理学に基づく神経回路網モデルを相互にリンクさせた構造化知能のモデルを提案し，自己組織化マップ（以下，SOM），ネオコグニトロン，スパイキングニューロン等を適用し，例として，視覚システムを用いた移動ロボットのナビゲーションに関する議論を行う．

2　ロボットの構造化知能

2．1　構造化知能

近年，クラスタリングや推論，学習，探索等の知能に関わる個々の要素技術は，かなり洗練されてきており，様々な困難な問題に適用されてきた．しかしながら，ロボットの知能を実現するために，これらの要素技術を単に組み合わせるだけでは，人間のような知能は，発現しない．そこに欠けていることは，例えば，［知覚］－［意思決定］－［行為］の相互依存的な機構であり，知的側面が構造的にカップリングされなければならない．従来研究の枠組みとして，古典的な人工知能（以下，AI）に基づくロボティクスでは，基本的に，知覚システム，意思決定システム及び行為システムが，独立して設計されている一方，行動に基づくロボティクスでは，知覚と行為が反射行動的に直接，接続されている（Fig.1）．筆者らは，構造化知能の概念を提案し，センサリネットワークや知覚-行為循環に基づく制御手法や学習方法を提案してきた[13]．一般に，ロボットの行動獲得では，センサやアクチュエータ，コンピュータ等の物理的な能力が制約となって，知覚システムと行為システムの学習が行われるが，学習により得られた行為の動作出力は，新しいセンサ入力情報系列を創出し，この情報から新しい知覚情報を抽出可能であり，さらに新しい行為を学習獲得可能となる．このように知覚システムと行為システムは，循環的な学習を繰り返し，環境適応を通して，いかに構造的に知覚システムと行為システムを獲得していくかが重要となる．

2．2　ロボットの視覚システム

画像には，多くの情報が含まれる．古典的なAIで議論されている表現フレーム問題が示すように，身体を切り離してスナップショット的に取り込まれた一枚の画像に含まれる情報を全て抽出しようとして

も抽出しつくせない[2]．一般に，マルチモーダル，あるいは，次元が高いセンサ入力から，構造的，かつ，低次元な知覚情報を抽出することは，知覚情報から行為情報へと変換する行為システムの設計において，ルール構造を単純化するのに役立つ．

基本的に，知覚は，ある有限の時間を必要とし，制限された時間内で行為に必要となる特定の情報を抽出するために，適切な知覚モジュールを準備しなければならない．これは，図と地の概念と関連し，ある特定の情報を抽出するということは，外界からの刺激として入ってくる全体としての地から適切な知覚モジュールを用いて情報としての図を切り出すプロセスとなる．すなわち，外界からの直接的な刺激に基づくボトムアップ的なプロセスと知覚モジュールを選択するトップダウン的なプロセスから実現される．以上の議論から，本稿で提案する行為システムとカップリングされた視覚システムを考える．

2．3　知覚-行為循環

まず，マクロな観点から知覚システムと行為システムを考える．動的障害物を含む環境や高速での移動を目指した移動ロボットの研究では，知覚と行為の調整を巧みに行わなければならない．例えば，タスクとしてナビゲーションを考えると，ロボットに与えられる行動は，目標探索，目標追従，障害物回避等であり，各行動に対し，基本的に異なる知覚モジュールと行為モジュールを必要とする．

目標探索行動が行われる状況とは，目標物を見つけにくい場合であり，画像中に比較的，小さく存在する対象物を検出する必要があり，特徴抽出のためにCCDカメラから取り込まれる画像の処理単位としてのボクセルの粒度を大きくする必要がある．持続する知覚情報を抽出する探索的な行為として，画像上でより大きな対象物として認識するために，前進するような行為，あるいは，死角に存在するであろう対象物を見つけるための旋回等が用いられる．目標追従行動は，対象物の面積が大きく画像中心方向に来るような行為であり，大きくなるにつれ，ボクセルの粒度を小さくしていけばよい．また，目標物が障害物へと変わりうるタイミングは，ロボットの移動速度と画像中の対象物の位置と面積の関係に依存する．すなわち，ロボットの移動速度が速ければ速いほど，あるいは，対象物が画像中心に近いほど，対象物の面積が比較的，小さい段階から，回避し始める必要がある．ここでのトリガーは，画像中の対象物の面積の変化率と画像中心への近さである．障害物回避行動は，緊急回避行動も含まれるが，画像中の対象物のサイズが比較的，大きいため，ボクセルの粒度を小さくすることができる．障害物回避の段階では，回避行動は，対象物の面積よりもむしろ，対象物と背景との境界，すなわち，エッジ情報が本質的であり，境界に区切られた開けた場所の探索が必要となる．以上のように，行為システムが必要とする情報を抽出するためには，粒度の異なる知覚モジュールの準備が必要で，状況にあわせて，選択される（Fig.3）．このような方法は，本来，マルチリゾルーション解析とよばれる[20]．次に，注視の問題を考える．

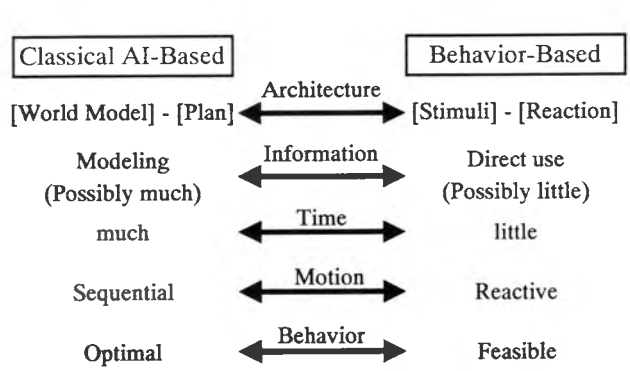


Fig.1 AI-based robotics and behavior-based robotics

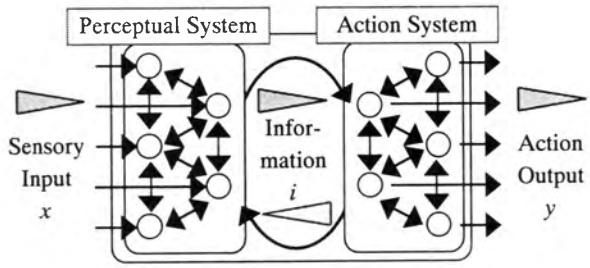


Fig.2 The coupling of perceptual system and action system; A circle indicates a specific module

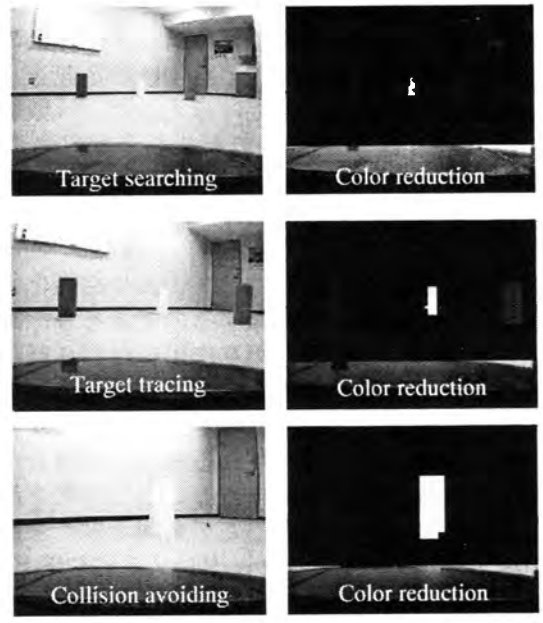


Fig.3 Boxel for image processing corresponding to actions

進化的計算（以下，EC）を用いた視覚システムでは，探索に多くの計算コストを要すると考えられているが，現在の画像を用いた探索結果は，次の画像での探索に有用な情報を提供する．なぜなら，連続する画像には，ロボットの移動にともなうオプティカルフローが存在するからである．つまり，動作出力から，対象物の見えがどのように変化するかがある程度，予測可能であり，画像中の対象物の位置と面積の変化は，多くの場合，ある範囲内におさまりうる．あるサンプリング間隔で取り込まれる離散的

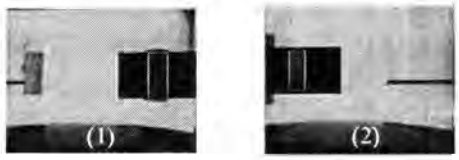


Fig.4 The change of searching area for EC

な画像に対し，ECの探索で用いられる画像範囲や突然変異で用いられる正規乱数をロボットの移動速度が速ければ速いほど，大きくすべきである．これは，移動速度が速いほど，ECで探索すべき問題空間が大きくなりうることを意味し，ECの探索がうまく行われていない場合は，移動ロボットの速度を下げることにより，探索すべき問題空間を縮小可能である．言い換えると，行為に必要な情報を知覚し続けるために，移動速度の調整が行われ，ある特定の知覚を支えるために，行為システムが調整されることを意味し，知覚と行為の進行そのものが，知覚と行為を組織化する駆動力になっている．さらに，ECによる探索結果は，新しい情報を抽出し，抽出された情報が状況をつくり変えていく．実験結果の一例をFig.4に示す．まず，(1)の画像では，右側のランドマークを検出し，追従後，回避し，(2)では，次のターゲットを探索している．

2．4　神経回路網と知覚

ここでは，ミクロな観点から知覚システムと行為システムを考える．まず，地から図を抽出するためには，刺激として入力された画像そのものに差異の構造が存在しなければならない．この差異の構造は，図の境界や特徴を生成しうる．人間の視覚機構とロボットの視覚機構は，ハードウェア的に異なるため，処理の構造も異なりうる．本稿では，差異の構造を顕在化させるために，画像情報から色調を縮小する．したがって，ここでは，トポロジカルマッピングを可能にするSOMを適用し，特徴抽出のための差異の構造を生成する．次に，特徴を抽出するためにネオコグニトロンを適用する．さらに，抽出された情報から行為情報へ変換するために，スパイキングニューロンを適用する．ここでは，抽出された情報に基づき，ニューロンが刺激・抑制の関係を持ち，さらには，現在の知覚と行為の結果から，次に使われうる特徴抽出ニューロンが選択される．すなわち，知覚システムは，行為により制約される．このように，知覚情報から行為情報の生成と行為から知覚への制約という循環的な関係を持つ．

3．ロボットの知覚と行為

3．1　自己組織化マップを用いた色縮約

CCDカメラから取り込んだ画像は，フルカラー情報を持つ．人間は，直接知覚しているため，変換することなく情報は抽出される[8-12]．構造的な情報を抽出するためには，境界や肌理の構造が利用可能であるが，コンピュータにピクセル単位で数値化された配列情報として入力される画像から境界や肌理を抽出するためには，何らかの処理を行う必要がある．ここでは，色情報の差異の構造を分類にするためにSOMを適用する．

SOMの入力情報ベクトルを$\mathbf{x}(t)=(x_1,x_2,\ \ldots,\ x_m)$，各ノードの参照ベクトルを$\mathbf{c}_i(t)=(c_1,c_2,\ \ldots,\ c_m)$とすると，ユークリッド距離は，以下のように定義され，

$$d_i = \left\|\mathbf{x}(t)-\mathbf{c}_i(t)\right\| \tag{1}$$

距離を最小とするノードは，

$$k = \arg\min_i\left\{\left\|\mathbf{x}(t)-\mathbf{c}_i(t)\right\|\right\} \tag{2}$$

により，与えられる．さらに，$h_{ki}(t)$を近傍関数，$\xi(t)$を学習係数とすると，以下の式に従い，参照ベクトルの学習が行われる．

$$\mathbf{c}_i(t+1)=\mathbf{c}_i(t)+\xi(t)h_{ki}(t)\left\|\mathbf{x}(t)-\mathbf{c}_i(t)\right\| \tag{3}$$

入力される画像サイズを$X\times Y$とし，前述の$r\times r$ のボクセルを使うことにより，$X_r\times Y_r$の画像へ縮小可能であり，ボクセルのRGBで表現された色情報は，$r\times r$の平均値を用いて表現される．ここで，ボクセルの色に最も近いノードが選択されるため，SOMのノード数は，縮約される色の数と一致する．

3．2　ネオコグニトロンを用いた特徴抽出

文字や図形を認識するための手法として，視覚野のカラム構造[1]を模倣した手法が提案されているが，本研究では，まず，福島らにより提案されたネオコグニトロン[15]を適用することにする．ネオコグニトロンは，D.H.HubelとT.N.Wieselによる階層型仮説に基づいている．階層型仮説は，異なる特性を持つ単純型細胞と複雑型細胞から構成され，方位選択性をもつ．ネオコグニトロンは，形の類似性に基づき認識を行うため，多少のズレや変形等に強く，多くのパターン認識問題に適用されてきた．一般的に，ネオコグニトロンは，多層構造であり，網膜のモデルであるU_0層，それ以降には，U_{Sl}層とU_{Cl}層が交互に配置され，U_{Sl}層とU_{Cl}層の組を第l細胞団とよばれる．また，各層には，複数の細胞面を含んでおり，特徴抽出可能な単純型細胞（S細胞）から構成されるS細胞面と位置ずれを許容する複雑型細胞（C細胞）から構成されるC細胞面が2次元平面的に配置されている．nを二次元平面とし，第l細胞団のS細胞面のk番目のS細胞からの出力は，

$$U_{sl}(k,n)=r_l\cdot\phi\left(\frac{1+s}{1+\frac{r_l}{1+r_l}\cdot t}-1\right) \tag{4}$$

$$\phi[x]=\max(x,0) \tag{5}$$

$$s=\sum_{\kappa=1}^{K_{Cl-1}}\sum_{v\in S_l}a_l(\kappa,v,k)\cdot u_{Cl-1}(\kappa,n+v) \tag{6}$$

$$t=b_l(k)\cdot u_{Cl-1}(n) \tag{7}$$

となる．また，第l細胞団のC細胞面のk番目のC細胞からの出力は，

$$u_{Cl}(\kappa,n)=\psi\left(\sum_{\kappa=1}^{\kappa_S} j_l(\kappa,k)\sum_{v\in\Omega_l} d_l(v,k)\cdot u_{Sl}(\kappa,n+v)\right) \tag{8}$$

$$\psi[x]=\begin{cases} x/(\alpha_l+x) & if\ x\geq 0 \\ 0 & otherwise \end{cases} \tag{9}$$

となる．本来，最終細胞団の出力は，分類されるカテゴリーそのものになるが，この情報は，次に述べるスパイキングニューロンへの入力となる．

3．3　スパイキングニューロンを行為出力

スパイキングニューロンは，パルスニューロンとも呼ばれ，細胞が持つ発火現象と細胞間のパルスの伝搬機構を導入したダイナミクスを模倣した人工ニューラルネットワークの一つである[18]．基本的には，Hodgkin-Huxley方程式に基づき，モデル化されるが，計算コストの削減のために，本稿では，以下のようなモデルを用いる[19]．ニューロンiの内部電位を$p_i(t)$とすると，内部電位が閾値を上回った場合，パルスが出力される．

$$p_i(t)=\begin{cases} 1 & if\ h_i^{ref}(t)\geq\theta_i \\ 0 & otherwise \end{cases} \tag{10}$$

内部電位を以下のように，入力の総和と発火後の不応期を考慮すると，

$$h_i(t)=h_i^{syn}(t)+h_i^{ref}(t) \tag{11}$$

$$h_i^{syn}(t)=\gamma h_i^{syn}(t-1)+\sum_{j=1}^{N} w_{j,i}\cdot p_j(t-1) \tag{12}$$

$$h_i^{ref}(t)=\begin{cases} \eta\cdot h_i^{ref}(t-1)-R & if\ p_i(t-1)=1 \\ \eta\cdot h_i^{ref}(t-1) & otherwise \end{cases} \tag{13}$$

となる．t-1で発火した場合，Rだけ，抑制が働き，しばらくの間，ニューロンは，発火しなくなる不応期となる．また，センサ間での刺激・抑制の関係が存在するので，センサリネットワーク[13]が構成される．ここでは，行動を単位としたスパイキングニューロンのネットワークを複数用意し，知覚情報に従い，選択され，次のボクセルの粒度が決定される．また，行為出力は，左右のモータ出力とするが，これらの情報が，さらに，注視領域の選択に用いられる．

4．さいごに

本稿では，移動ロボットにおいて，環境と相互作用する知覚システムと行為システムについての議論を行い，図と地の概念や画像の粒度を変化させる情報抽出法を提案した．また，我々の考える知覚システムは，時系列計測情報を用いて，知覚情報を構造化しようとし，環境との相互作用が相互関係を形成し，形成された相互関係が次の相互作用を制約するというカップリング構造を構成する．つまり，知覚と行為は，循環的なプロセスであり，知覚システムとは，直面する状況下で行為に必要な情報を探索・抽出するための知覚モジュールを準備する機構であると考えられる．

今後の課題として，提案手法を移動ロボットに適用し，実験を通して，特徴抽出に関する議論を行うつもりである．

参考文献

[1] 杉江，大西，生体情報処理，昭晃同 (2001).

[2] S.J.Russell and P.Norvig: Artificial Intelligence, Prentice-Hall, Inc. (1995)

[3] 鷲田清一，メルロ＝ポンティ，講談社（1997）．

[4] R.A.Brooks: Cambrian Intelligence, The MIT Press (1999)

[5] 石黒，浅田，國吉他：特集，認知ロボティクス；日本ロボット学会誌，Vol.17, No.1 (1999)

[6] 塩瀬，椹木，片井：環境にナビゲートされた自室移動体の創発的行動形成と教示戦略；計測自動制御学会論文集，Vol.34，No.9，pp.1255-1262 (2000)

[7] 田川聖治，川口俊介，井上克巳，羽根田博正．遺伝的アルゴリズムとアフォーダンスを用いた知能ロボットの創発．日本ロボット学会誌，Vol.17，No.7，pp.1023-1030 (1999).

[8] James Gibson, The Ecological Approach to Visual Perception, Houghton Miffilin Company (1979).

[9] M.T.Turvey and R.E.Shaw: Ecological Foundations of Cognition I. Symmetry and Specificity of Animal-Environment Systems; Journal of Consciousness Studies 6, No.11-12, pp.95-110 (1999)

[10] R.E.Shaw and M.T.Turvey: Ecological Foundations of Cognition II. Degree of Freedom and Conserved Quantities in Animal-Environment Systems; Journal of Consciousness Studies 6, No.11-12, pp.111-123 (1999)

[11] 佐々木，三嶋編訳：アフォーダンスの構想，東京大学出版会 (2001)

[12] 佐々木，三嶋編：アフォーダンスと行為，金子書房，(2001)

[13] T.Fukuda and N.Kubota: An Intelligent Robotic System Based on A Fuzzy Approach; Proceedings of IEEE, Vol.87, No.9, pp.1448-1470 (1999)

[14] J.-S.R.Jang, C.-T.Sun, E.Mizutani: Neuro-Fuzzy and Soft Computing, New Jersey: Prentice-Hall, Inc. (1997)

[15] J.A.Anderson and E.Rosenfeld: Neurocomputing, The MIT Press (1988).

[16] 馬場，小島，小澤著：ニューラルネットの基礎と応用，共立出版 (1994).

[17] 川人光男：脳の計算理論，産業図書 (1996).

[18] 武藤，斎藤監修，応用事例ハンドブック　ニューラルネットワーク，共立出版 (2001).

[19] K.Takita and M.Hagiwara, A Pulse Neural Network Learning Algorithm for POMDP environment, Proc. (CD-ROM) of IEEE IJCNN 2003 (2003).

[20] J.M.Gauch, Multiresolution Image Shape Description, Springer-Verlag (1992).

連絡先：
〒910-8507　福井市文京3-9-1
福井大学工学部知能システム工学科
久保田直行
電話&FAX：0776-27-8033
e-mail：kubota@iicx.ia.his.fukui-u.ac.jp

乗法型多属性効用関数のスケール定数に関する感度分析

Sensitivity analysis for scaling constants of multiplicative multiattribute utility functions

西崎 一郎 Ichiro Nishizaki 広島大学 Hiroshima University
片桐 英樹 Hideki Katagiri 広島大学 Hiroshima University
田中 誠悟 Seigo Tanaka 広島大学 Hiroshima University

Abstract A multiattribute utility function can be represented by a function of single-attribute utility functions if the decision maker's preferences satisfy additive independence or mutually utility independence. Additive independence is a preference condition stronger than mutually utility independence, and the multiattribute utility function is in the additive form if the former is satisfied, otherwise it is in the multiplicative form. In this paper, we present methods for sensitivity analysis of multiattribute utility functions in the multiplicative form and propose methods incorporating fuzziness of decision maker's judgments in the procedures for determining scaling constants (attribute weights).

1 はじめに

多属性効用分析はいくつかの代替案をもつ現実の意思決定問題の評価や解決に利用されてきた．多属性効用分析における主要な手続きの一つとして，単一属性効用関数の同定とともに目的間のトレードオフ分析を通じてのスケール定数（属性重み）の評価が考えられる．このトレードオフ分析では，意思決定者が無差別な点を評価していく過程からなり，その評価結果が意思決定者の選好と首尾一貫するように慎重に行われなければならない．評価が慎重に行われた結果，ある代替案が推奨されたとしても，その後に十分な感度分析を行うことによって，推奨された代替案の妥当性が検証され，より確かな結論を得ることが期待できる．

スケール定数に関する感度分析に関するこれまでの研究は，主として多属性効用関数あるいは多属性価値関数が加法形である場合についての研究であった．多属性効用関数が加法形であるためには，加法的独立性条件が満たされなければならないため [1]，より条件の緩い相互効用独立性を満たす乗法形の多属性効用関数を対象としたスケール定数に対する感度分析手法が望まれていた．本論文では，乗法形の多属性効用関数に対する感度分析手法を与えるが，スケール定数を決定するための手続きにおける意思決定者の判断のあいまい性に基づいた感度分析の手法を提案する．

2 多属性効用関数

n 種の属性 $X_1,\ldots,X_n$ を取り扱い，属性 X_i のある特別な値を x_i と表し，その n 次元ベクトルを $\boldsymbol{x} = (x_1,\ldots,x_n)$ と表す．多属性効用関数では，加法的あるいは相互効用独立性が仮定できて，$U(x_1,\ldots,x_n) = U(u_1(x_1),\ldots,u_n(x_n))$ となる関数 $U, u_1,\ldots,u_n$ が同定できれば分析を容易にできる．すなわち多属性効用関数の評価は U と $u_i, i=1,\ldots,n$ の評価に減じられる．u_i は単一属性効用関数であり，U の形は独立性の条件に依存する．$U, u_i, i=1,\ldots,n$ は 0-1 に正規化されているものとする．

相互効用独立性条件が満たされているならば，多属性効用関数は次のように乗法的に表現される [1]．

$$1 + KU(\boldsymbol{x}) = \prod_{i=1}^{n}[1 + Kk_iu_i(x_i)] \tag{1}$$

ここで $k_i, i=1,\ldots,n$ は $0 \le k_i \le 1, \sum_{i=1}^{n} k_i \neq 1$ となるような n 個の属性に対するスケール定数で，K は

$$1 + K = \prod_{i=1}^{n}[1 + Kk_i] \tag{2}$$

を満たす追加的なスケール定数であり，$K > -1$ である．

より強い条件である加法的独立性条件が満たされているならば，多属性効用関数は次の加法的な表現形をとる．

$$U(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{n} k_iu_i(x_i) \tag{3}$$

加法モデルは乗法モデルで $\sum_{i=1}^{n} k_i = 1$ となる特殊なケースである．

3 スケール定数に関する感度分析

本節ではスケール定数の評価のあいまい性を考慮した感度分析の方法を提案する．乗法型多属性効用関数 (1) あるいは加法型多属性効用関数 (3) を得るためには，単一属性効用関数を同定し，さらにスケール定数 $k_i, i=1,\ldots,n, K$ を決めなければならない．スケール定数を決定するために意思決定者に対して次の質問がなされる．

質問 1 どのような確率 p に対して，確実に得られる結果 $(x_s^*, x_{-s}^0) = (x_1^0, \ldots, x_{s-1}^0, x_s^*, x_{s+1}^0, \ldots, x_n^0)$ とくじ $< x^*, p, x^0 >$ が無差別になるか．ここで，$< x^*, p, x^0 >$ は，確率 p で最良の結果 $x^* = (x_1^*, \ldots, x_n^*)$ が得られ，確率 $1-p$ で最悪の結果 $x^0 = (x_1^0, \ldots, x_n^0)$ が得られるくじを示す．

質問 2 属性 X_s, X_j 以外の属性のレベルを一定（たとえば，$x_i = x_i'$, $i \neq s, j$）としたとき，どのような x_s, x_j に対して，結果 $(x_s, x_j^0; x_i', i \neq s, j)$ と結果 $(x_s^0, x_j; x_i', i \neq s, j)$ が無差別となるか．ここで，たとえば $x_j = x_j^*$ として X_j のレベルを固定してもよく，この場合 x_s の値だけを答えればよい．

質問 1 で p を答えることから

$$U(x_s^*, x_{-s}^0) = pU(x^*) + (1-p)U(x^0) \qquad (4)$$

より，$k_s = p$ が得られる．また，質問 2 で x_s を答えることから

$$U(x_s, x_j^0; x_i', i \neq s, j) = U(x_s^0, x_j^*; x_i', i \neq s, j) \qquad (5)$$

より，$k_j = k_s u_s(x_s) = p u_s(x_s)$ が得られる．属性 X_s とそれ以外の属性 X_j, $j \neq s$ のすべての組合せに対して質問 2 が繰返され，k_j, $j \neq s$ が得られる．

このような質問に対して正確に主観確率 p や無差別な属性値 x_s を答えることは困難であり，感度分析の重要性が認識される．多属性効用関数が同定され，各代替案が評価されたのち，感度分析が行われるが，われわれは意思決定者の評価のあいまい性に着目し，p や x_s の評価値が変動する可能性のある最大値と最小値からなる区間 $[\underline{p}, \overline{p}]$, $[\underline{x}_s, \overline{x}_s]$ を質問し，これらの情報を用いて感度分析を行うことを提案する．

質問 1 および質問 2 において，意思決定者によって評価された主観確率と無差別な属性値を $\hat{p}$, $\hat{x}_s$ とし，対応するスケール定数を k_i^1, $i = 1, \ldots, n$ とする．このとき，もっとも大きい効用をもつ代替案が $x^1 = (x_1^1, \ldots, x_n^1)$ であるとする．また，主観確率と無差別な属性値が変動する可能性のある場合の最大値と最小値からなる区間を意思決定者から引き出すことによって，対応するスケール定数も区間 $[\underline{k}_i^1, \overline{k}_i^1]$, $i = 1, \ldots, n$ として表現できる．区間内の任意のスケール定数 $k_i \in [\underline{k}_i^1, \overline{k}_i^1]$ に対して，代替案 $x^1 = (x_1^1, \ldots, x_n^1)$ がもっとも大きい効用をもつならば，評価されたスケール定数 k_i^1, $i = 1, \ldots, n$ は代替案の選択に関して敏感でないと考えられる．また，区間内のあるスケール定数 $k_i^2 \in [\underline{k}_i^1, \overline{k}_i^1]$ のもとでは，他の代替案 $x^2 = (x_1^2, \ldots, x_n^2)$ の効用値の方が代替案 $x^1 = (x_1^1, \ldots, x_n^1)$ の効用値よりも大きいならば，評価されたスケール定数 k_i^1, $i = 1, \ldots, n$ は代替案の選択に関して敏感であると考えられる．

上記の感度分析手法の乗法形多属性効用関数に対する適用は，遺伝的アルゴリズムに基づく計算方法によって実現できる．スケール定数 k_i が区間 $[\underline{k}_i^1, \overline{k}_i^1]$ に入っているかどうかが重要なので，次のような問題を定式化する．

$$\left.\begin{array}{ll} \text{minimize} & \alpha d + \beta \max\left\{ \dfrac{1}{K}\left\{ \displaystyle\prod_{i=1}^{n}[K k_i u_i(x_i^2)] \right.\right. \\ & \left.\left. +1] - \displaystyle\prod_{i=1}^{n}[K k_i u_i(x_i^1) + 1] \right\}\right\} \\ \text{subject to} & k_i - \overline{o}_i + \overline{u}_i = \overline{k}_i,\ i = 1, \ldots, n \\ & k_i - \underline{o}_i + \underline{u}_i = \underline{k}_i,\ i = 1, \ldots, n \\ & \max\{\overline{u}_i, \underline{o}_i\} \leq d,\ i = 1, \ldots, n \\ & \underline{u}_i, \underline{o}_i, \overline{u}_i, \overline{o}_i \geq 0,\ i = 1, \ldots, n \\ & K + 1 = \displaystyle\prod_{i=1}^{n}[K k_i + 1] \\ & 0 \leq k_i \leq 1,\ i = 1, \ldots, n \end{array}\right\} \qquad (6)$$

問題 (6) の目的関数の α, β は個体群を効率的に進化させていくためのパラメータである．各個体はスケール定数 k_i, $i = 1, \ldots, n$ を表現し，初期個体群や遺伝的操作によって生成される個体は $0 \leq k_i \leq 1, i = 1, \ldots, n$ を満足するように生成する．さらに，K については $K + 1 = \prod_{i=1}^{n}[K k_i + 1]$ から計算する．遺伝的アルゴリズムで問題 (6) を解く場合は，目的関数の d を区間 $[\underline{k}_i^1, \overline{k}_i^1]$ からはみ出した量として直接計算すれば，k_i は個体表現から得られ，K は k_i から計算できるため，問題 (6) の制約式は考慮する必要はない．適合度関数については問題 (6) の目的関数の値が小さいほど優れた個体であるので，目的関数値を f とするとその逆数として適合度関数を $F(f) = 1/(1+f)$ と定める．再生手法として，ルーレット選択とエリート保存選択を採用する．交叉と突然変異に関しては，Michalewicz[2] に従い，単一算術交叉，全体算術交叉，一様突然変異を用いる．

参考文献

[1] R.L. Keeney and H. Raiffa, *Decision with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*, Wiley, New York, 1976.

[2] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Third, revised and extended edition, Springer-Verlag, Berlin, 1996.

[問い合わせ先]
739-8527 東広島市鏡山 1-4-1 広島大学大学院工学研究科
複雑システム工学専攻 西崎 一郎
TEL: 0824(24)7604 FAX: 0824(22)7195
e-mail: nisizaki@hiroshima-u.ac.jp

多人数多目的計画問題に対するファジィ集団意思決定

Fuzzy Group Decision Making for Multiple Decision Maker-Multiple Objective Programming Problems

矢野均 (Hitoshi YANO)
名古屋市立大学人文社会学部 (School of Humanities and Social Sciences, Nagoya City University)

Abstract : In this paper, we propose a fuzzy group decision making method for multiple decision maker-multiple objective programming problems to obtain the agreeable solution of p decision makers.

1 多人数多目的計画問題の定式化

本稿では、p 人の意思決定者 ($\mathrm{DM}_i, i = 1,\cdots,p$) が、それぞれ、与えられた実行可能領域 X 上で、互いに相競合する多目的関数 $f_{ij}(\boldsymbol{x}), j = 1,\cdots,k_i$ を有する多人数多目的計画問題 (MDMOP) について考察する。

[MDMOP]

$$\begin{aligned} \mathrm{DM}_1: &\min_{\boldsymbol{x}\in X} \quad (f_{11}(\boldsymbol{x}),\cdots,f_{1k_1}(\boldsymbol{x})) \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \mathrm{DM}_p: &\min_{\boldsymbol{x}\in X} \quad (f_{p1}(\boldsymbol{x}),\cdots,f_{pk_p}(\boldsymbol{x})) \end{aligned} \tag{1}$$

人間の主観的判断のあいまい性を考慮して、本稿では、すべての意思決定者は各目的関数に対してファジィ目標を持ち、これらのファジィ目標は対応するメンバシップ関数 $\mu_{ij}(f_{ij}(\boldsymbol{x})), i = 1,\cdots,p, j = 1,\cdots,k_i$ を規定することにより表現できるものと仮定する。このとき、MDMOP に対応するファジィ多人数多目的計画問題 (FMDMOP) は、形式的には、次のように定式化できる。

[FMDMOP]

$$\begin{aligned} \mathrm{DM}_1: &\max_{\boldsymbol{x}\in X} \quad (\mu_{11}(f_{11}(\boldsymbol{x})),\cdots,\mu_{1k_1}(f_{1k_1}(\boldsymbol{x}))) \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \mathrm{DM}_p: &\max_{\boldsymbol{x}\in X} \quad (\mu_{p1}(f_{p1}(\boldsymbol{x})),\cdots,\mu_{pk_p}(f_{pk_p}(\boldsymbol{x}))) \end{aligned} \tag{2}$$

通常の多目的計画問題に対するパレート最適解の概念の自然な拡張として、FMDMOP に対する拡張パレート最適解の概念を以下のように定義することができる。

[定義 1]
FMDMOP において、$\mu_{ij}(f_{ij}(\boldsymbol{x})) \geq \mu_{ij}(f_{ij}(\boldsymbol{x}*)), i = 1,\cdots,p, j = 1,\cdots,k_i$ なる $\boldsymbol{x} \in X$ が存在しないとき、$\boldsymbol{x}* \in X$ を、全体 M-パレート最適解という。

本稿では、FMDMOP において、$\mathrm{DM}_i, i = 1,\cdots,p$ は、全体 M-パレート最適解集合 X^P の中から合意解を導出するものと仮定する（全体合理性）。このとき、メンバシップ関数空間における $\mathrm{DM}_i, i = 1,\cdots,p$ の理想解（メンバシップ関数値がすべて 1）にミニマックスの意味で近い全体 M-パレート最適解は、次の拡張重み付けミニマックス問題を解くことにより得られる。

[拡張重み付けミニマックス問題]

$$\min_{\boldsymbol{x}\in X} \quad x_{p+1} + \rho\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{k_i}\{1-\mu_{ij}(f_{ij}(\boldsymbol{x}))\} \tag{3}$$

subject to

$$w_{ij}\{1-\mu_{ij}(f_{ij}(\boldsymbol{x}))\} \leq x_{p+1}, \quad i = 1,\cdots,p, j = 1,\cdots,k_i$$

ここで、$\rho > 0$ は、十分小さな正数、$w_{ij} \geq 0, j = 1,\cdots,k_i$ は、意思決定者 DM_i によって主観的に設定される重み係数である。重み係数 $w_{ij} \geq 0, i = 1,\cdots,p, j = 1,\cdots,k_i$ を用いて、各意思決定者の意思決定に関わる影響力の度合いを表す指標（決定力）を導入する。

$$C_i = \sum_{j=1,\cdots,k_i} w_{ij}, \ i = 1,\cdots,p. \tag{4}$$

もし、すべての意思決定者が、拡張重み付けミニマックス問題を解くことにより得られた全体 M-パレート最適解 $\boldsymbol{x}* \in X^P$ を受け入れることができるならば、$\boldsymbol{x}* \in X^P$ は合意解の一つである。しかし、現在の解に対して少なくとも一人の意思決定者が受け入れることができない場合には、全体 M-パレート最適解集合の中から新たな合意解の候補を探索しなければならない。ここで、拡張重み付けミニマックス問題の重み係数を更新する際の有用な情報の一つとして、メンバシップ関数間のトレードオフ比が考えられる。これらのトレードオフ比の情報は、適当な条件 [1] のもとで、制約式に対応するラグランジュ乗数を用いて陽に求めることができる。

$$\frac{\partial\mu_{i_1j_1}(f_{i_1j_1}(\boldsymbol{x}*))}{\partial\mu_{i_2j_2}(f_{i_2j_2}(\boldsymbol{x}*))} = -\frac{w_{i_2j_2}\{\lambda^*_{i_2j_2}+\rho\}}{w_{i_1j_1}\{\lambda^*_{i_1j_1}+\rho\}}, \tag{5}$$

ここで、$\lambda^*_{i_1j_1}, \lambda^*_{i_2j_2} > 0$ は、拡張重み付けミニマックス問題の制約式の中で、添字 $(i_1,j_1), (i_2,j_2)$ に対応する活性制約式:

$$w_{ij}\{\mu_{ij}(f_{ij}(\boldsymbol{x}^s_i)) - \mu_{ij}(f_{ij}(\boldsymbol{x}*))\} = x^*_{p+1}. \tag{6}$$

のラグランジュ乗数を表す。

2 合意解を導出するための対話型アルゴリズム

FMDMOPにおいて、互いの要求が相競合する意思決定者が数多く存在する場合、合意解を見つけ出すことは極めて困難になるものと思われる。このような場合、たとえば、意思決定者がr人以上合意可能であれば、その解を合意解と見なすことが考えられるが、意思決定者間に不公平が生ずるという問題がある。一般に、意思決定者は、提示された合意解の候補に対して、「完全に受け入れる」場合と「絶対に受け入れることができない」の二者択一の判断をするよりは、むしろ、よりきめ細かな満足度の度合いを回答できるものと考えられる。このような観点から、本稿では、各意思決定者が、求められた合意解の候補に対して満足度の度合いを[0,1]区間の値で表現できるものと仮定する。たとえば、以下の表を基準として、意思決定者は代替案に対して主観的に満足度を評価する。

満足度の言語表現	満足度
完全に満足	1
十分に満足	0.9
満足	0.8
少し満足	0.6
どちらでもない	0.5
少し不満足	0.4
不満足	0.2
十分に不満足	0.1
完全に不満足	0.0

以下において、拡張重み付けミニマックス問題を解くことにより生成された代替案の数をq個とし、これらの代替案集合$S=\{s_1,s_2,\cdots,s_q\}$に対する各意思決定者$\mathrm{DM}_i, i=1,\cdots,p$の絶対評価値を$a_{ij}, i=1,\cdots,p, j=1,\cdots,q$で表す。$a_{ij}, i=1,\cdots,p, j=1,\cdots,q$に対して、対応する相対評価値$r^i_{j_1j_2}$（$DM_i$が、代替案$s_{j_2}$よりも代替案$s_{j_1}$を選好する度合い）を次式で定義しよう。

$$r^i_{j_1j_2}=\frac{a_{ij_1}}{a_{ij_1}+a_{ij_2}}, i=1,\cdots,p \tag{7}$$

相対評価値$r^i_{j_1j_2}, i=1,\cdots,p, j_1,j_2=1,\cdots,q, j_1\neq j_2$を用いて、「すべての意思決定者$\mathrm{DM}_i, i=1,\ldots,p$によって、他の代替案に優越されない代替案集合」として、コア[2]を定義することができる。

$$\begin{aligned} C \;=\; & \{s_{j_2}\in S \mid \mathrm{DM}_i, i=1,\cdots,p \text{に対して} \\ & r^i_{j_1j_2}>0.5 \text{なる代替案} s_{j_1} \text{が存在しない}\} \end{aligned} \tag{8}$$

FMDMOPに対して、意思決定者間の力関係（決定力）と各意思決定者の選好構造を反映させた、しかも、全意思決定者が相対的に満足な合意解を導出するための対話型アルゴリズムは、次のように構成することができる。

[対話型アルゴリズム]

[Step 1] 各意思決定者(DM_i)の力関係を反映して、決定力$C_i, i=1,\cdots,p$を設定する。

[Step 2] 拡張重み付けミニマックス問題における初期重み係数を$w_{ij}=C_i/k_i, i=1,\cdots,p, j=1,\cdots,k_i$と設定する。また、初期代替案数$q=0$、初期代替案集合$S=\phi$とする。

[Step 3] 設定された重み係数に対して、拡張重み付けミニマックス問題を解き、対応する全体M-パレート最適解$\boldsymbol{x}*\in X^P$とメンバシップ関数間のトレードオフ比の情報を得る。また、$q\leftarrow q+1, S\leftarrow S\cup\{\boldsymbol{x}*\}$に更新する。

[Step 4] 得られた解$\boldsymbol{x}*\in X^P$に対して、各意思決定者(DM_i)が、それぞれ、満足度レベル$a_{iq}(0\leq a_{iq}\leq 1)$を主観的に絶対評価する。あらかじめ設定された満足度レベル$r(\geq 0.5)$に対して、$a_{iq}\geq r, i=1,\cdots,p$ならば、$\boldsymbol{x}*\in X^P$を合意解として終了する。そうでなくて、もし、$q\geq 2$ならば、相対評価値$r^i_{j_1j_2}, i=1,\cdots,p, j_1,j_2=1,\cdots,q, j_1\neq j_2$を計算して、$\boldsymbol{x}*\in C$ならば、$\mathrm{DM}_i, i=1,\cdots,p$が代替案$\boldsymbol{x}*$を合意解とするかどうか再検討する。合意解と判断するならば終了。それ以外の場合は、次のステップに進む。

[Step 5] 現在の解$\boldsymbol{x}*\in X^P$に不満足な意思決定者は、現在のメンバシップ関数値とトレードオフ比の情報を考慮して、対応する重み係数を更新し、ステップ3へ戻る。

参考文献

[1] A.V.Fiacco, *Introduction to Sensitivity and Stability Analysis in Nonlinear Programming*, Academic Press, 1983.

[2] J.Kacprzyk, M.Fedrizzi and H.Nurmi, " Group Decision Making and Consensus under Fuzzy Preferences and Fuzzy Majority" *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.49, 1992, pp 21-31.

連絡先：
〒467-8501　名古屋市瑞穂区瑞穂町山の畑1
名古屋市立大学人文社会学部　矢野均
FAX：052-872-1531
Email：yano@hum.nagoya-cu.ac.jp

妥当な遷移領域を得るのに適切な所属度評定カテゴリ数

The Number of Rating Categories Suitable to Obtain Adequate Transition Area of Membership Grade

吉川　歩（神戸親和女子大学　文学部　情報処理教育センター）
Ayumi Yoshikawa (Education Center for Information Processing, Kobe Shinwa Women's University)

Abstract: This paper aims for comparing four procedures for identifying fuzzy sets through a series of psychological experiments. The procedures consist of different number of categories for rating both membership grade and its certainty degree each other. The results obtained are as follows; 1) the subjects pick the most categories related to transition area when they use a rating scale of five categories of membership grade. 2) The ANOVA results show that the procedures affect width of transition area in the identified fuzzy sets significantly, but they do not significantly affect width of 1-level set and gravity center of these sets.

1. まえがき

研究背景：ファジィ集合（以下FS）は程度や概念に含まれる曖昧さを表す道具である．言葉や概念の曖昧さを研究対象とする場合，FSを適切に同定することが不可欠である．ここでの適切さとは，ある人が同定対象から想起する曖昧さをFSの形状が適切に表現していることを指す．適切な表現で重要となるのが1レベル集合から台集合の間のいわゆる遷移領域を適切に同定することである．

先行研究と問題点：既に吉川は遷移領域の適切な同定が可能な手法として対話型のMF同定法を提案し[1]，その改良の方向性を示している[2, 3]．そして対話型手法の基礎となる同定対象の要素の呈示順序，確信度の評定の効果，評定用の評語の影響を考察している[4, 5]．一連の研究で有益な知見は得られているが，遷移領域を適切に回答させる方法には検討の余地が残されている．一方，関連研究の発表の際に，3段階より多段階の所属度の評定の効果に関する質問が毎回寄せられている．3段階以上の多段階評定により上述の問題が改善される可能性があるため一考の価値がある．

研究目的：一連の研究の最終目的は，MFの遷移領域を適切に同定することが可能なMF同定法の開発である．本稿ではこの最終目的の一部として，所属度評定のカテゴリ数つまり段階数が形状，特に遷移領域幅に及ぼす影響について検討を行う．以下では，中間的な評定が実際に利用された頻度，および遷移領域幅，1レベル集合幅，重心の指標から所属度評定の段階数の影響および効果について考察する．

2. 実験条件および方法

実験条件：所属度と確信度の評定の段階数をそれぞれパラメータとする．条件は次の4通りである．

- **条件1**：所属度2段階｛自然，不自然｝×確信度2段階｛自信あり，自信なし｝
- **条件2**：所属度3段階｛自然，不自然，判断に迷う｝
- **条件3**：所属度2段階｛自然，不自然｝×確信度3段階｛自信あり，自信なし，両者の中間｝
- **条件4**：所属度5段階｛極めて自然，自信ないが自然，判断に迷う，自信ないが不自然，極めて不自然｝

条件3，4が今回の実験で追加された条件である．

同定対象：文献[4, 5]と同様の背の高さに関する言語表現3種（非常に，かなり，ちょっと＋背が高い）を用いた．

評定対象の要素：文献[4, 5]と同様の140cmから220cmまでの5cm間隔の17要素を用いた．

呈示順序：文献[5]と同様の擬似乱数4系列を用いた．ただし同じ系列が同じ言語表現に集中しないよう配置した．

実験順序：全被験者とも条件1から4の順に実施した．各条件内では，非常に，かなり，ちょっとの順に実施した．

実験方法：サーブレットを用いて実験を実施した．被験者はイントラネット，あるいはインターネット経由でブラウザから実験用ウェブページに接続し，ページ内の教示に従い回答を行った．実験時間は個人に委ねているため一定していないが，およそ20分から40分程度であった．

被験者：18歳から24歳までの女子大学生18名であった．いずれもファジィ理論に関する知識は皆無である．うち有効なデータの得られた被験者は13名，そのうち分散分析対象は10名であった．なお解析から除外した5名は実験途中に大きく文脈が変化していたこと，あるいは1要素ごとに評価が入れ替わるなど安定していなかったことによる．また分散分析から除外した3名はいずれかの条件で1レベル集合に該当する評定が得られなかったことによる．

3. データ解析

データ解析：所属度の評定の段階数の影響を評価するために次に示す2種の解析を行った．

中間カテゴリの効用：所属度と確信度の評定で今回増やした中間カテゴリがどの程度利用されたかを明らかにするために，4つの条件および言語表現3種と所属度と確信度の評定カテゴリとの間でクロス集計表を作成する．

MFの形状への影響：同定されたMFの形状を定量的に表現する指標を計算し，それらの値を用いて分散分析を行う．指標は文献[4, 5]を参考に，1レベル集合幅，遷移領域幅，非凸化要素数（単調な変化を妨げる要素数），重心の4種を用いた．なお条件2以外は，中間的な所属度のレベルが2段階以上となる．しかし本稿では元々区分線形FSのMFを同定することが目的である．すなわち1レベル集合と台集合の端点の位置だけが得られればよい．よって，条件1，3ので確信度が「自信なし」，「両者の中間」は所属度の評価によらず「判断に迷う」として扱う．また条件4の中間の3段階のカテゴリは区別せずに「判断に迷う」として扱う．また「判断に迷う」として扱われる評定の間で評価が単調に変化していなくとも，非凸化要素として扱わない．このような前処理の後，「自然」と評定された区間を1レベル集合，

「判断に迷う」を遷移領域として台形型MFを構成した．そしてそれらから算出された4種の指標ごとに分散分析を行った．分散分析は，評定法（4種）を1次因子，ヘッジ（3種）を2次因子，被験者（10名）を繰返しとして単一分割法[6]を用いて行った．

4. 解析結果および考察

4.1 中間評定導入の効果

解析の方針：まず3種の言語表現の間に大きな差異は認められないため，全データを用いて説明を行う．表1は各条件ごとに所属度および確信度の評定に用いられた頻度を示すクロス集計表である．

条件間での比較：条件1，2および3で「判断に迷う」に該当するカテゴリが選択された数（表中網掛）は，それぞれ94，91，107であり，3者の間には大きな差は認められない．この結果は所属度2段階×確信度2段階と所属度3段階の間で大きな差は見られないという先行研究[4, 5]と同様の傾向を示す．他方，条件4は214であり，他の条件に比べて「判断に迷う」に該当するカテゴリが多く回答されている．これらの結果から中間評定のカテゴリを追加して段階数を増やす場合，確信度の段階を増やすよりも，所属度の段階を増やす方が，強制2値選択的な回答を回避するのに有効であることが推察できる．ただし段階数を増加させる際に，適切な評語を振り当てないと回答者の心的な負担の増加を招くことになるため注意が必要である．カテゴリ数の関係については追試を行い検証したい．

4.2 MFへの影響

分散分析結果：表2は分散分析結果を各指標ごとに因子の影響をまとめたものである．表中の数字は有意な影響が認めれらた有意水準を表す．

非凸化要素数への影響：表2より被験者の違い，つまり個人差は非凸化要素数に有意な影響を及ぼす（有意水準5%）．他方，評定方法の違いの影響は有意ではない．このことは段階数の増加により単調な変化を妨げる評定が増加する恐れがあるという懸念を否定している．しかし今回は考慮していない「判断に迷う」に該当するカテゴリ間では非単調な変化となっているものも存在することを付記する．

形状に関する3指標：表2より評定方法，個人差およびそれらの交互作用は遷移領域幅に有意な影響を及ぼす（有意水準1%）．同様に個人差，ヘッジは1レベル集合幅および重心に有意な影響を及ぼす（有意水準1%）．しかし評定方法はこれらの指標に有意な影響を及ぼさない．これら3指標の結果を総合すると，評定法の違い，つまり評定の段階数の違いにより影響を受けるのは，形状を表す指標のうち遷移領域幅であることがわかる．評定法間で比較すると，条件4の所属度の5段階評定のときに幅が広くなっている．この結果は従来の3段階評定で問題となっていた強制2者択一的評定が5段階評定では改善されていることを示している．また所属度5段階評定と条件3の所属度2値×確信度3値評定を比較すると前者の方が改善に有効であることがわかる．今回の実験条件では，所属度の段階数を増加させることが強制2者択一的回答の回避に有効であること，また確信度の段階数よりも所属度の段階数を増やす方がその効果が期待できることが明らかになった．

5. まとめ

本稿では，所属度および確信度の評定の段階数が同定されたFSの形状に与える影響について考察を行った．実験結果より所属度を5段階で評定させることで，強制2者択一的評定による遷移領域幅の減少を緩和可能なことが示唆された．また確信度の多段階化は所属度の多段階化に比べて効果が薄いことも示唆された．

謝辞：本研究は平成13，14年度文部科学省科学研究費補助金若手研究(B)の助成を受けた．記して謝意を表す．

参考文献

[1] Yoshikawa, A.: Improvement of Membership Function Identification Method in Usability and Precision, in ed. Roy et al., Advances in Soft Computing -Engineering Design and Manufacturing, Springer Verlag, London, 248/259, 1998
[2] 吉川：対話型メンバーシップ関数同定法の現状と問題点，第6回 曖昧な気持ちに挑むWS予稿，43/44, 2001
[3] 吉川：対話型メンバーシップ関数同定のユーザインタフェースの改良，第12回 蒲研予稿，18-1/18-4, 2002
[4] 吉川：対話型メンバーシップ関数同定法の改良ための検証実験，感性工学会第9回あいまいと感性研予稿，6/11, 2002
[5] 吉川：所属度の評定手法が得られるMFに及ぼす影響，第7回曖昧な気持ちに挑むWS予稿，81/82, 2002
[6] 二見，西：課題解決のための実験計画法I，日科技連，2001

連絡先

651-1111　神戸市北区鈴蘭台北町7-13-1
神戸親和女子大学　文学部　情報処理教育センター
吉川　歩
E-mail: ayumi@sip-ac.jp, http://www.sip-ac.jp/

表1：実験条件と選択されたカテゴリ数の関係

評定の段階		所属度評定					確信度評定		
所属度	確信度	自然	不自然	判断迷う	自信なし 自然	自信なし 不自然	自信あり	自信なし	両者中間
2値	2値	269	394	—	—	—	569	94	—
3値	—	227	345	91	—	—	—	—	—
2値	3値	262	401	—	—	—	556	97	70
5値	—	182	267	35	88	93	—	—	—

表2：分散分析結果

要因	非凸化	遷移	1レベル	重心
被験者(R)	5%	1%	1%	1%
評定法(A)	NS	1%	NS	NS
RxA	pool	1%	pool	pool
ヘッジ(B)	10%	10%	1%	1%
AxB	NS	10%	pool	pool

凡例：NS=10%で非有意，pool=誤差にプール

ＮＣプログラムチェック技能の解析

An Analysis of the Skill in NC Program Checking

野本 弘平 Kohei Nomoto
島 弘三 Kozo Shima
若松 正晴 Masaharu Wakamatsu
三菱電機（株）
Mitsubishi Electric Corporation
清水 裕 Yutaka Shimizu
三菱電機メカトロニクスソフトウェア（株）
Mitsubishi Electric Mechatronics Software Corporation

Abstract This paper presents an analysis of attention allocation during NC (Numerical Control) program checking. Though NC machine tools are automated machines, the workers' skill is important until the safety, correctness and efficiency of the programmed motions are confirmed. This is an intellectual skill and it appears at the way of paying attention. The authors carried out experiments in which the workers checked program and we observed the attention allocation to the each part of the NC program. The result of the data analysis showed the characters of each worker's manufacturing skill.

1 はじめに

NC (Numerical Control: 数値制御)工作機械は，プログラムに従い，自動的に所定の工作作業を行う．しかし，その自動化が開始できるようにするまでには，プログラムの安全性，すなわち工具がワーク（被加工物）や治具に衝突しないかなどのチェック作業などが必要である．特に，少量生産品の場合には，プログラム作成に要する時間が製品一個当たりに対して重い負担となるので，プログラム作成時の完全性よりも，運転直前や初回運転時におけるプログラムチェックによって，この安全性を確保しようとする傾向がある．筆者らの調査では，小規模な工作所においてはこの傾向が強く，「プログラム作成時には全体の流れが描ければよい．いずれにしても運転時にチェックしなければならないから，プログラム作成時にチェックに時間を掛けることは能率の低下に繋がる」という意見をよく聞いた．

筆者らは自動運転開始までの作業者による一連の確認作業や監視作業を，NC 工作機械を用いるための技能と捕らえ，研究を行ってきた．このような作業者の技能を客観的に理解しようとする努力は，近年行われるようになり，塩瀬らの保全作業の技能伝承[1]，赤松らのミシンの縫製技能の支援[2]，佐久間らの手溶接技能の計測[3]などの研究があり，また，椹木による熟練技能とその解析法などについての解説[4]がある．

筆者らは，NC 工作機械を用いるための技能として，不完全な段階での自動運転を行う工作機械と，それを監視し，介入して修正する人間との協調作業を観察した．この観察は，主として中小企業の生産現場において行った．そして，作業者の注意が，工作の進行に合わせて時間的にどのように変化するか，および，空間的にどのように配分されるかという問題を定量的に解析し，注意配分ものでるとしてまとめた[5][6]．

本発表では，プログラム初見時における注意の配分がプログラム各行の特徴に合わせてどのように成されるかを，定量的に解析した結果について報告する．

2 実験

２つの工場の３名ずつの作業者に被験者となっていただき，初めて見るプログラムのチェックを行っていただいた．対象としたプログラムは 74 行で，縦型マシニングセンタで所定の加工を行うものである．プログラムと一緒に示したものは，図１の完成図と，工具リストである．そして，プログラムチェック時において注意する部分にマーカーで印を付けていただいた．

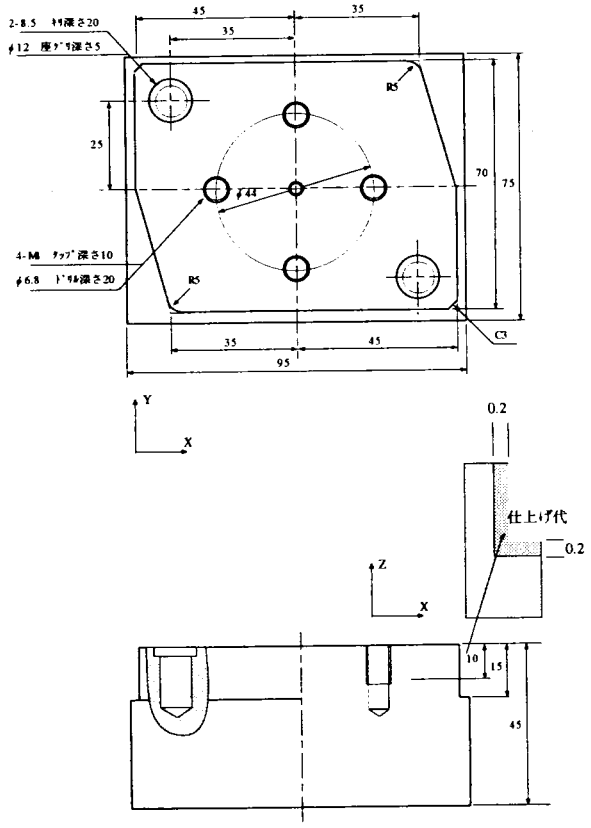


図１ 完成図

3 プログラムへの注意配分の解析

作業者らは，プログラムチェック時に，プログラムのどのような性質の部分に注意を向けるかという

課題を考えた．そのプログラムの解析単位は，各行とした．これは，工作の工具パスの動きは各行にほぼ対応しているからである．

6名の作業者について，注意を払ったプログラム行の割合と，進捗度として1秒間にチェックするプログラム行数の関係を，図1に示す．

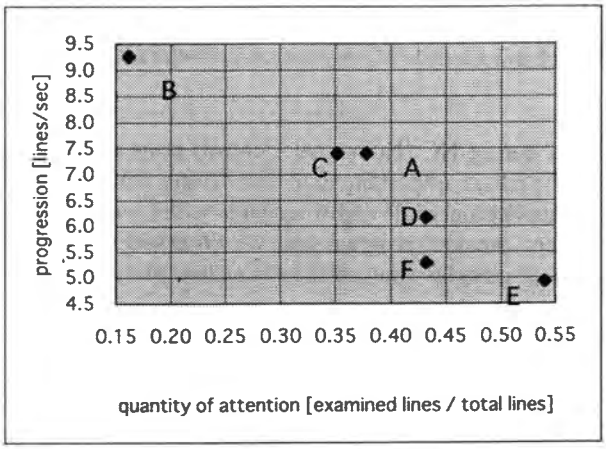


図2　注意を払った行の割合とチェックの進捗度

プログラムの各行を特徴づけるために，次の 17 個の特徴量を設定した．各特徴量の取り得る値は，当てはまるか否かの2値である．

XY 座標の決定，Z 座標の決定，工具下方移動，
工具早送り，工具切削送り，穴空け加工，
工具早送り開始，工具切削送り開始，
穴空け加工開始，クーラント開始，
工具径補正開始，工具種指定，工具交換，
工具交換後の Z 座標値決定，
［工具回転開始，工具長補正開始，工具交換後のワークへの工具接近］，プログラムジャンプ，
変数への値代入

ここで，[] で示した3つの特徴は，対象としたプログラムではいつも同一行で行われていたので，区別せずに1つの特徴のように扱った．

これらの特徴が該当すれば1を，そうでなければ0を対応することにより，プログラム各行は 17 次の特徴量ベクトルで表現される．要素{0,1}から成る 17 次のベクトルは理論上 2^{17} ＝ 131,072 通り存在するが，実際には 21 通りのパタンに分類された．

これら 21 のパタンに対する作業者の注意する／しないの判断は，個人差は若干あるものの，完全にあるいはほとんど一致していた．それぞれの作業者について，ある単一の特徴によって，他のパタンから，その人がいつも注意するパタンを区別し得るかを確認したところ，ほとんどの場合でそれが可能であることが分かった．そこで，作業者ごとに，その注意パタンを識別するために単一で用いている特徴の数を調べ，これを注意配分の判断基準の数と解釈した．その割合と前述の進捗度との関係を，各作業者で比較したものが図3である．この図を見ると，被験者 F を除き，注意基準の割合とチェックの進捗度が線形の負の関係を有していることが分かる．このことから，この単一で判断し得る特徴量が，実際の注意判断の基礎的なものとなっていることが考えられる．なお，この実験で，作業者 F だけは，縦型マシニングセンタの専門家ではなかった．

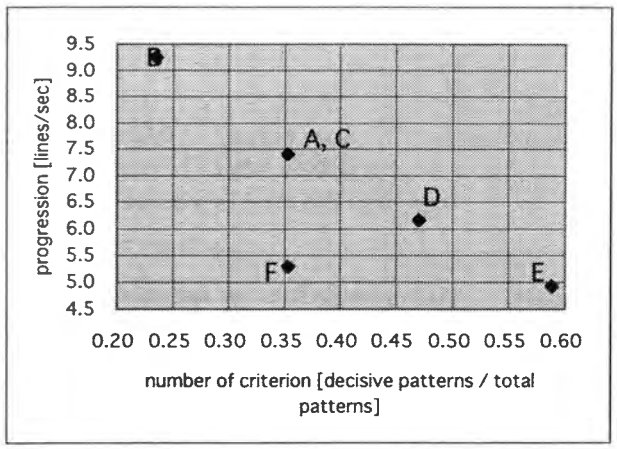


図3　注意基準の割合とチェックの進捗度

また，単一の特徴で判別できないパタンで，2つの特徴で判断できるものは，「工具早送り開始」かつ「下方移動」，「工具早送り開始」かつ「水平移動」であり，これらは少し複雑な判断基準と見なせる．

4　おわりに

NC 工作作業における技能として，プログラムチェック時における注意配分について，実験と解析を行った．今後，注意配分の判断規則について，基礎的なものと，技能者特有の高度なものとをそれぞれ見出していく計画である．

謝辞　本研究は，経済産業省のプロジェクト「人間行動適合型生活環境創出システム技術」として，NEDO からの委託を受け HQL を通じて 1999 年より 5 カ年計画で実施しているものです．

参考文献

[1] 塩瀬，椹木，二階堂，仲島，石原：インタラクティブ技能継承支援エージェントの設計－レンズモデルから見た技能継承の構造分析－，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol.3, No.3, pp201-213 (2001).
[2] 赤松，東，山口：ミシンを用いた縫製作業の技能の計測と支援，第 45 回自動制御連合講演会，pp.151-152 (2002).
[3] 佐久間，露木，久保，坪田，浅井，原田，高橋，北村：手溶接技能の計測技術の開発，第 45 回自動制御連合講演会，pp.153-154 (2002).
[4] 椹木：人間を内部に含む径の創発－インタラクションの内包する複雑正，システム/制御/情報，Vol.45, No.11, pp.615-622 (2001).
[5] 野本，島，若松，清水：製造業作業者の注意制御のモデル，第 18 回ファジィシステムシンポジウム，pp.15-16.
[6] 野本，島，若松，清水：自動化工作機械を用いる作業の行動モデル，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol.5, No.2 (2003).

連絡先
〒247-8501　鎌倉市大船 5-1-1
三菱電機(株)デザイン研究所インタフェースデザイン部
野本弘平
電話：0467-41-2310　　FAX: 0467-41-2319
E-mail: nomoto@idc.melco.co.jp

非統計主観モデルによる中小企業経営・創業支援システムの開発

Development of Management Support Systems based on Non-stochastic Model

戒野 敏浩 Toshihiro Kaino 青山学院大学 Aoyama Gakuin Univ.
廣田 薫 Kaoru Hirota 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology
満田 章道 Akimichi Mitsuta 株式会社シーエスデー CSD Corporation
三浦 保之 Yasuyuki Miura 株式会社シーエスデー CSD Corporation

Abstract: 日本は、経営や金融の分野において米国からの確率統計理論に基づくデータ提示に無防備な状況にある。確率統計理論では既知の統計的分布を仮定するため、現実問題において予測がヒットしないケースもまま存在する。そこで、現実世界における人間の曖昧主観評価をも包含して予測を行う方法論を開発する為に、ファジイ測度理論を新たに展開し、特に中小・ベンチャー企業育成を視野に入れた経営予測支援システム実現に向けた研究を提案する。

1 はじめに

現在、高度コンピューティングにおける米国の優位性は言うに及ばず、ファイナンスの分野においても米国主導であり、多くの面で日本は追従を余儀なくされている。精神的風土として、日本ではモノ作り主体の考え方があり、机上の操作による経済利益創出を潔しとしない傾向が、その様相に拍車をかけてきた。 経済分野では、過去の時系列データから確率統計論的に近未来を予測する面での、米国の理論・手法は、歴史的にも、また実績としても勝っている。日本では、これら米国からの理論に基づくデータ提示に、あまりに無防備な状況にあるとも言える。IT国家を目指す日本としても、米国に伍していき、さらに米国を凌駕できるだけの新しい予測手法を提示していく必要がある。 従来からの確率統計理論では既知の統計的分布を仮定するため、その仮定があてはまらない現実問題において予測がヒットしないケースもまま存在するのも事実である。 そこで、我々は現実世界における人間の曖昧主観評価をも包含して予測を行う方法論を開発する為に、ファジイ測度理論[1]を展開し、特に中小・ベンチャー企業育成を視野に入れた経営予測支援システム実現に向けた研究を提案する。

2 研究の意義

F.BlackとM.Sholesによって統計理論にもとづくオプション価格(B&S)モデルが提案され、様々な派生商品が開発され、国家経済に影響を与えるほどの隆盛を誇っている。最近では、ベンチャー企業の評価(株価値付け)にこのオプション価格式を発展させたリアルオプション理論が用いられはじめている。ところで、B&Sモデルは原資産の価格が対数正規分布に従うことを前提にしているが、この前提が必ずしも成り立たないことが多くの研究者により指摘されている。各種の修正が行われてはいるが、統計分布の存在過程や確率測度の加法性という点で適用限界が存在する。我々の分担研究者グループでは、ベンチャー企業の評価においては原資産が企業や事業であり、統計理論にもとづかずファジィ測度によるChoquet積分を用いたオプション価格モデル[2]が、曖昧で離散的な情報をよりうまく取り扱うことのできる企業評価(株価値付け)モデルになるということを提案している。今回提案される理論(システム)により、特にIT分野における中小・ベンチャー企業が国内外で大きく育つことになれば、日本国家の社会発展にも大いに寄与し、日本そのものが活性化されることになり、国際社会の安定化にも貢献する。

3 研究の概要

本研究では、特に中小・ベンチャー企業向け経営予測支援のための、新しい理論モデルを作ることそのものを第一段階の目的としている。この理論モデルを利用して、企業はその企業価値を知ることができるし、また経営計画を実現したときの将来の企業価値も予測することができる。この分野では、(社)中小企業診断協会の企業格付研究会や「Scoring Browser」パッケージソフトウエア製品なども出始めているが、これらの多くは従来の統計手法に基づく米国流企業格付けの後追いになっている。そういったなかで、従来の統計的手法による企業評価がうまく当てはまらないことが、多くの研究者によって指摘されている。なぜならば、この適用分野では、そもそも対象(原資産)が企業あるいは事業そのものであるため、通常の金融商品のように統計理論では扱う事の出来ない曖昧で離散的な情報により企業評価を行う事が必要となってくるからである。この曖昧で離散的な情報を取り扱うため、研究を行っているChoquet積分の微分[3]とファジイ測度を用いたオプション価格モデル適用の必要性が生じている。具体的構想としては、Choquet積分を用いた長期債券格付け分析モデルを検討し、さらにChoquet積分の微分を用いる事により、どの指標を良くすれば企業の格付けを効率よくあげられるかという支援を行うことができるモデルを作成する。また、Choquet積分を用いたリアルオプション価格モデルによる企業評価を行う。本モデルが、Moody's やスタンダード&プアーズ(以下S&Pと記述)社などがカバーする実データ及びカバーしない実データをともにフィットすることを確認する。その為には、実データの蓄積が重要である。そのため、実デ

ータの蓄積を行い、構築システムの設計・ニューラルネットワークのトレーニング(学習)及び評価に利用すると同時に、蓄積データ自体を公開及び販売することも含めて考える。さらに、現在のあらゆる企業活動において、取引先企業の経営状況を把握することは、取引先の倒産などによる損害を避ける上でも非常に重要である。また、eビジネスを展開していくうえで、「顔の見えない」相手に対する格付けの問題が市場成長の障害になる可能性が指摘されている。今回のモデルが、このような相手に対する企業審査を簡便に実現し、サイバー空間上の企業間取引を活性化していく上でも役に立ちかつIT分野の産業育成にも貢献すると信ずる。

4 まとめ

中小企業あるいは創業する企業において、直接的には経営資金調達、間接的には経営管理強化による取引先の確保・拡大が最重要課題である。しかるに優良な中小あるいはベンチャー企業であっても、金融機関による経営資金の調達が不十分な為、倒産企業が多数あり、その数も益々増加の一途である。中小企業やベンチャー企業では、一般的に企業の認知度も低く、金融機関による評価に時間がかかるとともに評価そのものも難しく、資金調達がスムースに行かないことがその一因となっている。因みに大企業においては、米国主導の企業の格付け手法がある程度確立しているため、金融機関も支援をしやすい状況がある。一方、中小企業やベンチャー企業側においては、経営管理ノウハウや熟練スタッフの不足も問題である。全企業数における中小企業の割合は90%以上に上っており、日本においては、中小企業の支援が緊急の課題である。米国主導の評価システムは統計モデルに基づくものがほとんどであるが、ビジネスレベルで展開されているため、その内容が公開されていない。本研究では、中小・ベンチャー企業の経営支援を主要なターゲットとして、Choquet積分を利用した統計分布を仮定しない新しいモデルを用い、欧米主導でなく日本から世界へ発信する非統計主観モデルを用いた中小・ベンチャー企業支援システムを開発することを考えている。

参考文献

[1]T. Kaino,K. Hirota:"Composite Fuzzy Measure and its Application to Automobile Factory Investment Decision Making","Proc. of IEEE CIRA2001",pp.272-276, 2001(Canada).

[2]Kaino,K.Hirota : "Differentiation of Nonnegative Measurable Function Choquet Integral over Real Fuzzy Measure Space and Its Application to Financial Option Trading Model", "Proc. of IEEE SMC '99", Vol.Ⅲ, pp.73-78, 1999 (Tokyo).

[3]T.Kaino,K.Hirota:"Differentiation of the Choquet Integral and Its Application to Long-term Debt Ratings","Journal of Advanced Computational Intelligence",Vol.4, No.1, pp.66-75, 2000.

連絡先

〒150-8366 東京都渋谷区渋谷 4-4-25
青山学院大学 経営学部 戒野 敏浩
電話:03-3409-8111 FAX:03-3797-6870
E-mail:kaino@mue.biglobe.ne.jp

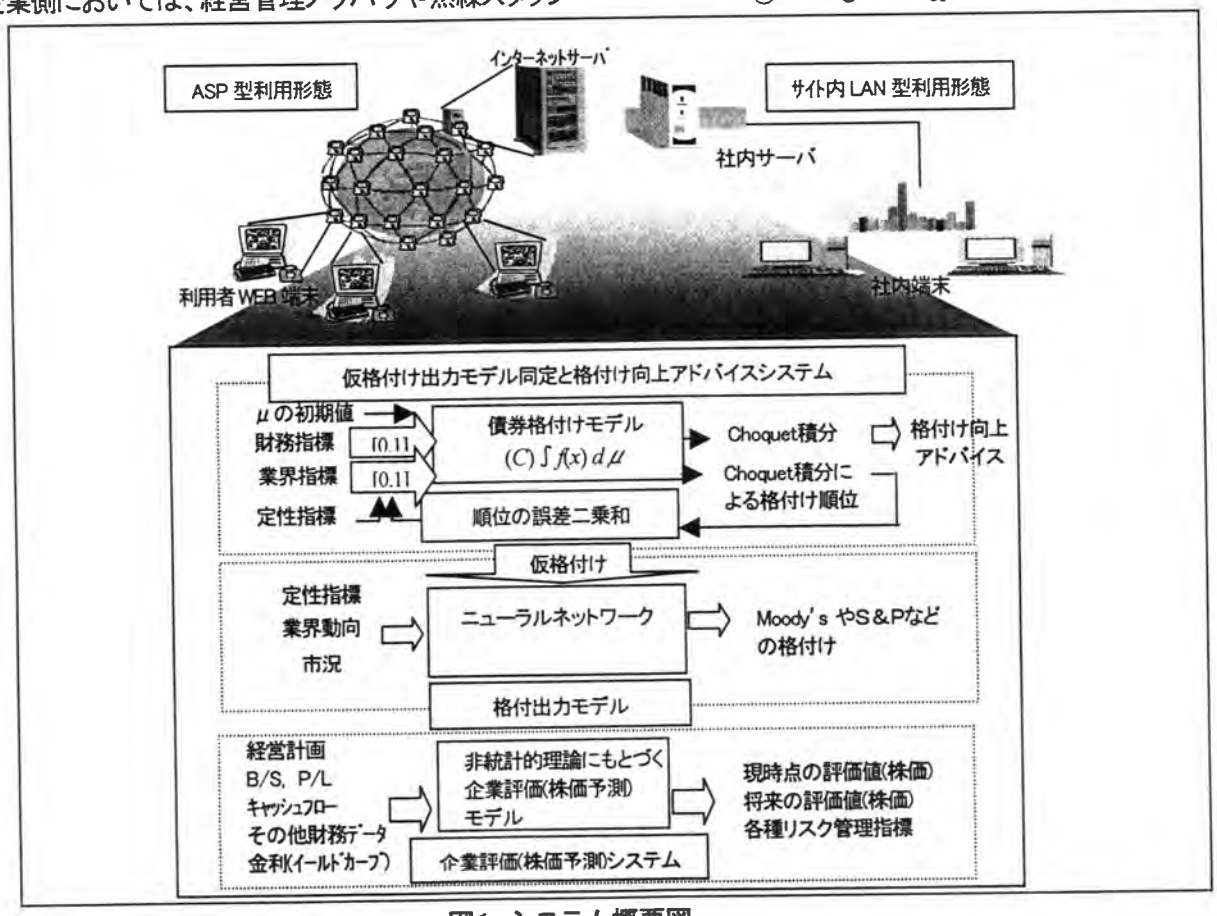


図1 システム概要図

一般講演論文

9月 10 日（水）

ニューラルネットワークを用いた焼却炉コントローラの学習

Using Neural Networks to Train Incinerator Controllers

○黒地 満つる[1]　ケネス J. マッキン[2]　田崎 栄一郎[1]

Mitsuru Kurochi　Kenneth J. Mackin　Eiichiro Tazaki

[1]桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科

Department of Control and Systems Engineering, Toin University of Yokohama

[2]東京情報大学総合情報学部情報システム学科

Department of Information Systems, Tokyo University of Information Sciences

Abstract:

The emission of dioxins from waste incinerators is one of the most important environmental problems today. It is known that optimization of waste incinerator controllers is a very difficult problem due to the complex nature of the dynamic environment within the incinerator. In this paper, we propose applying artificial neural networks to waste incinerator controllers. We show that artificial neural networks can project the emission of dioxins with a fair degree of accuracy.

1. はじめに

ゴミ焼却炉から排出されるダイオキシン問題は、現在最も重要な環境問題の一つである。近年、ゴミ焼却プラントでは様々な方法でダイオキシンの低減化を行っている。藤吉ら[1]はファジィコントロールによる焼却制御によって低減化手法を提案している。

ゴミ焼却プラントに限らず、プラントでの燃焼や化学反応はダイナミックな環境であるため制御が非常に難しく、そのためダイオキシンの完全な抑制までは到達していない。

ゴミ焼却プラントでは、焼却炉に投入されるゴミの材質、大きさや量は常に一定ではなく、そのため実験室のようにコントロールされた燃焼環境は実現できない。ゴミ焼却プラントでのダイオキシン発生の問題の一つは、このような投入されたゴミ量のゆらぎによって、突発的に燃焼状態が悪化し、ダイオキシンが一時的に多量発生してしまうことである。

本研究では、ダイオキシンの発生の予測と、低減化のための燃焼制御を、ニューラルネットワークを用いて検討し、ダイオキシン発生を抑制する焼却炉コントローラの提案に今後進めたい。

2. ごみ焼却炉の学習要件

本研究では、日立造船株式会社より提供頂いた新潟県両津市クリーンセンターのゴミ焼却プラントのデータを元に検討を行った。焼却炉の概要および実験に用いたデータのセンサーを図１に示す。

データは焼却炉の様々な状態を表す以下のセンサーの値を持つ。フラッパー開度(0～100.00%)、炉出口 O_2 濃度(0～25.000%)、二次空気量 S(0～7.500Nm3/h)、焼却目標値(t/H)、層内温度(0～1200.0℃)、CO 濃度(0～500.0ppm)、炉内圧(-2000.0～1000.0ppm)、ろ液噴霧量(0～1.0000m3/h)、コンベア供給速度(0～7.000rpm)、2 次空気量修正出力(0～7.500KNm3/h)、1 次空気量(0～7.500KNm3/h)。フラッパーはコンベア上を通過するゴミの大きさを測る装置で、フラッパー開度によって通過するゴミの大きさを表す。上記のセンサー値を秒単位で採取した連続時系列データを２０日分利用した。

本研究では、ダイオキシン発生と強い相関を持つＣＯ（一酸化炭素）濃度を用いて、ＣＯ濃度の平均値および 100ppm を超えるピークを減少させることを目標とした。

また、傾向として、フラッパー開度（ゴミ量）が上がると、時間差の後 O_2 濃度が下がり、また時間差の後 CO 濃度が上がるという関係が観測データより見られる。これは、フラッパー開度で計測された増加したゴミ量が焼却炉に到達すると燃焼が高まり、その結果一時的に O_2 濃度が下がり、次に O_2 濃度が一時的に下がるため燃焼の状態が悪化し、CO 濃度のピークが発生するためと考えられる。CO 濃度のピークが時間差で現れるのは、センサーが炉出口に設定されているためである。このため、本研究では入力として特にフラッパー開度と O_2 濃度を重視する。

3. ニューラルネットワークによる焼却炉コントローラ

焼却炉センサーのデータの各項目には、先ほどのべた経験則が存在するが、CO 濃度とのあきらかな相関を見つけることが非常に難しい。これは、全ての項目が互いに関係しあっているダイナミックな環境であり、単純な相関関係がないためである。

ニューラルネットワークは、ブラックボックス的に複雑なデータの学習や予測を行えるとこを特徴とする。本研究では、ニューラルネットワークによって焼却炉センサーデータの複雑な関係を学習させ、制御に応用することを検討する。

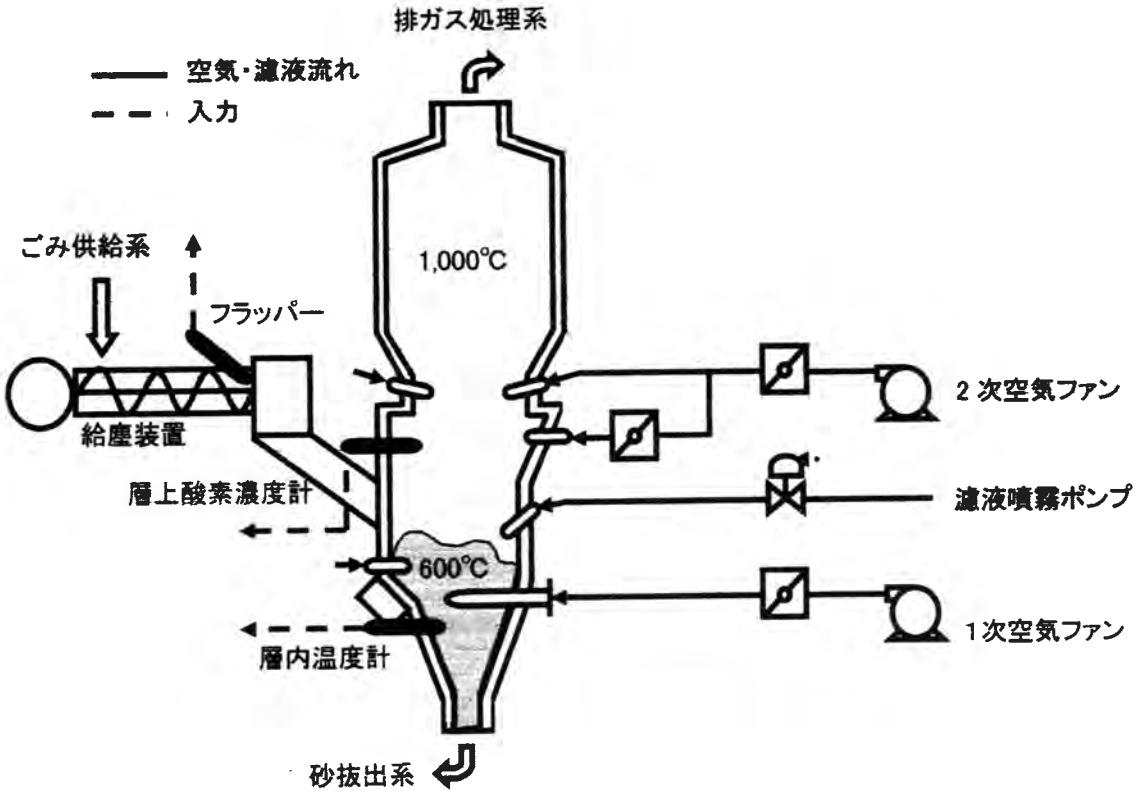


図1　ゴミ焼却炉概要[1]

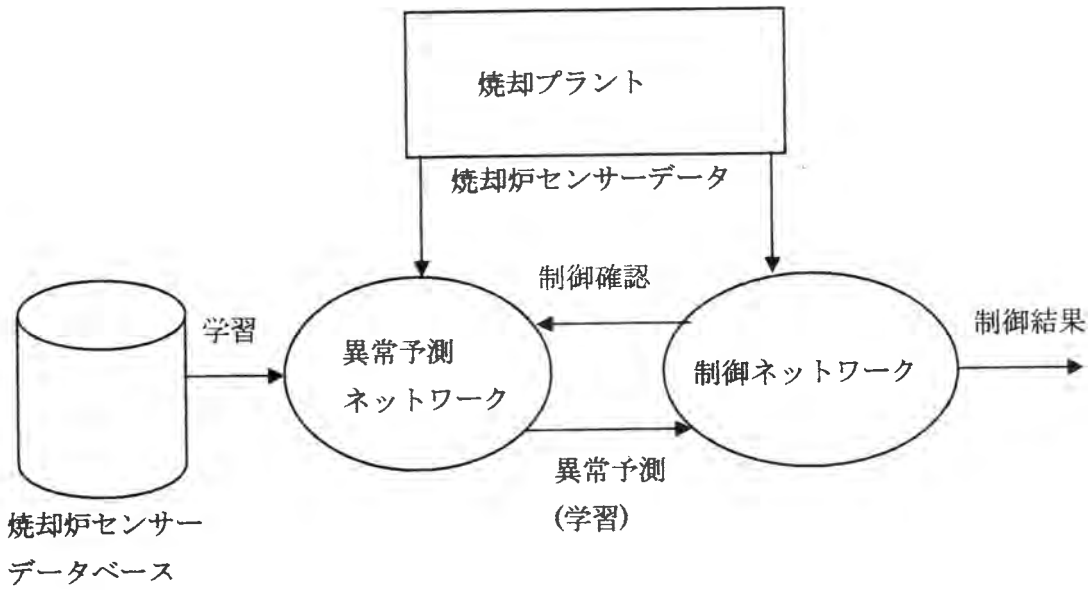


図2 ネットワークを用いた燃焼制御学習システム

ニューラルネットワークの構造については、様々検討を行う予定であるが、初めは BP(誤差逆伝播)学習を利用した標準的3層フィードフォワードネットワークを検討する。再帰ネットワークや教師無しネットワークなどその他のネットワーク構造については、今後の課題とする。

図2にニューラルネットワークを用いた燃焼制御学習システムのイメージを示す。システムを異常予測部と制御部に分割し、それぞれについて独立したニューラルネットワークを利用することを考える。異常予測ネットワークは、焼却炉センサーからの入力を用いて、CO濃度の上昇を事前に予測することを目的とする。制御ネットワークは、焼却炉センサーからの入力を元に、CO 濃度上昇を低減させるための焼却炉制御を出力することを目的とする。

本論文では、まず異常予測ネットワークを構築するためのニューラルネットワークの提案を行う。制御部のネットワークについては、今後の課題とする。

4. 異常検知ネットワーク

異常検出ネットワークでは、先に BP(誤差逆伝播)学習を用いた標準的3層フィードフォワードニューラルネットワークを検討する。

ネットワークの入力には、CO濃度以外のセンサー値、ネットワークの出力は、CO濃度の予測とする。学習には、焼却炉センサーのデータベースを用いて、予測するCO濃度と実際計測されたCO濃度との差をBP学習する。

事前実験として、CO濃度以外の全てのセンサー値をそれぞれ入力とし、CO濃度を直接出力とするネットワークを構築し、CO濃度の学習を行ってみた。学習結果を図3で示す。CO濃度の正常時と異常時（ピーク時）では予測誤差がまったく異なることが分かった。CO濃度の正常時は比較的簡単に学習できるが、異常時の検出が困難であり、CO濃度の異常時の検出率を上げるため学習を継続すると、正常時の予測誤差が悪化した。これは、各データの関連とCO濃度との相関検出が困難であるという当初からの予想と一致している。

そのため、まずは異常検出ネットワークの目標をCO濃度の異常（>100ppm）の検出に絞り、検討を行った。ニューラルネットワークの出力を、CO濃度の直接的な予測とはせず、CO濃度が高い(>100ppm)または低い(≦100ppm)をそれぞれ1と0とし、2値の予測とした。

ネットワークの入力に関しては、多数の入力のため問題が複雑になり学習効果に影響していると考え、まず最低限の学習精度を確保するために入力数を減らす検討を行った。すでに述べたように、CO 濃度はフラッパー開度と O_2 濃度との関連があることはデータの傾向として見られているため、最初は入力はフラッパー開度と O_2 濃度のみとする。また、フラッパー開度、O_2 濃度と CO 濃度はそれぞれ時間差で影響があると考えている。そのため、CO濃度の予測に利用するフラッパー開度と O_2 濃度はそれぞれ時間差を考慮した時間単位前のデータを入力とする必要がある。再帰ネットワークを利用した時系列データの入力も考えられるが、今回は、連続した時系列データのフラッパー開度と O_2 濃度を複数入力として与える方法をとる。具体的には、CO濃度の予測を行う時間単位を含めて、4連続の時系列からのフラッパー開度と O_2 濃度の計8入力とした。

5. 実験

提案する手法の有効性を検証するため、BP によるニューラルネットワークの学習を行い、予測精度の比較を行った。

ニューロンの基底関数には標準的なシグモイド関数を利用した。入力ニューロン数は 9（入力8＋固定値1）、中間層（隠れ層）ニューロン数は9、出力ニューロン数は1とした。

学習には焼却炉センサーデータベースからランダム選択によりCO濃度正常時のデータ件数 100 件、CO濃度異常時（>100ppm）のデータ件数 100 件の計 200 件を利用した。精度検証のための未学習データは、ランダム選択によるCO濃度正常時 100 件、CO濃度異常時 100 件の計 200 件を利用した。

上記提案のニューラルネットワークの未学習データの予測誤差変化を図4に示す。CO濃度正常時の予測誤差、CO濃度異常時の予測誤差、全体の予測誤差をグラフした。

図5は、図4と同じ予測結果のグラフであるが、予測精度を表示した。ここで表示した予測精度は、未学習データ件数においての正解率である。CO濃度予測は、CO濃度正常時に出力<0.5 または CO 濃度異常時に出力>0.5 の場合正解とした。CO濃度正常時の予測精度、CO濃度異常時の予測精度、全体の予測精度をグラフした。

6. 考察

図5において、全体の予測正解率 0.82、正常時の正解率 0.77、異常時の正解率 0.88 という結果が得られた。事前実験において確認された通り、異常時の精度を上げることにより正常時の精度が低下したが、今回の提案ではまず最低限の精度を獲得することが目的であるため、目標は達成できたと考える。また、焼却炉制御システムの中の異常時検出ネットワークへ応用することを前提にすると、CO濃度正常時の精度よりCO濃度異常時の検出を優先することは問題ないと考える。

今後の課題については、予測正解率を向上させるためのセンサー入力の選択および追加、再帰型ネットワークを含めたネットワーク構造の検討、およびニューロンの基底関数の変更を含めたチューニングが挙げられる。

参考文献

[1]藤吉誠, 福島竜太郎, 桝谷道治：ごみ焼却炉制御のインテリジェント化, 日本ファジィ学会, 第 18 回ファジィシステムシンポジュウム講演論文集, pp.25-28(2002)

連絡先

〒265-8501 千葉市若葉区谷当町 1200-2
東京情報大学総合情報学部情報システム学科
ケネス J. マッキン
TEL/FAX: 043-236-1329
e-mail: mackin@rsch.tuis.ac.jp

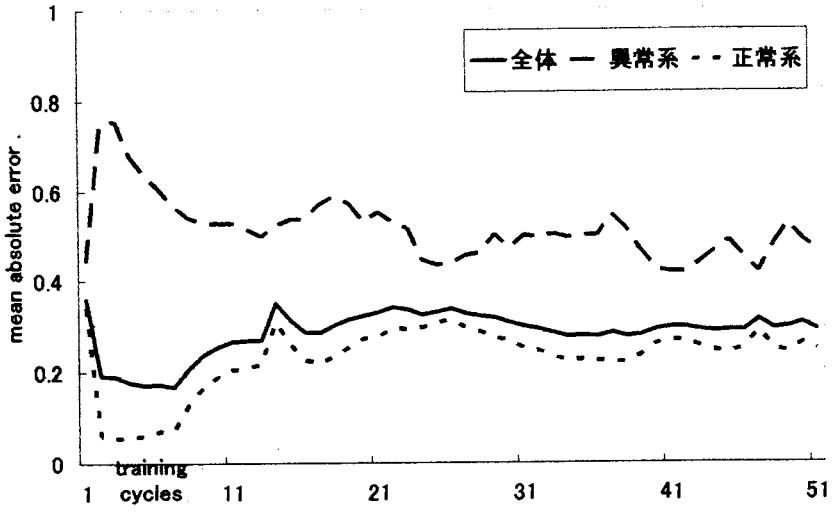


図 3. 事前実験の未学習データの予測誤差

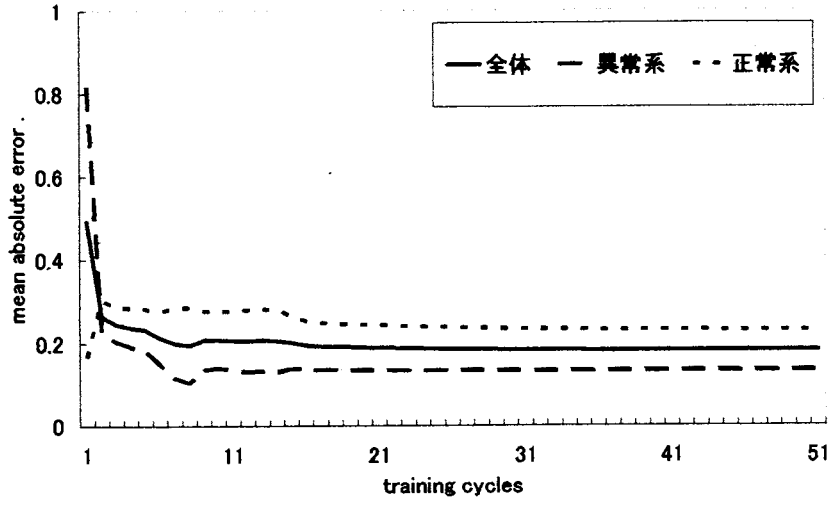


図 4. 提案手法の未学習データ予測誤差

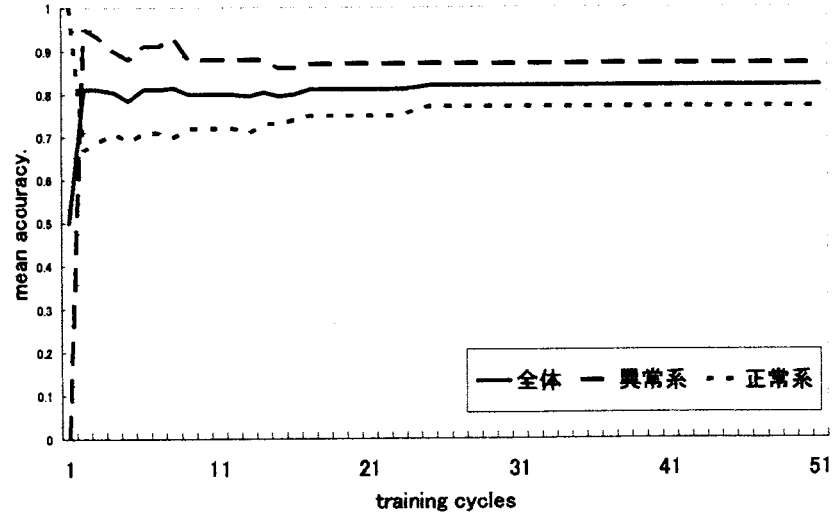


図 5. 提案手法の未学習データ予測精度

赤外画像を用いたRBFネットワークによる船種の判別

Detection of vessel under cruises by Radial Basis Function Networks using infrared camera

石井　弘允　　小野　隆　　門馬　英一郎
Hiromitsu Ishii　　Takashi Ono　　Eiichirou Momma
日本大学理工学部
College of Science and Technology, Nihon University

土澤　康弘　　○名古屋　崇史
Yasuhiro Tuchizawa　　Takashi Nagoya
日本大学大学院理工学研究科
College of Science and Technology, Nihon University

Abstract: The main causes of many collisions of vessel are a navigator's inadequate watch, an unsuitable evasion measure, a correspondence delay and etc. Consequently, an automatic extracting of vessel informations for suitable evasion is needed. We have studied about an automatic vessel collision avoidance system using the genetic algorithm. In this paper, a method for distinction of kinds of vessel from infrared camera images using the radial basis function networks was examined.

1　はじめに

近年，船舶交通量の増加に伴い船舶間での衝突事故の危険性が増大しており，衝突事故の原因のうち約半数が見張り不十分が原因となっている[1][2]．そのため船舶間の衝突回避の自動化が安全運航上の重要な課題となる．

自動的かつリアルタイムで衝突回避情報を提供するシステムの構築[3][4]においては，船種情報による運動性能や，相手船の見かけの形状変化による変針情報を取得することが重要である．しかし，従来用いられているレーダー情報のみを使用した衝突予防装置 ARPA(Automatic Rader Plotting Aids)では，それらの情報を十分に得られない．また近年，自船情報を無線により管制局及び他船へ自動的に送信する船舶自動識別装置 AIS(Automatic Identification System)が一部の船舶で導入されているが，AIS を搭載していない小型船舶の情報などは取得することができない．そこで，筆者らは航行する船舶を管制塔から監視することを想定し，湾内を航行するコンテナ船，タンカー，自動車運搬船，ばら積み船，漁船をサーマルカメラにより海岸から撮像し，その赤外画像に対して，船舶の3次元グラフィックスモデル(以下，船舶モデルと略記)の船舶像から算出した特徴パラメータで学習した RBF(Radial Basis Function)ネットワークを適用し，船種の判別を試みた．

2　船種判別処理の概要

図1は判別処理のフローチャートである．撮像した船舶の赤外画像から遺伝的アルゴリズム(以下，GA と略記)を用いた二値化処理により船舶像を抽出し，次に抽出した船舶像に上部構造物の強調処理を施した後，船舶像の特徴パラメータを算出する．この特徴パラメータを入力要素とした RBF ネットワークを用いて船種の判別を行う．判別に使用する赤外画像は管制塔からの監視を想定し，横浜港シンボルタワー(本牧船舶通航信号所)前より，距離 3000[m]以内を航行する船舶を撮像したものを用いた．

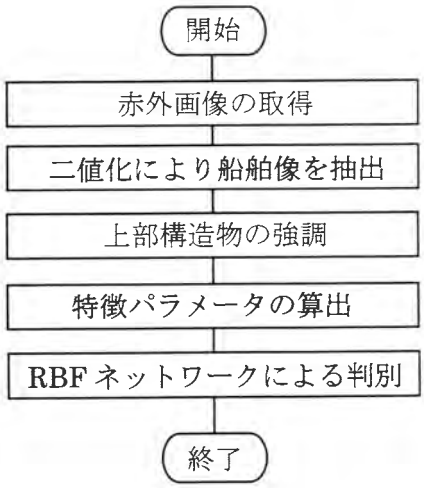
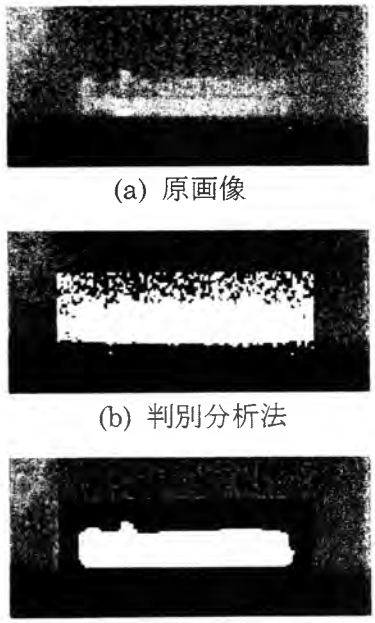


図 1　船種判別処理のフローチャー

3　船舶像の抽出と強調処理

図 2(a)は，サーマルカメラ(三菱製サーマルイメージャ IR-SC1)により撮像した船舶の一例である．船舶の赤外画像は，海面からの熱放射などのノイズにより低コントラストで輝度むらの多い画像となることが多く，二値化によって領域抽出を行う際に一般的に用いられる判別分析法では図 2(b)に示すように船舶像を鮮明に抽出することは難しい．そこで，画像を X 軸方向，Y 軸方向ともに 4 分割し，分割領域ごとに判別分析法を用いて二値化を行う局所二値化法を適用した．このとき，画像を分割する境界線の位置は GA を用いて探索的に決定した[5]．同図(c)はその結果で，船舶像を良好に抽出できている．

次に得られた船舶画像より特徴パラメータの算出を行うが，抽出した船舶像には形状が類似した船舶が含まれているため，そのままの船舶像から求めた特徴パラメータを学習・判別に用いると判別が難しくなる．そこで，各船舶の特徴が上部構造物に表れることに着目し，図 3 に示すような船舶像の上部構造物の強調処理を施した．このとき，強調処理を行うための基準線を喫水位置とした場合には，貨物船のように積荷の積載量により喫水位置が変化すると，同船種において大きな誤差を生じてしまうため，上甲板線を基準線とした．上甲板線は船舶像を水平方向に投影した射影の最大値を示す位置となるが，一部の船種では上甲



(a) 原画像

(b) 判別分析法

(c) GA を用いた局所二値化法

図 2　船舶像の抽出

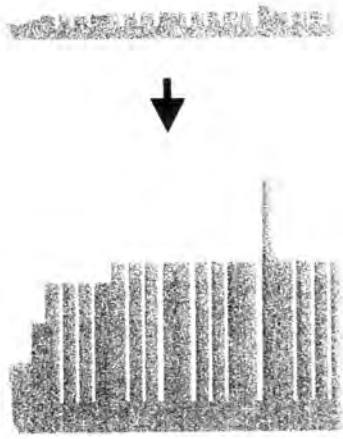


図 3　上部構造物の強調

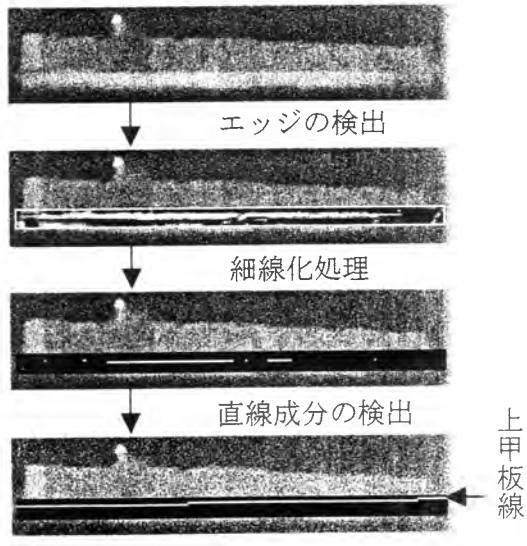


図 4　Hough 変換による上甲板線の検出

板線がこの位置よりも下部に存在する．そこで，全ての船種に対して，水平方向に投影した射影の最大値を示す位置から喫水位置までの範囲においてPrewittオペレータによりエッジ検出を行い，細線化処理を施した後，Hough変換で直線成分を求めた．この処理により，上甲板線が何れの位置に存在しても正しい位置を検出できた．図4は上甲板船の検出結果の一例である．

4 RBFネットワークによる船種の判別

船種判別にはパターン認識に優れ，学習速度の早いRBFネットワークを用いた．RBFネットワークにより船種を判別するには，対象となる船舶のアスペクト(自船から見た相手船方位と相手船針路のなす角)毎の船舶像を学習させるのが有効であるが，全ての船舶においてあらゆるアスペクトの船舶像を学習させることは難しい．そこで，衝突事故の約 70%を占める船種の中で標準的な船型を持つ船舶(コンテナ船，タンカー，ばら積み船，漁船，自動車運搬船)についてコンピュータグラフィックスにより船舶モデルを作成し，画像の特徴を数値化した船舶全体と上部構造物の面積比R，円形度C，図形重心の高さHおよび水平方向の図形重心Dなど11種類の特徴パラメータをアスペクト10°毎に算出した．次に，これらの特徴パラメータの中でアスペクトの影響を受けずに船種を良好に分類できるものを選択するために，アスペクト 10°毎に主成分分析を行った[6]．図5は面積比R，円形度Cと図形重心の高さHとの3つの特徴パラメータを用いた場合の主成分得点の散布図である．この結果よりコンテナ船，ばら積み船，自動車運搬船は良好に分離できているが，タンカーと漁船の得点分布の一部が重複している．そこで第一段階での判別では両者を同一のカテゴリーとして扱うこととした．次に，この同一カテゴリー内の分類を行うため，図形重心の高さHと水平方向の図形重心Dとの2つの特徴パラメータを用いて主成分分析を行った．図6は導出した主成分得点の散布図で，タンカーと漁船が分類されていることがわかる．これらの結果より，船舶全体と上部構造物の面積比R，円形度C，図形重心の高さHと水平方向の図形重心Dとの4つを船種判別のための特徴パラメータとして選択した．

図7は以上の結果を基に作成した船種判別の

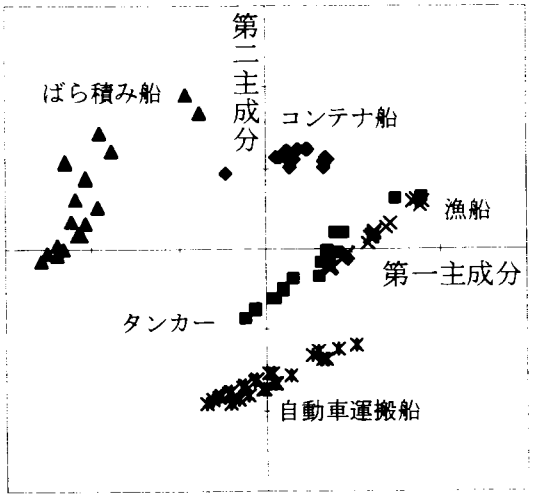


図5　主成分得点の散布図(5種類の船舶の場合)

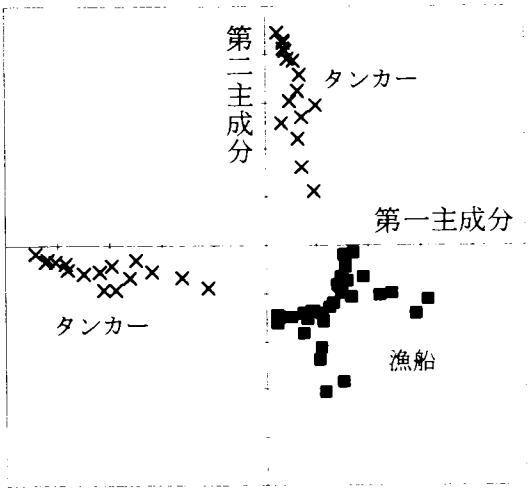


図6　主成分得点の散布図(タンカーと漁船の場合)

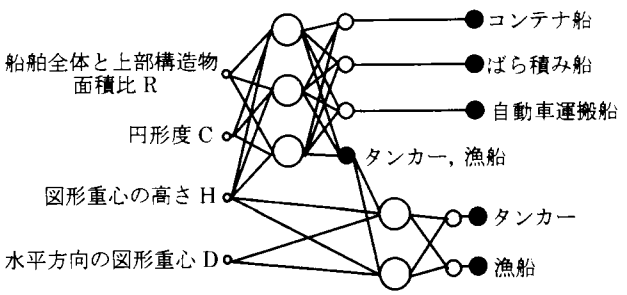


図7　船種判別のためのRBFネットワーク

ためのRBFネットワークの概要で，RBFネットワークにはZISC(Silicon Recognition 社製)を用いた．前述の主成分分析の結果より，第一分類では船舶全体と上部構造物の面積比R，円形度Cと図形重心の高さHとの3つの特徴パラメータを入力要素とし，コンテナ船，自動車運搬船，ばら積み船の他，タンカーと漁船を同一カテゴリーとした計4つのカテゴリーの判別を行い，第二分類では第一分類での「タンカー，漁船」の出力と，図形重心の高さH及び水平方向の図形重心Dとの3つのパラメータを入力要素とし，タンカーと漁船の判別を行う二段構成とした．アスペクト10°毎の船舶モデルの船舶像より算出した特徴パラメータを用いてRBFネットワークを学習させた結果，中間層ユニット数は第一分類においては10個，第二分類では13個が適当であるとの結果を得た．

5 判別結果

船種判別は距離，アスペクトなど条件の異なる船舶39隻の赤外画像を用いて行った．表1はその結果で，ほぼ全ての船種において良好な結果を得ることができた．また，誤判別を生じた船舶について検討した結果，コンテナ船はばら積み船、また漁船はコンテナ船と誤判別しており、その原因としてはコンテナ船では円形度、漁船では面積比が大きく影響していることが分かった。従って船舶の判別精度は二値化の処理結果に大きく依存しており，さらに検討を要すると考えている．

表1 判別結果

船種	試験画像数 [枚]	判別率 [%]
自動車運搬船	11	100
コンテナ船	4	75
ばら積み船	6	100
タンカー	13	100
漁船	5	80

6 おわりに

以上，RBFネットワークを適用した船種の判別について検討し，衝突事故の大半を占める船種において良好な結果を得ることができた．今後は判別制度を向上させるため，さらに低コントラストかつ輝度むらの多い画像に対する二値化についても検討を行うとともに，RBFネットワークの出力特性を利用し「タンカーである確率70%，漁船である確率30%」というような，曖昧さを含めた情報を管制官，操船者に提示するようなシステムを構築する必要があると考えている．

参考文献

[1]海難審判庁：平成14年度　海難審判の現況
[2]国土交通省：平成14年度　海難統計
[3]石井，小野，門馬，山口：遺伝的アルゴリズムによる船舶の衝突回避システム，平成14年電気学会産業部門大会 R23-237(2002)
[4]石井，小野，中山：遺伝的アルゴリズムを導入した船舶の避航システム，平成12年計測自動制御学会全国大会 104A-2(2000)
[5]斉藤 文彦：低品質文字画像の2値化に適したGAによる動的領域分割，画像電子学会誌，Vol.29，No.1，pp67-76(2000)
[6]佐藤，森本，石井，小野：海上ニアミス回避システムにおける船種の判別について，第35回SICE 学術講演会予稿集，211A-2，pp589-590(1996)

問合せ先
〒101 - 8308
東京都千代田区神田駿河台1−8−14
日本大学理工学部電気工学科
石井　弘允
TEL：03 - 3259 - 0761
FAX：03 - 3293 - 8265
E-Mail：ishii@ele.cst.nihon-u.ac.jp

学習後のニューラルネットからの知識獲得における入力ベクトル数の削減

Input Vector Reduction for the Rule Extraction Method by using of Attribute Selection

新居　学 *　　荻野　康介 *
Manabu NII　　Kosuke OGINO

* 姫路工業大学 大学院 工学研究科
Graduate School of Engineering, Division of Computer Engineering, Himeji Institute of Technology

Abstract: In this paper, we propose an attribute selection method to reduce the number of input vectors for the rule extraction method. The rule extraction method extracts a large number of fuzzy if-then rules to represent input-output relations of trained neural networks. To extract fuzzy if-then rules, we need to input all combinations of antecedent fuzzy sets to trained neural networks. For high-dimentional pattern classification problems, it is very hard to input all combinations to trained neural networks. Our attribute selection method can reduce the number of input vectors.

1　はじめに

知識獲得手法の１つとして，学習後のニューラルネットワークからのルール獲得手法が提案されている [1]．この手法では，学習後のニューラルネットの入出力関係を言語的に説明するためにファジィIf-Thenルール形式で知識を獲得する．ルールを獲得するため，ファジィIf-Thenルールの条件部ファジィ集合の全ての組合せを学習後のニューラルネットに入力し，ルール獲得が可能かどうかを調べる必要がある．しかし，ニューラルネットの学習の対象となる問題の属性数が増加すると，条件部ファジィ集合の組合せ数が指数関数的に増加するため，全ての組合せについてルール獲得可能性を調べることは非常に困難となる．

この指数関数的な入力ベクトルの組合せ数の増加に対して，ファジィIf-Thenルールの条件部の数が少ないファジィ集合についてのみ調べることで入力に用いる組合せを制限する手法が提案されている [2]．

また，計算時間を短縮する方法として，並列計算機を用いた並列ルール獲得手法が提案されている [3]．この手法は従来のルール獲得手法のアルゴリズムを損なうことなく並列化を行っているが，並列計算機を導入するため，コストの増加を招くという問題を持つ．

本論文では，学習後のニューラルネットと学習用データを用いて，対象とする問題の各属性が識別に寄与する度合いを調べることにより，学習後のニューラルネットへ入力するファジィ数入力ベクトルの数を削減する方法を提案する．これにより，多数の属性を持つ問題に対して学習後のニューラルネットの入出力関係を説明するのに十分なルールを短い計算時間で得ることが可能になる．

2　ルール獲得手法

ルール獲得手法 [1] では，n 次元 c クラスパターン識別問題に対して学習済みのニューラルネットが既に与えられていると仮定している．したがって本研究では，ルール獲得を行う前に利用できるのは学習後のニューラルネットと学習用データであると仮定する．

2.1　ファジィIf-Thenルール

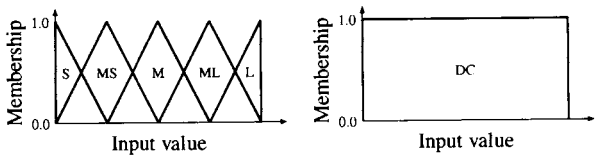
ルール獲得手法では，学習後のニューラルネットから式 (1) に示すようなファジィIf-Thenルールを獲得する．

$$\text{Rule } R_p : \text{If } x_1 \text{ is } A_{p1} \text{ and } \cdots \text{ and } x_n \text{ is } A_{pn} \quad \text{then Class } C_p \text{ with } CF_p \quad (1)$$

ここで，R_p はルールのラベル，A_{pi} は条件部ファジィ集合，C_p は結論部クラス，CF_p は確信度を示している．条件部ファジィ集合として，図1(a)と1(b)に示すメンバーシップ関数を用いる．このとき，ファジィIf-Thenルールの条件部に存在する "*don't care*" 以外の言語値の数がルールの長さと定義されている．文献 [2] では長さの短いルールからルール獲得を行うことで，学習後のニューラルネットへ入力する組合せ数を制限している．

2.2　ニューラルネットワークの構造

n 次元 c クラスパターン識別問題に対して学習済みの入力層ユニット数 n，中間層ユニット数 n_H，出力層ユニット数 c の３層階層型ニューラルネットワークが既に与えられていると仮定する．ファジィ数入力ベクトル $\mathbf{A}_p = (A_{p1}, A_{p2}, \cdots, A_{pn})$ がこ



(a) 5個の言語値　　(b) "*don't care*"

図1　メンバーシップ関数

の3層階層型ニューラルネットワークに入力された場合の各ユニットの入出力関係は以下のように書くことができる．

$$\text{Input units}: O_{pi} = A_{pi},\ i = 1,\cdots,n \tag{2}$$

$$\text{Hidden units}: O_{pj} = f(Net_{pj}),\ j = 1,\cdots,n_H \tag{3}$$

$$Net_{pj} = \sum_{i=0}^{n} O_{pi} \cdot w_{ji} + \theta_j \tag{4}$$

$$\text{Output units}: O_{pk} = f(Net_{pk}),\ k = 1,\cdots,c \tag{5}$$

$$Net_{pk} = \sum_{j=0}^{n_H} O_{pj} \cdot w_{kj} + \theta_k \tag{6}$$

ここで，w_{ji} と w_{kj} は実数の結合強度，θ_j と θ_k は実数のバイアスである．$f(\cdot)$ にはシグモイド関数を用いる．

2.3　ルール獲得

実数入力ベクトル $\mathbf{x}_p$ がニューラルネットへ入力された場合，入力ベクトル $\mathbf{x}_p$ は最大の出力値を持つ出力層ユニットに対応したクラスに識別される．同様に，ファジィ数入力ベクトル $\mathbf{A}_p$ が入力された場合，出力されるファジィ数出力ベクトル $\mathbf{O}_p$ に基づいて，以下のようにクラスが識別される [1].

$$\text{If } O_{pk} < O_{ph} \text{ for } \forall k\ (k \neq h) \text{ then } \mathbf{A}_p \text{ is Class } h \tag{7}$$

ファジィ数の大小関係 $O_{pk} < O_{ph}$ はレベル集合の大小関係を用いて，以下のように定義される．

$$[O_{pk}]_\alpha < [O_{ph}]_\alpha \iff [O_{pk}]_\alpha^U < [O_{ph}]_\alpha^L \tag{8}$$

ここで，$[\cdot]_\alpha^U$ と $[\cdot]_\alpha^L$ はそれぞれ α-レベル集合の上限値と下限値である．つまり，ファジィ数入力ベクトル $\mathbf{A}_p$ が入力された場合，以下のようにクラスの識別を行う．

$$\text{If } [O_{pk}]_\alpha^U < [O_{ph}]_\alpha^L \text{ for } \forall k\ (k \neq h) \text{ then } \mathbf{A}_p \text{ is Class } h \tag{9}$$

ファジィIf-Thenルールの確信度は，以下のように大小関係が成り立つレベルの最小値 α^* に基づいて定義される．

$$CF_p = 1 - \alpha^* \tag{10}$$

$$\alpha^* = \inf\{\alpha \mid [O_{pk}]_\alpha < [O_{ph}]_\alpha \text{ for } \forall k(k \neq h),\ 0 \leq \alpha \leq 1\} \tag{11}$$

本論文では，事前に設定した α-レベル集合で式 (12) を満たすクラス h が存在する場合，ルール獲得可能であると定義する．

$$[O_{pk}]_\alpha^U < [O_{ph}]_\alpha^L \text{ for } \forall k\ (k \neq h) \tag{12}$$

3　入力ベクトル数の削減

ルール獲得手法では，ファジィIf-Thenルールの条件部ファジィ集合の全ての組合せを学習後のニューラルネットへ入力し，ルール獲得可能性を調べる．そのため，多数の属性を持つ問題に対して学習済みのニューラルネットからルールを獲得しようとした場合，入力する組合せ数は指数関数的に増加するため，その全ての組合せを調べることは困難となる．

例えば，ある長さ l のルールを獲得することを考える．このとき，長さ l のルールを獲得するために使用される入力ベクトル数は ${}_nC_l \times 5^l$ となる．これは長さ l のファジィIf-Thenルールにおける条件部ファジィ集合の全ての組合せであり，属性が識別に寄与する度合いを考慮していないため，ルール獲得可能性がないファジィ数入力ベクトルを生成し調査していると考えられる．

本研究では長さ l で調べる属性を選択することにより，属性の組合せである ${}_nC_l$ を減少させる．これにより，入力ベクトル数の削減を行う．

3.1　属性選択

例えば図2の3クラスパターン識別問題において，図に示すような識別境界線を持つ学習後のニューラルネットと学習用データが与えられていると考える．

このとき，図3(a) のように属性 x_1 のみを調べるだけでは，式 (8) に示す区間ベクトルの大小関係が成り立たないため，クラスを識別することができない．一方，図3(b) に示す出力ベクトルでは大小関係が成り立つため，属性 x_2 のみ調べることで，クラス2であるかどうかを識別することができる．つまり，長さ1のルールを獲得し

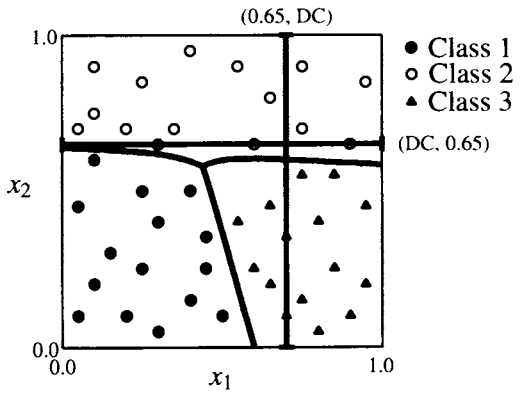
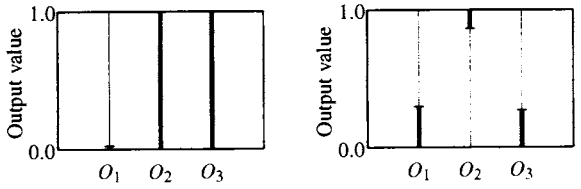


図2　3クラス識別問題



(a) 入力ベクトル (0.65, DC)　　(b) 入力ベクトル (DC, 0.65)

図3　入力ベクトルに対する出力ベクトル $\mathbf{O}_k$

ようとした場合，入力ベクトル $(x_1$,DC) （例えば (S,DC),(MS,DC),$\cdots$,(L,DC)) に対してルールは獲得されないため，属性 x_1 に対するルール獲得可能性を調べる必要はない．

このように識別へ大きな影響力をもつ属性を選択することで，長さ l のルールを獲得するために使用される入力ベクトル数を ${}_nC_l \times 5^l$ から $m \times 5^l$ に削減することができる．ここで，m は属性選択により選ばれた属性の組の数である．

属性選択方法として，以下に述べる2つの方法を考えることにする．

3.1.1　手法1

手法1は，長さ l で最も重要であると思われる属性についてのみルール獲得を行う．この手順をまとめると以下のようになる．ここで，長さ l のルールを獲得する場合，これまでに調査された属性集合 $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \cdots, \pi_{l-1}\}$ が与えられていると仮定する．π_i は長さ i で調べられた属性を表す．

[属性選択手順]

Step 1: 長さ l における入力ベクトル $\mathbf{X}_p$ を生成する．ここで，N は全学習用データの数である．長さ $l-1$ までに選択された属性集合 π と長さ l で新たに選択する属性 x_j に数値データを，その他の属性を "DC" として入力ベクトル $\mathbf{X}_p$ を生成する．

Step 2: 入力ベクトル $\mathbf{X}_p$ を学習後のニューラルネットに入力し，識別可能なデータ数 $N(\pi + x_j)$ を調べる．

Step 3: 未選択の属性について，Step 1 と Step 2 を繰り返す．

Step 4: 識別可能なデータ数 $N(\pi + x_j)$ が最大となる属性 x_j を π_l として選択する．最大となる属性 x_j が複数存在する場合，それぞれの属性も π_l として選択する．最大値が属性 x_j を選択する以前の識別可能なデータ数 $N(\pi)$ より増加しなかった場合は，$\pi_l = \phi$ としてどの属性も選択しない．

Step 5: $l = n$ または $N(\pi + x_j) = N$ となった場合，属性選択を終了する．そうでない場合，$\pi := \pi + \pi_l$，$l := l + 1$ として Step 1 へ戻る．

3.1.2　手法2

手法2は，ある属性を選ぶことでそれまでよりも識別可能なデータ数が増加した場合，すなわち少しでもその属性が識別に関与していると考えられる場合，その属性を選択するようにする．したがって，手法1より入力ベクトル数は増加することになる．手法1と異なる Step 4 のみを以下に示す．

[属性選択手順]

Step 4': $N(\pi + x_j) > N(\pi)$ となる属性 x_j を π_l として選択する．もし $N(\pi)$ より増加しなかった場合は，$\pi_l = \phi$ としてどの属性も選択しない．

4　数値実験

UCI machine learning repository から利用可能な Australian credit approval database に対して，前節で述べた2つの方法を適用し数値実験を行った．このデータベースは，データ数 690 の 14 次元2クラスパターン識別問題である．数値実験では，表1に示す計算機を使用した．

属性選択には，バックプロパゲーション・アルゴリズムを用いて学習済みの入力層ユニット数 14，中間層ユニット数9，出力層ユニット数2のニューラルネットと学習用データを使用した．3

表 1　計算機の仕様

CPU	AthlonXP 2200+
キャッシュ	L1:128KB, L2:256KB
メモリ	1024MB
OS	Linux kernel 2.4.18

表 2　入力ベクトル数

長さ	全組合せ数	手法 1	手法 2
1	70	0	0
2	2,275	0	0
3	45,500	125	250
4	625,625	625	3,750
5	6,256,250	3,125	81,250
6	46,921,875	15,625	1,468,750
7	268,125,000	156,250	16,718,750

表 3　ルール獲得結果 (学習用データ)

方法	# of rules	Rate (%)	Time (sec.)
従来法	195,189	88.8	3,428.9
手法 1	15,892	78.6	6.4
手法 1 *	33,355	80.6	78.5
手法 2	154,386	88.0	891.5

節で述べた 2 つの方法で属性選択を行い，ルールを獲得した．

それぞれの方法における長さ 1 から 7 までの入力ベクトルの数を表 2 に示す．表 2 に示す入力ベクトルを用いて，長さ 1 から 7 までルール獲得した結果を表 3 に示す．表 3 より，手法 1 では計算時間は従来法に比べて非常に短くなっているが，あまり良い識別率を得ることができていない．しかし，長さ 8 まで調べた手法 1 *では計算時間はかなり短く良い識別率を得ることができたことがわかる．手法 2 では，少ない入力ベクトルで多くのルールが獲得され，高い識別率を保つことができた．

また，テスト用データに対する識別性能を調べるため，10-fold cross-validation を用いて評価を行った．10-fold cross-validation では，まず，全データを 10 個の部分集合に分割し，9 個の部分集合を学習用データ，残りの部分集合をテスト用データとして識別を行う．それぞれの部分集合をテスト用データとしてこの処理を 10 回繰り返すことで性能を評価する．10-fold cross-validation を用いて評価した結果を表 4 に示す．表 4 より，手法 1 *，手法 2 共に，テスト用データに対しても良い識別率を得ることができた．

表 4　ルール獲得結果 (10-fold cross-validation)

方法	Rate (%)	Time (sec.)
従来法	86.2	41,399.3
手法 1	65.2	84.1
手法 1 *	76.7	2,193.8
手法 2	85.4	11,745.4

5　おわりに

本論文では，各長さでのルール獲得の際に，どの属性が識別に影響しているのかを考慮することにより，ニューラルネットへ入力する組合せ数を効果的に削減することができた．しかし，学習後のニューラルネットの入出力関係を説明するという観点から，できるだけ多くのファジィ If-Then ルールを獲得する方が良いと考えられる．今後の課題として，入力ベクトルの削減率を高く保ちつつたくさんのルールを獲得するように属性選択手法を改良することが挙げられる．

参考文献

[1] H. Ishibuchi and M. Nii: Generating fuzzy if-then rules from trained neural networks: Linguistic analysis of neural network, Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks, pp. 1133–1138(1996).

[2] H. Ishibuchi, M. Nii, and K. Tanaka: Linguistic rule extraction from neural networks for high-dimensional classification problems, Proc. of Complex Systems, pp. 210–218(1998).

[3] M. Nii, K. Ogino, T. Sakabe, H. Sakagami and Y. Takahashi: A parallelized rule extraction method for high-dimensional pattern classification problems, SICE Annual Conference 2002 in Osaka, sice02-0737(2002).

連絡先：

〒 671-2201
兵庫県姫路市書写 2167
姫路工業大学 大学院 工学研究科 電気系工学専攻
電子情報工学部門 情報制御機構研究室
新居　学
電話：0792-67-4919
FAX：0792-67-4975
E-mail：nii@comp.eng.himeji-tech.ac.jp

Gaussian Barネットワークを用いたニューロファジィGMDH
Neurofuzzy GMDH with Gaussian Bar Network

大谷　崇†, 坊向 新也‡, 根本 剛§
Takashi OHTANI†, Shinya BOUMUKI‡, Takeru NEMOTO§
†近畿大学工学部, ‡株式会社ミドリ電化, §読売東京理工専門学校
†School of Eng., Kinki Univ., ‡Midori Denka Co., Ltd.,
§Yomiuri Institute of Technology, Tokyo

Abstract: A network type GMDH model is proposed, whose partial descriptions are represented as Gaussian Bar Network. Results of simulation studies of function approximation reveal that the approximation accuracy of proposed model is comparable with the conventional Neurofuzzy GMDH and the proposed model has greater generalization ability.

1. はじめに

ネットワーク型 GMDH の部分表現に Gaussian Bar ネットワーク [1] を用いるニューロファジィ(NF)-GMDH[2] を提案する．そして既知の非線形写像から生成したデータを用いた数値実験を行って，提案法の関数近似能力を従来法である RBF ネットワークを用いる NF-GMDH と比較する．

2. Gaussian Barネットワークを用いたニューロファジィGMDH

今，入力ベクトル$\boldsymbol{x} \in \boldsymbol{R}^J$ が与えられているとする．入力が J 次元の Gaussian Bar ネットワーク [1] は次のように表される．

$$y = \sum_{k=1}^{K} \sum_{j=1}^{J} \exp\left\{ -\frac{(x_j - a_{kj})^2}{b_{kj}} \right\} w_{kj} \qquad (1)$$

RBF ネットワークでは，ガウス関数のテンソル積が用いられているが，Gaussian Bar ネットワークでは，ガウス関数の和を用いている．Gaussian Bar ネットワークは，ダミー入力に対して頑健な関数近似能力をもつと報告されている．

NF-GMDH [2] は，図 1 に示すような階層構造のネットワークである．層の数を P，1 層あたりの部分表現数を M とする．第 p 層第 m 部分表現として Gaussian Bar ネットワークを用いると，その出力 y^{pm} は次のように計算される．

$$y^{pm} = \sum_{k=1}^{4} \sum_{i=1}^{2} \exp\left[-\frac{\left\{ (s_i^{pm})^T \boldsymbol{x}^p - a_{ki}^{pm} \right\}^2}{b_{ki}^{pm}} \right] w_{ki}^{pm} \qquad (2)$$

ここで，$\boldsymbol{x}^p$ は第 p 層における各部分表現への入力ベクトル，s_i^{pm} は第 p 層第 m 部分表現第 i 入力の射影ベクトルである．最終的なモデルの出力は最上層における各部分表現の出力の平均とする．

3. 数値実験

以下の非線形写像と区間 [0,1] 内の乱数によって各々 800 件のデータ ($(x_1, \cdots, x_6)^T$ と対応する y^* を 800 組) を生成した．そのうち，500 件をトレーニングデータ，残りの 300 件をチェッキングデータとした．なお，従来の RBF ネットワークを部分表現として用いた NF-GMDH を NF-GMDH(RBF) と略す．また提案法を NF-GMDH(Bar) と略す．

3.1 2 次関数

$$y^* = \frac{1}{20}(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5)^2 \qquad (3)$$

学習結果を表 1 に示す．トレーニングデータに対する 2 乗誤差の和を SSE(T)，チェッキングデータに対する 2 乗誤差の和を SSE(C) と示す．また，RBF の欄には従来法での，Gaussian Bar の欄には提案法での学習結果を示す．NF-GMDH(Bar) の 1 層と 2 層のモデルでは，3 層と 4 層のモデルでの SSE に比べてかなり大きくなっている．これは，モデルの構造と，式 (3) の構造に起因するものと考えられる．この関数から得られたデータは，NF-GMDH(Bar) の場合，2 層以下の階層数を持つモデルで近似するのは不可能である．

NF-GMDH(RBF) と NF-GMDH(Bar) を比較すると 1 層と 2 層のモデルでは NF-GMDH(RBF) の方が

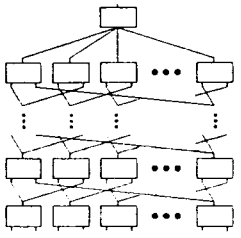


図 1: ニューロファジィGMDH の階層構造

表 1: 学習係数と 5000 回学習後の 2 乗誤差の和 (SSE)

Basis	RBF			Gaussian Bar		
Layer	τ	SSE		τ	SSE	
		Training	Checking		Training	Checking
1	2.7×10^{-2}	0.251631	0.201110	2.2×10^{-2}	0.306361	0.238750
2	8.7×10^{-1}	0.001095	0.000850	2.2×10^{-2}	0.266750	0.200372
3	6.9×10^{-1}	0.001024	0.000815	6.5×10^{-1}	0.001066	0.000704
4	1.8×10^{-1}	0.002335	0.001774	9.3×10^{-2}	0.000813	0.000548

表 2: 学習係数と 5000 回学習後の 2 乗誤差の和 (SSE)

Basis	RBF				Gaussian Bar		
Layer	τ	SSE			τ	SSE	
		Training	Checking			Training	Checking
			resulting	best(epochs)			
1	2.7×10^{-3}	1.489145	0.980882	0.980882(5000)	1.5×10^{-3}	1.598439	0.959245
2	1.6×10^{-2}	0.490504	0.611920	0.485002(800)	2.1×10^{-3}	1.466095	0.954378
3	1.4×10^{-2}	0.493115	0.469211	0.443791(500)	6.3×10^{-3}	0.596243	0.467678
4	1.3×10^{-2}	0.469178	0.518227	0.448711(400)	4.4×10^{-3}	0.532949	0.419007

SSE は小さくなっているが，3 層と 4 層のモデルの SSE(C) は NF-GMDH(Bar) の方が小さくなっている．NF-GMDH(Bar) は，3 層のモデルよりも 4 層のモデルの方が近似精度が高く，また NF-GMDH(RBF) よりも近似精度が高い．層の数を大きくしたことで モデルの非線形性が強くなったためであると考えられる．さらに，Gaussian Bar ネットワークは入力に対して線形な出力が簡単に得られるので，NF-GMDH(Bar) は，未知パラメータ数が大きくなっても，学習が収束しやすく同時にオーバーフィッティングになりにくくなっているものと考えられる．

3.2 複雑な非線形関数

$$y^* = \frac{1}{9}\left\{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos(2\pi x_1) + x_2 x_3 + x_4 \sin(\pi x_5) + \frac{1}{2}x_6\right\}^2 \quad (4)$$

学習結果を表 2 に示す．表中の NF-GMDH(RBF) のチェッキングデータに対する SSE の resulting には学習 5000 回終了後の SSE が，best には学習 5000 回中で最小の SSE の値と，そのときの学習回数が括弧の中に記入されている．NF-GMDH(Bar) の場合，各層で 5000 回学習後の SSE が最小となっており，SSE は 4 層で最小となっていることから，NF-GMDH(Bar) では，学習回数と層の数は大きいほど良く，オーバーフィッティングになりにくいと考えられる．

NF-GMDH(RBF) と NF-GMDH(Bar) の SSE を比較すると，1 層や 2 層のモデルでは NF-GMDH(RBF) の方が小さくなっているが，4 層のモデルでの SSE(C) は NF-GMDH(Bar) の方が小さくなっている．

NF-GMDH(RBF) では最適な学習回数や層の数が決定しにくいが，モデルに適さない入力変数の組み合わせの場合には，NF-GMDH(RBF) より学習回数や層の数を比較的大きく設定した NF-GMDH(Bar) を用いた方が良いと考えられる．

4. おわりに

本研究では，部分表現として Gaussian Bar ネットワークを用いる NF-GMDH を提案した．そして関数近似能力に関するベンチマークテストを行った．その結果，提案法は従来法と同等の関数近似能力を有し，また，オーバーフィッティングになりにくいモデルであることが確認された．

参考文献

[1] E. Hartman and J. D. Keeler: *Neural Computation*, Vol.3, pp.566-578 (1991)

[2] 大谷 崇, 市橋 秀友, 長坂 一徳, 三好 哲也: 日本経営工学会論文誌, Vol. 47, No. 6, pp.384-392 (1997)

問い合わせ先：大谷　崇

〒 739-2116 東広島市高屋うめの辺 1

近畿大学工学部情報システム工学科

Tel:0824-34-7000 Fax:0824-34-7011

e-Mail:hawk@computer.org

リアルタイム処理のための非線形関数ネットワーク・ハードウェアモデル

Nonlinear function network hardware model for real-time signal processing

神酒 勤† 矢野 慎治† 佐藤 徹†
Tsutomu Miki Shinji Yano Toru Sato

†九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻
Graduate School of Life Science and Systems Engineering
Kyushu Institute of Technology

Abstract: The simplest wavelet network (SWN) proposed by T.Yamakawa *et. al.* has good performance for the approximation of nonlinear functions. However the SWN demands a lot of computinal times in the approximation process because its parameters are determined by learning. In order to overcome this problem, the analytical weight assignment is proposed in this paper. Furthermore we refine the architecture to hardware-oriented and try to improve the operation speed. The real-time ability of the proposed method is discussed.

1 はじめに

自然界のデータは、非線形性が強く厳密に定義することが一般的に困難である。山川らは、非線形性の強い入出力関係を上手に近似する手法の１つとして、単峰性ウェーブレットネットワーク [1] を提案した。しかし、このモデルはソフトウェア処理を前提としているので近似能力が高い反面、処理時間が大という問題があった。神酒らは、このモデルの基本となるシンプレストウェーブレットネットワーク (SWN) のハードウェアモデルを提案している [2]。このモデルは、基底の配置とその表現形式をハードウェア指向に改良し、高速処理を可能としている。しかし、このモデルは従来手法同様、学習による結合荷重の決定法を用いているので、対象に応じて処理速度が変わること、また繰り返しを必要とするので処理時間が比較的に大きいという問題点を残している。

本研究では、結合荷重を算術的に決定することにより処理時間の対象依存性を改善した非線形関数ネットワークモデルを提案する。提案するモデルをFPGAに実装し、その近似精度、回路規模およびリアルタイム性ついて評価、検証する。

2 非線形関数ネットワーク

2.1 非線形関数ネットワークの構成

本非線形関数ネットワークの構成を図１に示す。本非線形関数ネットワークは、複数の基底関数ψ_iを線形結合した、いわゆるファンクショナルネットの一種である。それぞれの基底関数の結合係数W_iは結合荷重の形で表されるので、ネットワークの出力は次式で定義される。

$$fx(j) = \sum_{i=1}^{n} W_i \times \psi_i(j) \ldots (1)$$

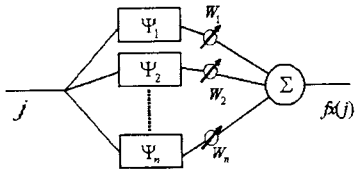


図 1: 非線形関数ネットワークの構成

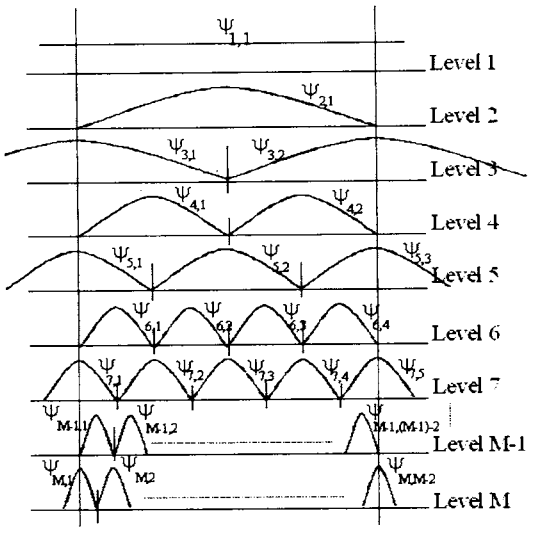


図 2: 基底関数配置

2.2 基底関数と配置

山川らの SWN では、式 (2) で表される単峰性ウェーブレットを基底関数に用いている [1]。

$$\psi(x) = \begin{cases} cos\pi x & (-0.5 \leqq x \leqq 0.5) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad \ldots(2)$$

SWN では、ソフトウェア実装を前提としているので実数表現の基底関数を計算により算出している。一方、神酒らはハードウェア用の基底配置 (図 2) を提案している [2]。このモデルでは、基底の区切りが重複しないように半周期シフトした偶数レベルの基底を追加している。本研究でもこの基底配置を採用する。

2.3 結合荷重算出法

従来の結合荷重の決定法は、学習論的手法を用いているので対象に応じて処理時間が異なる等の問題があった。本研究では、処理対象依存性を解消するために結合荷重を算術的に決定する新しい手法を提案する。また、近似精度は次式で定義する自乗平均誤差 E で評価する。

$$E = \frac{1}{2}\sum_{j=0}^{m}\{fx(j) - \sum_{i=1}^{n} Wi \times \psi_i(j)\}^2 \ldots(3)$$

本手法では、図 2 に示す各レベル毎に関数近似を行う。上位レベルの近似で残った差を残差関数 g_i とし、次のレベルでは g_i に対して近似処理を行う。レベル i における残差関数 $g_i(j)$ は式 (4) となる。

$$g_i(j) = g_{i-1}(j) - W_{i-1} \times \psi_{i-1}(j) \ldots(4)$$

ここで、レベル i の各基底 $\psi_i(j)(j = s, s+1, s+2, \cdots, t)$ に関する自乗平均誤差 E' は

$$E' = \frac{1}{2}\sum_{j=s}^{t}\{g_i(j) - Wi \times \psi_i(j)\}^2 \ldots(5)$$

となる。式 (5) は、結合荷重 W_i に関して二次形式となるので E' を最小とする結合荷重 W_i が最適結合荷重となる。そこで、W_i について式 (5) を整理すると式 (7) が求まる。

$$E' = \frac{1}{2}\sum_{j=s}^{t}\{\psi_i(j)^2 Wi^2 - 2g_i(j)\psi_i(j)Wi + g_i(j)^2\}$$

$$= \frac{1}{2}\sum_{j=s}^{t}\psi_i(j)^2[W_i^2 - 2\{\sum_{j=s}^{t} g_i(j)\psi_i(j)\}/\{\sum_{j=s}^{t}\psi_i(j)^2\}W_i + \sum_{j=s}^{t} g_i(j)^2/\sum_{j=s}^{t}\psi_i(j)^2]$$

$$= \frac{1}{2}\sum_{j=s}^{t}\psi_i(j)^2[\{W_i - \sum_{j=s}^{t} g_i(j)\psi_i(j)/\sum_{j=s}^{t}\psi_i(j)^2\}^2 + \sum_{j=s}^{t} g_i(j)^2/\sum_{j=s}^{t}\psi_i(j)^2 - \{\sum_{j=s}^{t} g_i(j)\psi_i(j)/\sum_{j=s}^{t}\psi_i(j)^2\}^2] \quad \ldots(6)$$

$$W_i = \sum_{j=s}^{t} g_i(j)\psi_i(j)/\sum_{j=s}^{t}\psi_i(j)^2 \ldots(7)$$

式 (7) を計算することにより最適結合荷重が求まる。

3 ハードウェアモデル

3.1 ハードウェアに適した基底関数の表現

提案モデルの基底の形状を図 3 に示す。基底はハードウェア化を考慮し、2 のべき乗の巾を

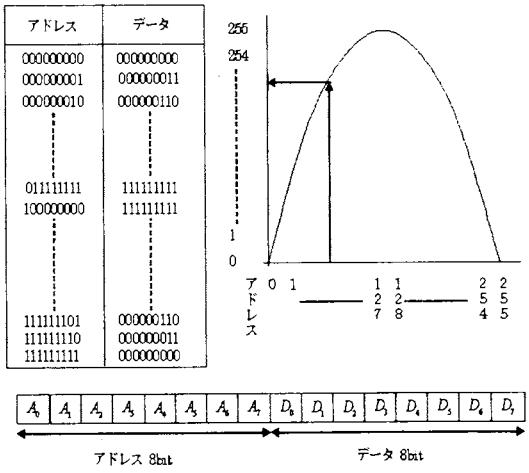


図 3: 基底の形状

持つ基底とする。基底の高さを 8bit、最大巾は 256 とした。基底関数を LUT(Look Up Table) 方式でメモリに格納することで、高速参照と関数形状の自由度を実現している。2 のべき乗巾の関数を利用しているので 1 つの LUT から全ての関数を参照することができる。

3.2 提案モデルのブロック図

提案する非線形関数ネットワーク・ハードウェアモデルの全体ブロックを図 4 に示す。提案モデルは、残差関数メモリ、基底関数メモリ、制御ブロックおよび演算ブロックで構成される。

本システムでは対象信号を 8bit ×256 個のデータ単位で処理する。残差関数の初期値として残差関数メモリに 256 個のデータを格納する。基底関数メモリには、図 3 のデータを格納する。演算ブロックでは、結合荷重を算出するために残差関数 (式 (4)) を算出し、式 (7) を用いて結合荷重を算出する。制御ブロックは、全体のブロックの制御を行う。出力は $8bit \times 133$ 個の結合荷重となる。近似関数を合成する場合は、基底関数と結合荷重より合成する。

3.3 提案モデルの近似処理フロー

提案モデルの近似処理フローを図 5 に示す。ここで Lv はレベル、b は各レベルでの基底番号を表す。LvMAX は最大レベル、BMAX は各レベルので基底数を表す。下記の手順で処理を行う。

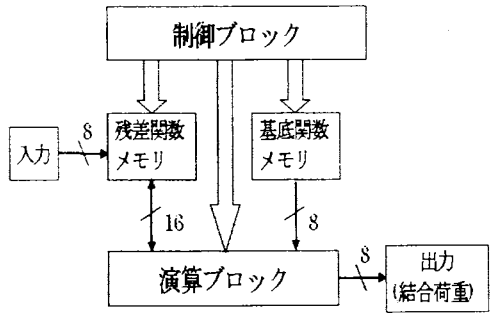


図 4: 非線形関数ネットワークのブロック図

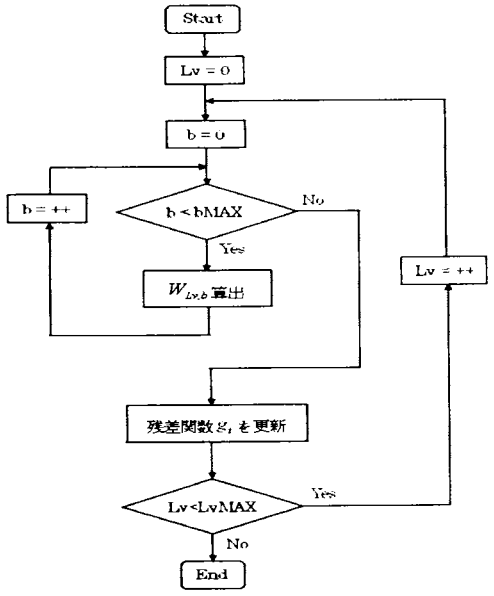


図 5: 本手法の近似処理フロー

1) 256 個のデータをメモリへ格納する。
2) 格納したデータに対して Lv0 の基底関数を用いて近似する。近似誤差を残差関数として出力する。
3) 2) で算出した残差関数を Lv1 の基底関数で近似し、その誤差を新しい残差関数として更新する。
4) 以後、順次 Lv を更新し、更新された残差関数に対し近似処理を行う。
5) LvMAX まで更新し、処理を終了する。

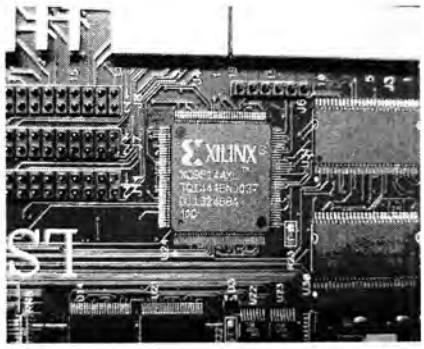


図 6: 実装する FPGA 基板

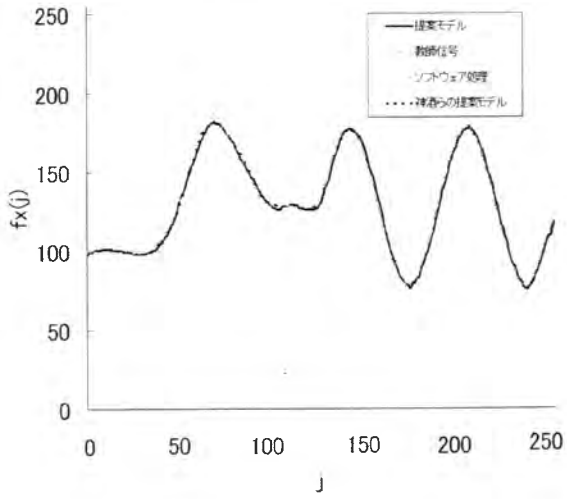


図 7: 非線形関数の近似結果

表 1　提案モデルと従来モデルの比較

モデル	誤差 (RMSE)	規模 (基底数/ slice)	f_{max} (MHz)	t_{op} (sec)
SW[1] (山川ら)	0.0070	36 個/ —	—	300
HW[2] (神酒ら)	0.0067	35 個/ 1806	6.117	—
HW (提案モデル)	0.0064	35 個/ 985	22.975	2×10^{-4}

4　提案モデルと従来モデルの比較

提案モデルの性能を確認するため図 7 に示す非線形関数の近似実験を行った。本研究では、Xilinx 社の FPGA VirtexE XCV1000E をターゲットデバイスとしてハードウェアを実装した。誤差 (RMSE)、回路規模 (slice 数)、最大動作周波数 (f_{max}) および処理時間 (t_{op}) について従来モデルと比較した結果を表 1 に示す。*SW* はソフトウェア処理、*HW* はハードウェアモデルを表す。

表 1 より、RMSE について本提案モデルが、従来モデルより良好な近似結果を得ていることが分かる。回路規模においても従来モデルの 55% に縮小できている。また動作周波数については従来モデルの 3.8 倍、処理時間では、当時使用したコンピュータの性能を考慮しても良好な結果を得ているといえる。

5　おわりに

本稿では、SWN の問題点である処理時間の対象依存性を解消すべく結合荷重の算術的決定法を導入し高速・高精度な非線形関数ネットワークモデルを提案した。非線形関数の近似実験により近似誤差、処理速度、実装面積共に従来モデルより優れていることを示した。

今後は、ハードウェアレベルでのチューニングを行い、更に処理速度を改善すると共に具体的な応用へ適用していく。

参考文献

[1] 山川 烈, 内野 英治, 佐松 崇史, "単峰性ウェーブレットを用いたウェーブレットネットワークとそのダイナミカルシステムのモデリングへの応用," 信学論 (A), Vol.J79-A, No.12, pp.2046-2053, 1996.

[2] 神酒 勤, 佐藤 徹, 川越 聡, シンプレスト・ウェーブレットネットワークの FPGA 実装に関する考察, TECHNICAL REPORT OF IEICE.VLD2001-125, pp.25-30,2002

連絡先：
〒 808-0196
北九州市若松区ひびきの 2 − 4
九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻
神酒勤
Tel/Fax ：093-695-6125
Email：miki@brain.kyutech.ac.jp

ニューラルネットワークを用いた直感的推論による為替相場分析支援システムの構築

An Exchange Rate Analysis Support System by Intuitive Reasonings Using Neural Networks

谷　久壹朗　　亀井　且有
Kyuichiro Tani　　Katsuari Kamei
立命館大学
Ritsumeikan University

Abstract: The purpose of our work is to design an exchange analysis support system by the intuitive reasonings using neural networks. The intuitive reasonings is totally different from a logical reasonings used in AI and is defined by subjective information such as adjectives high-low, good-bad and etc. A soft computing aided management information analysis system using fuzzy theory, neural networks and the intuitive reasonings is a new challenge to management science specialists. In this paper, we propose a new analysis support system based on the intuitive reasonings.

Firstly, we describe shortly the intuitive reasonings. Secondly, the intuitive reasoning is applied to the exchange rate analysis. Thirdly, the results of the intuitive reasoning, that is, the subjective exchange rate evaluations and their uncertainty factors are projected on the optimistic-pessimistic axis. Fuzzy membership functions are used for the projection. The total subjective evaluations of the exchenge rate are given by a contour line map. Finally, some evaluation results based on the actual data of the domestic exchange are shown and their analyses are given for the system users.

1. はじめに

市場構造の複雑・多様化や情報の流通スピードが増している現代社会において，企業の最高意思決定者には，あいまいな情報のもとで出来るだけ早く何らかの意思決定を行わざるを得ない状況が生じている．この場合，意思決定者はこれまでの経験と勘にもとづき，論理的というよりも直感的に意思決定を行う必要がある．このことからも，伝統的技術を応用した直感的推論[1]にもとづく意思決定支援システムが強く望まれている．

そこで本論文では，人間の価値判断に類似した情報処理方法として，ニューラルネットワーク(NN:Neural Network)を用いた直感的推論を提案し，それを24時間の円・ドル為替データの動向分析支援システムの構築に適用する．

2. 直感的推論と楽観－悲観軸表現

2.1 直感的推論

人間の右脳は，左脳に比べパターン認識や情動に関連した情報処理に特化した器官であるといえる．これは，スペリーらの研究以降判った大脳半球優位性から理解することが出来る[2]．左脳は主に演算や分析，言語対して優位性を持っている．そこで，左脳は，入力の細かな意味を読み取りその処理を行う論理的情報処理に特化していると考えられる．反対に，右脳はパターン認識や空間認知，また情動に優位性を持っている．そこで，右脳は，入力の大まかな全体像を読み取りその処理を行う感覚的情報処理に特化している．このことから，左脳は論理的処理，右脳は直感的処理を行っていると考える事ができる．

そこで本研究では，人間の右脳的直感処理を「人間の感覚的な推論による大局的な情報処理」と定義し，直感的推論を「評価対象への主観的評価を，複数の価値観で表される共通尺度により非言語的に表現する手法」と定義した[1]．

また，上記の定義より，直感的推論には次のような概念的機能がある．

- 右脳による主観的な評価基準にもとづく推論を行う．
- 多様な観点からの主観的評価にもとづき，大局的な推論結果を出力する．
- 推論結果は，左脳による論理的意味付けが行われる前の状態(非言語的表現)で出力する．

2.2 楽観－悲観軸表現

本研究では，直感的推論結果の表現形(価値観)として楽観－悲観軸表現を採用する．楽観－悲観軸とは，楽観的観点，悲観的観点から見た場合のそれぞれの評価結果を一軸上で連続的な変化として表現する方法である．人間の主観的価値観は個人によってその性質や数が異なるため，一概に形式化することが難しいと考えられる．そこで，楽観－悲観軸では，楽観的観点(安心感)，悲観的観点(不安感)といった原始的な対立感情で表現することにより，主観的

価値観の評価基準を統一している．

また，直感的推論は右脳的な機能を持つことから，その推論結果は左脳による論理的意味付けが行われる前の状態である非言語的表現で出力するのが望ましい．そこで直感的推論では，上記の楽観的観点および悲観的観点を共通尺度とする図形表現を採用した[1]．最終的に意思決定者は，右脳の直感的推論結果である楽観－悲観軸で表現された図形を見て，左脳で分析・意味付けをし，総合的な評価を行うことになる．

2. 為替レート動向分析支援システムへの応用

為替相場において，為替レートの変動は政府や企業の思惑が複雑に関連してはいるが，取引の多くは，売り方，買い方のパワーバランスによって形成されている．そのため，売りが優勢になれば売りに集中し，買いが優勢になれば買いに集中するという傾向がある．これは，取引の意思決定に人間の主観性が関わっているため，損をしないようにする心理が働いているものと思われる．

このような市場において，ある程度の動向予測は可能であるが，正確な予測を得ることは困難である．そのため，市場動向の雰囲気を読み取り，ある程度の予測を立てながら売買を行うことが現実的な解決方法と考えられる．しかし，雰囲気を読み取るためには，あいまいな情報を主観的に処理し，大局的に問題点を捉える必要がある．

そこで本研究では，単なる数値として処理するのではなく，主観的価値観における共通尺度である楽観－悲観軸を用いた直感的推論による為替レート動向の評価方法を提案する．これは，人間の感覚的評価基準をもとに為替の変動を主観的価値へ変換することにより，大局的な一つの主観的イメージとして市場の雰囲気を表現することを目的としている．また，この評価結果をもとに，為替レート動向分析の支援を行う．

3. システム概要

本システムでは，入力された円ドル為替相場の取引レート24時間分をもとに，為替レート動向を雰囲気として評価する．その際，入力データを取引変動幅と取引量の側面からそれぞれ評価する．実際には，楽観，中庸，悲観のそれぞれの主観的観点にもとづいたルールにより学習を行ったNNを用い，取引変動幅と取引量の評価を行う．そして，各評価結果を楽観－悲観軸上で合成し，これを総合的評価とする．

3.1 24時間の為替データの前処理

1)取引変動幅

取引相場の変動の度合いとその程度を評価することにより，市場や取引の活性度や，売り買いのどちらに対して活性化しているのかを評価するのに用いることを目的としたデータである．任意の時刻$t=[1,2,\cdots,3264]$における為替レートの変動を見るため，t-1を基準とした時刻tにおける変動の幅x_tを式(1)で定義する．

$$x_t = Yen_t - Yen_{t-1} \tag{1}$$

ただし，Yen_tは時刻tにおける1ドルあたりの日本円である．

時刻tから時刻t+23までの24時間における変動幅の確信度$\overline{\mu}_{A_k}$をファジィ言語A_kを用いて求める．

$$\overline{\mu}_{A_k}(t) = \frac{\sum_{s=t}^{t+24} \mu_{A_k}(x_s)}{\max_k \sum_{s=t}^{t+24} \mu_{A_k}(x_s)} \tag{2}$$

ただし，A_1=NB(NegativeBig),A_2=NS(NegativeSmall), A_3=ZE(Zero),A_4=PS(PositiveSmall),A_5=PB(PositiveBig)である．

2)取引量

一定期間の取引量を近似曲線から求めることにより，現在の取引がどのような動きをしているかを評価するためのデータである．評価する任意の時刻$s\in\{t,t+1,\cdots,t+23\}$における1ドルあたりの日本円の換算レート$Yen_s$をFig. 4のような二次曲線$\hat{Yen}(s)$を用いて近似する．得られた$\hat{Yen}(s)$より，時刻$t$における正規化された取引量を式(3)で定義する．

$$f(t) = \frac{\hat{Yen}(t) - \min_s \hat{Yen}(s)}{\max_s \hat{Yen}(s) - \min_s \hat{Yen}(s)} \tag{3}$$

3.2 ニューラルネットワークによる主観的評価

フィルタリングされた為替データ$\overline{\mu}_{A_k}(t)$および$f(t)$は取引変動幅評価NNおよび取引量評価NNにそれぞれ入力され，主観的評価$z\in[0,1]$の確信度$\mu^{B_k}(z)$を出力する．ただし，$B_k(k=1,2,\cdots,5)$はファジィ言語による主観的評価であり，Table.1にzに対するファジィ言語による主観的評価およびその確信度を示す．

また，それぞれの評価NNは，楽観的観点(op)，中庸的観点(mo)，悲観的観点(pe)から評価を行う3種類のNNから構成されており，後述するト

レーニングデータにもとづきバックプロパゲーション法により学習を行う．

Table.1 Subjective evaluations and grades for z

k	z	Subjective evaluation by the fuzzy language B_k	Certainty factor μ^{B_k}
1	0.0	fe (fear)	μ^{fe}
2	0.25	an (anxiety)	μ^{an}
3	0.5	we (welter)	μ^{we}
4	0.75	co (complacency)	μ^{co}
5	1.0	fv (fever)	μ^{fv}

3.2.1 取引変動幅評価ニューラルネットワーク

取引変動幅の確信度$\overline{\mu}_{A_k}(t)$を入力し，楽観的観点，中庸的観点，悲観的観点にもとづいた主観的評価の確信度$\mu_{B_k}(z_{1\bullet})$を出力する．ただし，

$z_{1\bullet} = 0.0,0.25,0.5,0.75,1.0 \ (\bullet \in \{\mathrm{op},\mathrm{mo},\mathrm{pe}\})$

である．

楽観的観点NN，中庸的観点NN，悲観的観点NNはそれぞれ5入力/5出力である．また，予備実験より，隠れ層2層(4ユニット/4ユニット)で構成される．ただし，重み更新係数$\eta = 0.6$，重み更新係数$\alpha = 0.8$に設定した．

例として，楽観的観点NNの学習に使用した教師データをTable. 2に示す．

Table.2 Training Data for Exchange bands

(a) Optimistic viewpoint ($\bullet$ = op)									
Input data $\overline{\mu}_{A_k}(t)$					Output data $\mu(z_{1\bullet})$				
$\overline{\mu}_{\mathrm{PB}}$	$\overline{\mu}_{\mathrm{PS}}$	$\overline{\mu}_{\mathrm{ZE}}$	$\overline{\mu}_{\mathrm{NS}}$	$\overline{\mu}_{\mathrm{NB}}$	$\mu^{\mathrm{fv}}_{1\bullet}$	$\mu^{\mathrm{co}}_{1\bullet}$	$\mu^{\mathrm{we}}_{1\bullet}$	$\mu^{\mathrm{an}}_{1\bullet}$	$\mu^{\mathrm{fe}}_{1\bullet}$
1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1

3.2.2 取引動向評価用ニューラルネットワーク

近似二次曲線$\hat{Y}en(t)$により求められた取引量評価$f(t)$の24時間分を入力とし，楽観的観点，中庸的観点，悲観的観点にもとづいた主観的評価の確信度$\mu_{B_k}(z_{2\bullet})$を出力する．ただし，

$z_{2\bullet} = 0.0,0.25,0.5,0.75,1.0 \ (\bullet \in \{\mathrm{op},\mathrm{mo},\mathrm{pe}\})$

である．

楽観的観点NN，中庸的観点NN，悲観的観点NNはそれぞれ24入力/5出力である．また，予備実験より，隠れ層3層(12ユニット/8ユニット/6ユニット)で構成される．ただし，重み更新係数$\eta = 0.6$，重み更新係数$\alpha = 0.8$に設定した．

例として，楽観的観点NNの学習に使用した教師データをTable.3に示す．なお，入力データはFig.1に示される代表的な取引量変化を表わす6タイプのデータを用いた．

Table.3 Training Data for Exchange values

	Input data	Output data				
	Tendency type	$\mu^{\mathrm{fv}}_{2\bullet}$	$\mu^{\mathrm{co}}_{2\bullet}$	$\mu^{\mathrm{we}}_{2\bullet}$	$\mu^{\mathrm{an}}_{2\bullet}$	$\mu^{\mathrm{fe}}_{2\bullet}$
Optimistic viewpoint ($\bullet$ = op)	Type 1	1	0	0	0	0
	Type 2	0	0	0	0	1
	Type 3	1	0	0	0	0
	Type 4	0	1	0	0	0
	Type 5	1	0	0	0	0
	Type 6	0	0	0	1	0

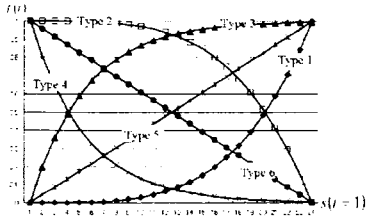


Fig.1 Typical exchange trends

3.3 楽観－悲観軸を用いた総合的評価

それぞれの観点評価ニューラルネットによって求められた取引変動評価と取引量評価の主観的評価の確信度$\mu^{B_k}_{i\bullet}$ $(i = 1,2 : k = 1,2,3,4,5)$とそのメンバシップ関数(Fig.2参照)を用いて任意な$z_{i\bullet} \in [0,1]$における確信度$\mu(z_{i\bullet})$を式(4)より求める．ただし，w^{B_k}は$z_{i\bullet}$におけるファジィ言語による主観的評価$\boldsymbol{B_k}$への帰属度(重み)である．

$$\mu(z_{i\bullet}) = \frac{\sum_k \mu^{B_k}_{i\bullet} \cdot w^{B_k}(z_{i\bullet})}{\sum_k w^{B_k}(z_{i\bullet})} \tag{4}$$

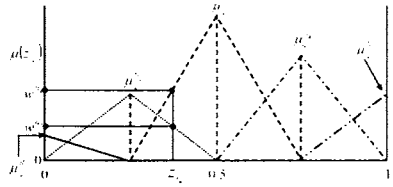


Fig.2 Membership functions for subjective evaluation

次に，式(5)を用いて取引変動評価の確信度$\mu(z_{1\bullet})$と取引量評価の確信度$\mu(z_{2\bullet})$を加算し正規化することにより総合的な為替レートの主観的評価$z_\bullet$の確信度$\mu_\bullet(z)$を求める．

$$\mu_\bullet(z) = \frac{\mu(z_{1\bullet}) + \mu(z_{2\bullet})}{\max_z(\mu(z_{1\bullet}) + \mu(z_{2\bullet}))} \tag{5}$$

式(5)で求めた楽観，中庸，悲観の各観点における主観的評価zの確信度$\mu_{\mathrm{op}}(z)$，$\mu_{\mathrm{mo}}(z)$，$\mu_{\mathrm{pe}}(z)$をもとに楽観－悲観軸上の任意な観点yにおける確信度$\mu(y,z)$を式(6)，式（7）で与え

られる内挿法により求める．

・楽観-中庸間$(0.5 \le y \le 1.0)$の場合

$$\mu(y,z) = -2(y-1)\mu_{mo}(z) + (1+2(y-1))\mu_{op}(z) \quad (6)$$

・中庸-悲観間$(0.0 \le y < 0.5)$の場合

$$\mu(y,z) = 2y\mu_{mo}(z) - (2y-1)\mu_{pe}(z) \quad (7)$$

また，式(8)を用いて観点yごとに$\mu(y,z)$を正規化し，これを楽観－悲観軸上における主観的評価の確信度とする．

$$\overline{\mu}(y,z) = \frac{\mu(y,z)}{\max_z \mu(y,z)} \quad (8)$$

Fig.3はy-z平面における確信度を等高図で表示した例である．

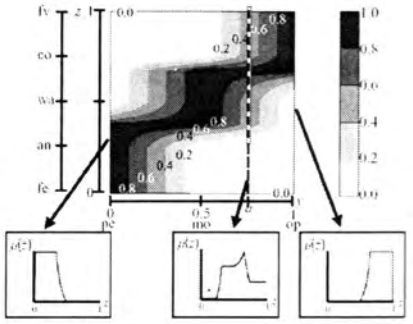


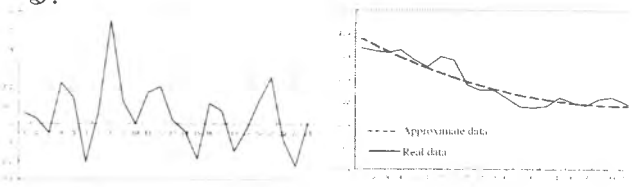
Fig.3 Subjective evaluation on optimistic-pessimistic axis

本システムの利用者は，楽観的観点から見た現状，または悲観的観点から見た現状といった現状の価値観yと為替レート評価zより，その価値観から見たときの為替レートの主観的評価の確信度を読み取る事ができる．

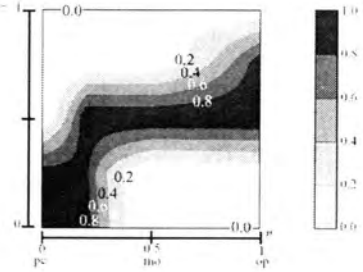
4. 評価結果

実際に，2001年度における円ドル為替相場のデータを用い評価を行った．本稿では，2001年5月1日4:00～27:00における為替レートに対する評価結果を例として表す．

このケースでは，為替レートの変動幅がプラス方向に活性しているのがFig.4-(a)から読みとれる．また，Fig.4-(b)では取引量は下降傾向にあるものの，下降速度が鈍っている傾向にある．そのため，システムの主観的評価結果であるFig.4-(c)は，全体的にやや安心感を感じている評価になっている．これは，動向が下降しているため本来なら評価が下がるところだが，下降が減速している点や，変動がプラス方向に活性している点が加味され，迷いから安心へ評価の幅が広がっている．だが，為替レートの取引量の下降傾向や過剰活性が悲観的評価では不安要因として反映され，恐怖として評価されている．このことから，本システムは市場の雰囲気に対し「期待感」を持っているものと考えられる．



(a)Variance of exchange band　(b)Approximated curve of exchange trend



(c) Subjective evaluation on optimistic-pessimistic axis

Fig.4 In case of Sample data

したがって，本システムの評価結果をもとに判断をするなら，現状ではリスクが高いが今後好機もあると判断される．

5. おわりに

本研究では，ニューラルネットワークを用いた直感的推論により為替レートの主観的評価から分析を行った．その際，直感的推論を人間の価値観により表現する方法として楽観－悲観軸を用い，為替レートの状態を直感的に主観的評価するシステムを提案した．実際に，3つの時期のデータを用い実験を行い，それぞれのレートの状態の雰囲気を表すことができた．特に，ニューラルネットワークを用いることにより，概念的な学習データで，大局的ではあるが特徴をつかんだ評価を得ることが出来た．これは，微妙なニュアンスを必要とする結果に対し，楽観－悲観軸はその状態の特徴を表現することができたと考えられる．すなわち，通常，言語や数値で表した場合，切り捨てられたり表現し切れない情報をも，視覚的な情報に変換することにより表現することができた．

参考文献

[1]谷 久一郎，亀井 且有：直感的推論による楽観－悲観軸から見た財務分析支援システムの構築,システム制御情報学会論文誌Vol.14，No.11，pp.515-521(2001)

[2]永江　誠司:脳と認知の心理学,ブレーン出版(1999)

連絡先:〒525-8577滋賀県草津市野路東1-1-1
立命館大学**理工学部情報学科**
谷　久壹朗
TEL/FAX:077-561-2807
E-Mail:tani@spice.cs.ritsumei.ac.jp

オントロジカルニューラルネットワークを用いたコミュニケーションロボットシステム

Communication Robot System with Ontological Neural Network

山口　亨
Toru Yamaguchi
東京都立科学技術大学
Tokyo Metropolitan Institute of Technology.
PRESTO, Japan Science and Technology Corporation (JST)

樋口　勝隆
Katsutaka Higuchi
東京都立科学技術大学
Tokyo Metropolitan Institute of Technology.

佐藤　英理
Eri Sato
東京都立科学技術大学
Tokyo Metropolitan Institute of Technology.

Abstract: The robot has recently emerged as a factor in the daily lives of humans, taking the form of a mechanical pet or similar source of entertainment. A robot system that is designed to co-exist with humans, i.e., a coexistence-type robot system, is important to be "it exists in various environments with the person, and robot system by which the interaction of a physical, informational emotion with the person etc. was valued". When studying the impact of intimacy in the human/robot relationship, we have to examine the problems that can arise as a result of physical intimacy
(Coordination on safety in the hardware side and a soft side). Furthermore, We should also consider the informational aspects of intimacy (recognition technology, and information transport and sharing).
This paper reports the interim results of the research of a system configuration that enhances the physical intimacy relationship in the symbiosis of the human and the robot.

1　はじめに

近年、ロボットは電子ペットやエンターテインメントの形式をとることにより人間の日常生活の一要素として確立されてきている。そしてそのような「人間と共存することを目的としたロボット」には、人間を含めた環境、物理的情報、および人間の感情などを認識し、それらに対応できるシステムを持つことが要求される。すなわち人間とロボットの共存は、人間の環境へロボットを安全に適応させ、またそのロボットは人間と細かな対話ができ、自己で判断を行えるだけの機能を有する必要があると考えられる。そこで本研究では、人間およびロボットの物理的な関係をより円滑にするシステムの構築についての検討を行った。

2　システムの概要

システムの構成の概要を以下に示す(図 1)。本研究におけるシステムは 3 層構造からなるラスムッセンモデルを基盤としている。人間の動作はロボットに搭載した CCD カメラ（図 2）から、またロボットと人間の位置情報は天井の CCD カメラから得る。

また、本研究のシステムは主に 3 つの知的システムから構成されている。

1. 人間の動作(しぐさ)認識
   ファジィ連想推論（FAM）
2. ロボットの情動表現（自立的行動支援）
   知情意の工学的モデル（K.E.I.Model）
3. ロボットの行動パターン学習
   Q-Learning アルゴリズム

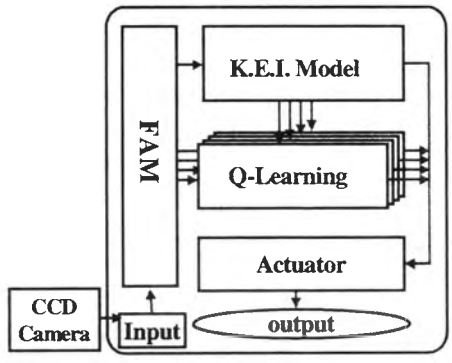


図 1. システム概要

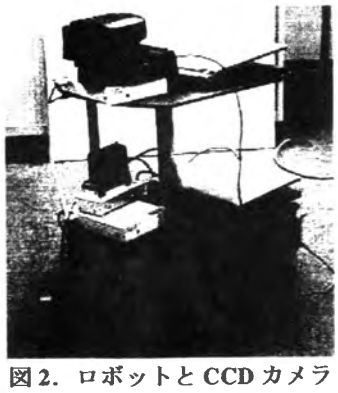


図 2. ロボットと CCD カメラ

本論文では、これらの知的システムをふまえた上でオントロジカルニューラルネットワークによる人間と

ロボットの円滑なコミュニケーションについて示し、本システムの有用性を明らかにしていく。

3 ソフトコンピューティングとオントロジー技術

文化･言葉の異なる人間同士の情報交換において、地球の別な場所や異なる環境で育った人間同士でもジェスチャーなどである程度のコミュニケーションが可能である。脳内の色相マップなど、人間の持つ共通のハードウェアにより脳へ形成されている人間共通の抽象的マップがありこれらの延長線上に「オントロジー」がある（図3）。

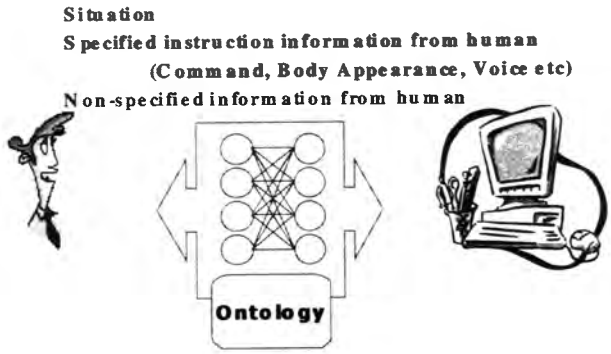


図3. インターフェイスにおけるオントロジーイメージ

本来オントロジーとは哲学の用語であり、「存在に関する体系的な理論」という意味を持っており、世の中に存在する全てのものを系統立てて説明することを目指している。コンピュータ内にあるモデルを作ろうとするときには、必ず対象となるものを概念化し、その概念を特徴づけ他と区別する属性を明確にする。そして、それらの概念を記述する。概念の中にはオブジェクト（名詞に対応）だけでなく活動を表す動詞的なものも含まれる。そしてこれらすべてを体系化したものが、オントロジーの工学的モデルの研究である。

4 情報共有とオントロジー

「人間－ロボット－ロボット－人間」システムにおいては、中間に入るロボット群が人間の意図を理解し共有することが円滑な情報共有の実現に結びつくと考えられる。人間の意図と状況をロボットが持つ抽象的な人間のオントロジーの中から導き出し、それをもとにコマンドを抽出するシステムを構成できれば、複数のロボットが人間とナチュラルに連携することや、異なる機構のロボット同士の間で共通の抽象的基盤の上で情報交換することが可能となる。さらに、学習することによりロボットはより多くのオントロジーを形成することができるので、そのオントロジーを他のロボットと共有することにより一人の人間のオントロジーではなく複数の人間のオントロジーを形成することも可能であると考えられる。

5 オントロジーの構成

実施例として、各ノード間を双方向連想記憶(BAM)で構成するオントロジーモデルを示す（図4）。

図4. オントロジーの構成例

人間とロボットの間にオントロジーが形成されており、ある動作と状況を知的エージェントが認識し対応する抽象化されたオントロジーの中から導きだすシステムである。形成されていく CPU のインスタンス部分に本研究の“知情意モデルと Q－Learning”のシステムが用いられている。

ROB1、ROB2 は、お互いに違った環境情報（シチュエーション）のもとに、それに伴ったインスタンスを学習していく（図4）。

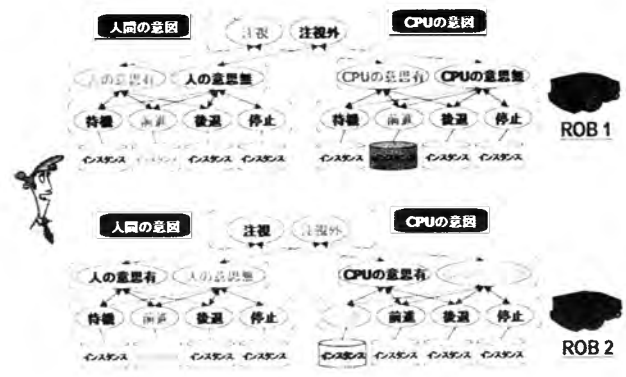


図5. ROB1,ROB2 それぞれ違ったシチュエーションにおけるインスタンスの学習

6 シチュエーションに合ったインスタンスの共有

もしROB1と同じシチュエーションにROB2が置かれたとしたら、ROB2はそのシチュエーションに対するインスタンスをまだ形成していないことになる。しかしそのような場合にはすでに同じシチュエーションで学習が終了しているROB1のインスタンスを共有することで、ROB2は学習をすることなく人間とスムーズなやり取りが可能となる（図6）。

図6. 同シチュエーションにおけるインスタンスの共有

このように、人間との間に知的なインターフェイスであるオントロジーを用いることでそれぞれの環境に合ったインスタンスの共有ができ学習の機会を軽減し、より円滑な人間とのやり取りが可能なマルチエージェントシステムが構成できる。

7 知識共有実験

本実験ではオントロジーを用いて構成したシステムにおいて、ROB1、ROB2がそれぞれ違った環境情報（シチュエーション）のもとでロボットの行動パターン（インスタンス）を学習し、シチュエーションを逆転した後それぞれの持っている学習した知識を共有する実験を行った。実験時の各シチュエーション・学習する行動パターンを以下に示す。

シチュエーション

- ROB1、ROB2、２台を使用
- 人間からの指示はROB1に対して行う
- ROB1は人間に近くROB2は人間から離れている
- 人間が“ロボットを呼んだとき”と“ロボットを追い払ったとき”の２つの指示についてそれぞれ学習

学習する動作のパターン（図7）

- 行動：近づく、逃げる、待機
- 速度：速い、普通、遅い

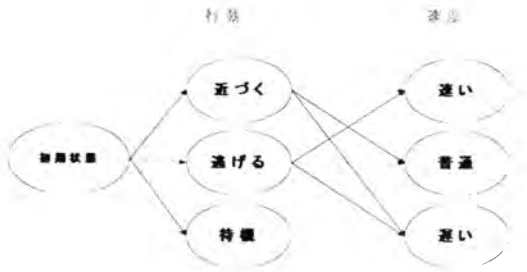


図7. 知識共有実験における動作パターン

以上の条件のもとで実機実験を行った。図中の上のロボットがROB1、下のロボットがROB2である（図8）。

このときの学習結果について各ロボットは、人間に呼ばれたときにROB1は速く近づきROB2は待機状態、人間が追い払ったときROB 1は速く逃げ、ROB2は遅く逃げる、という行動を示した。

ここで獲得された知識は、それぞれのロボットのシチュエーションに応じたインスタンスの獲得を意味する。つまりROB1は人間から近い位置にいて人間から直接指示を受けたというシチュエーションのインスタンス、ROB2は人間から遠い位置にいて人間から直接指示を受けていないというシチュエーションのインスタンスである（図11）。

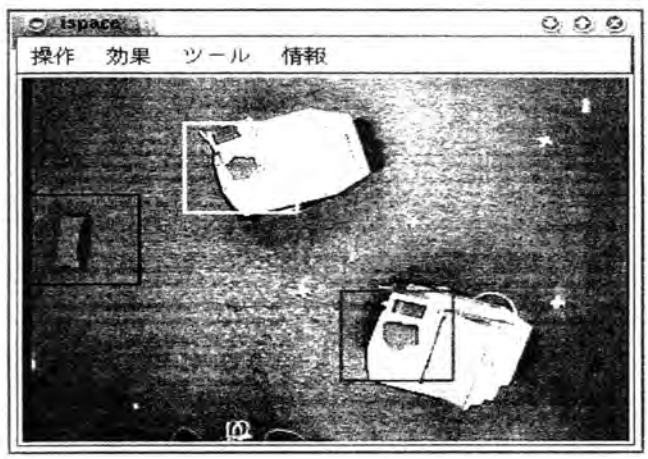


図8. 異なるシチュエーションによる学習実験

次に ROB1、ROB2 のシチュエーションを逆転した状態で同様の実験を行った。つまり、
・人間からの指示は ROB2 に対して行う。
・ROB2 は人間に近く ROB1 は人間から離れている。
というシチュエーションである（図 9）。図中の上のロボットが ROB2、下のロボットが ROB1 である。

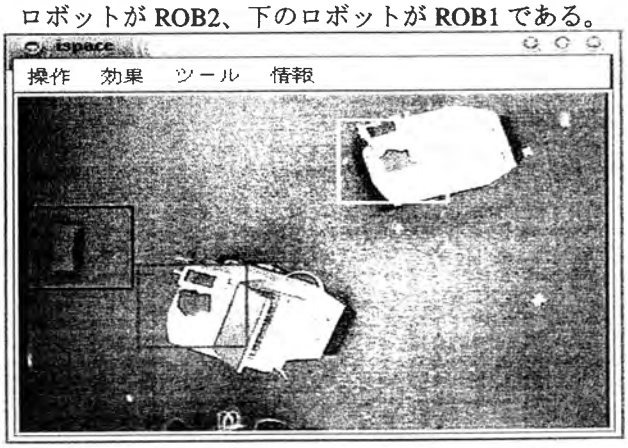


図 9. シチュエーション逆転後の実験

ROB1、ROB2 のシチュエーションを逆転させた時の実験では、すでに学習されている知識をお互いにそれぞれ共有し合うことができ、学習せずに知識を獲得できた（図 10）（図 11）。

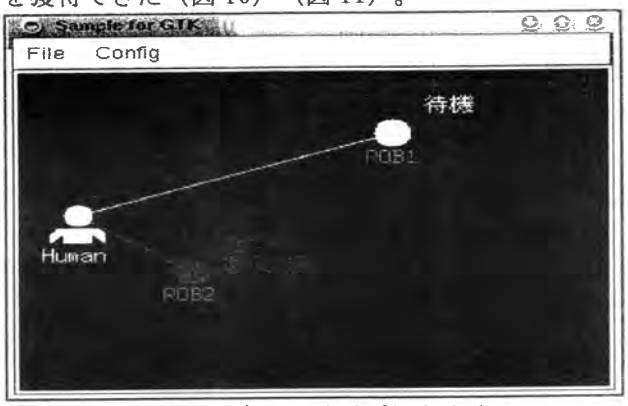


図 10. ロボットが呼ばれたときの知識共有結果

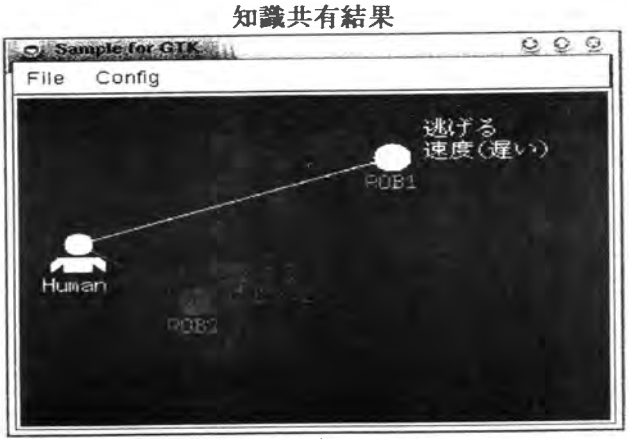


図 11. ロボットが追い払われたときの知識共有結果

8 おわりに

本研究ではロボットが学習によって獲得した行動パターン(インスタンス)をシチュエーションに応じて他のエージェントと共有することで、より円滑に多くのシチュエーションに対応し得るマルチエージェントシステムとしての有用性を示すことができた。今後の課題としては、異なる機構をもったロボット間に関しても知識共有が可能であるようなシステムの検討が挙げられる(図 12)。

図 12. 異なる機構を持ったロボット

参考文献

[1] Toru Yamaguchi, Tomomi Hashimoto, Takuya Yoshida, Hirayama Kenichiro, and Shinya Mizuno: "The K.E.I. (Knowledge, Emotion and Intention) model by the cause and effect network and application to that welfare robot system," Japan nerve circuit academic meeting. The eighth national conference lecture thesis collection, pp. 158-159 (1997)

[2] Shinya Mizuno, Takuya Yoshida, Hashimoto Tomomi, and Toru Yamaguchi: "The robot vision which the K.E.I. (Knowledge, Emotion and Intention) model was used for," Japan Society for Fuzzy Theory and Systems, The 15th fuzzy system symposium lecture thesis collection, pp. 235-236 (1999)

[3] Toru Yamaguchi: Fuzzy associative memory, Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Systems, Vol. 5, No. 2, pp. 245-260 (1993)

連絡先：

〒191-0065

東京都日野市旭が丘 6-6

東京都立科学技術大学

システム基礎工学専攻　山口研究室

樋口　勝隆

Email: higuchi@fml.ec.tmit.ac.jp

RBFネットワークのためのビジュアルシェル
A Visual Shell for The Learning of RBF Network

大谷　崇†, 山田 智也‡, 大崎 隆二‡
Takashi OHTANI†, Tomoya YAMADA‡, Ryuji OSAKI‡
†近畿大学工学部, ‡株式会社シーエスサービス
†School of Eng., Kinki Univ, ‡CS Service Co., Ltd.

Abstract: The software has been developed in JAVA, which visualizes the learning of 1 dimensional RBF network. This software is named "RBF Shell". In this reserch, RBF Shell has been extended to be able to support the learning of multidimensional RBF network. RBF Shell shows the graphical learning progress of the RBF Network suitable to the dimensionality of input vector.

1. はじめに

前年度の研究成果として，GUIで入力ベクトルが1次元のRBFネットワーク [1] の学習を行うソフトウェアがJAVAを開発された．開発されたこのソフトウェアを"RBF Shell"と呼ぶ．本研究では，RBF Shellを多次元のRBFネットワークの学習を行えるように拡張した．つまり入力ベクトルの次元数に応じてグラフィックスの表示が変更されるように設計した．

2. RBFネットワーク

簡略ファジィ推論の第 k ルールにおけるファジィ集合のメンバシップ関数を $A_k(x_j)$ とし，条件部適合度 μ_k を

$$\mu_k(x) = \prod_{j=1}^{J} \exp\left\{-\frac{(x_j - a_{kj})^2}{b_{kj}}\right\} \tag{1}$$

とする．ただし，$\boldsymbol{x}_i \in R^J$ であり，$\boldsymbol{a}$ と $\boldsymbol{b}$ は未知パラメータである．結論部実数値を w_k とし，このモデルの出力を

$$y = \sum_{k=1}^{K} \mu_k(x) w_k \tag{2}$$

とする．これはRBFネットワーク [1] とも呼ばれていて，ニューラルネットワークと同様にパラメータ数を増やせば任意の関数を任意の精度で近似できる．

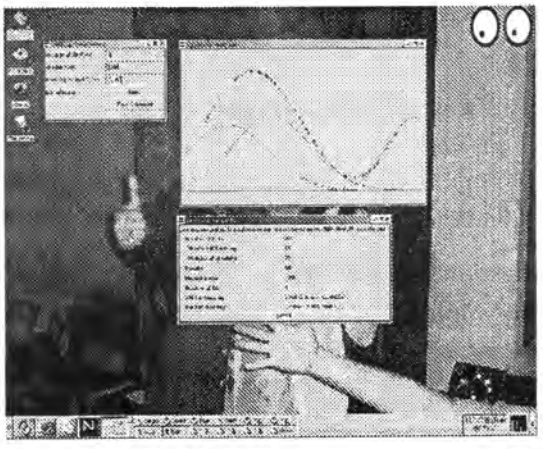


図 1: 実行画面

3. 実行例

図1は，RBFネットワークのためのビジュアルシェルであるRBF Shellを実行した時のスクリーンショットである．以下に実行までの操作を記述する．

JAVAのプログラムを実行するにはコマンドシェルで以下のようにコンパイルする必要がある．%をコマンドプロンプトとする．

```
%javac␣RBF_Shell.java↵
```

次に，以下のようにして実行する．

```
%java␣-classpath␣.␣RBF_Shell↵
```

実行すると図2のウインドウが開く．ウインドウには，RBFの数 K や学習係数 τ などのRBFネットワークの学習に必要な各種パラメータを入力する欄がある．

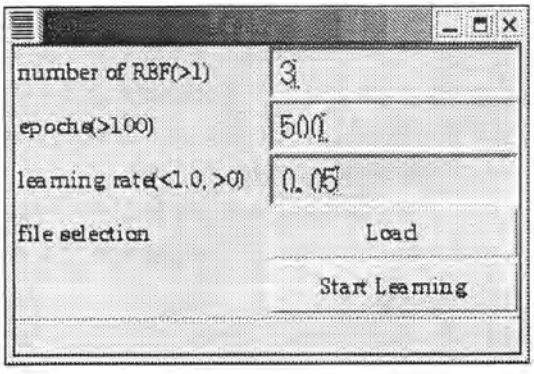


図 2: RBFの数，学習回数と学習係数を決定する画面

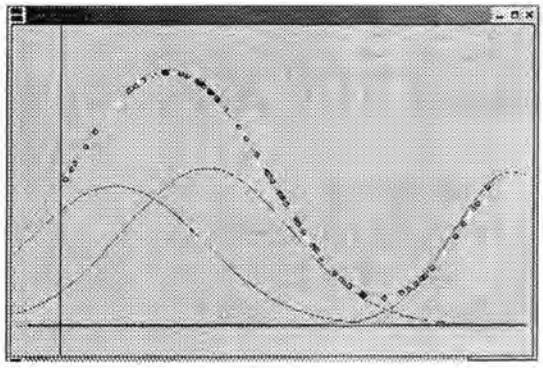


図 3: 入力ベクトルが 1 次元の場合

図 2 のウインドウで **Start Learning** ボタンを押すと次元数に応じた学習画面が表示される．

$\boldsymbol{x}$ が 1 次元の場合，図 3 のように，RBF ネットワークがデータに近似する様子を表示する．この RBF ネットワークを形成する各 RBF が表示されるために図 2 で入力したパラメータが妥当かどうか，データのどの部分で近似精度が低くなっているかなどを視認することができる．

$\boldsymbol{x}$ が 2 次元の場合，図 4 のように RBF ネットワークの出力は 3 次元空間における曲面となる．また学習途中や終了後に右側と下側のスクロールバーで図形を回転させることにより，好みの角度から視認することが可能である．任意の点を中心とした図形の回転は次のように行った．$\mathbf{x}-\mathbf{y}-\mathbf{z}$ 空間における点 $\boldsymbol{P}_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$ を任意の点 $\boldsymbol{R} = (r_x, r_y, r_z)^T$ を原点とする座標系の x' 軸まわりに α，y' 軸まわりに β だけ回転させたときの CRT 上の座標 $\boldsymbol{P}_1 = (x, y)^T$ は次のようになる．

$$x = (x_0 - r_x)\cos\beta + (z_0 - r_z)\sin\beta + r_x \quad (3)$$

$$y = (x_0 - r_x)\sin\alpha\sin\beta + (y_0 - r_y)\cos\alpha - (z_0 - r_z)\sin\alpha\cos\beta + r_y \quad (4)$$

結果の分析を行うときにも，RBF ネットワークの出力がどの程度データ点に近づいたか，どの部分で近似精度が低くなっているかを視認することができる．

$\boldsymbol{x}$ が 3 次元以上の場合，RBF ネットワークの出力は 4 次元以上の多次元空間での描画が必要となるのでグラフィックスでは表現できない．そこで，図 5 のように 2 乗誤差の和が減少する様子を表すことにした．縦軸は対数目盛とし，その目盛間隔及び上下限は自動調整される．これらの曲線が右下がりでなければ，RBF ネットワークがデータに近似していないと判断でき，各種のパラメータ値を再検討する必要がある．

このように，学習過程や結果をグラフィカルに表示することによってプログラミングやニューロファジィに関する専門的知識がなくても，RBF ネットワークによる非線形システムの同定が可能である．

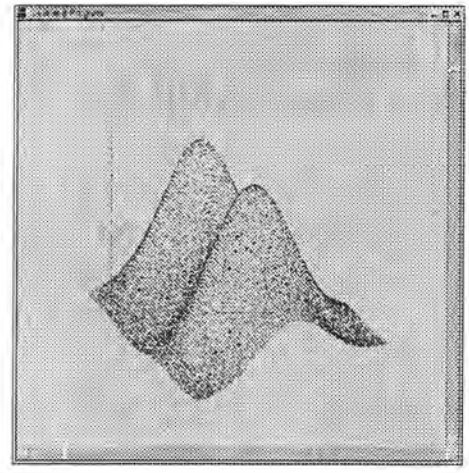


図 4: 入力ベクトルが 2 次元の場合

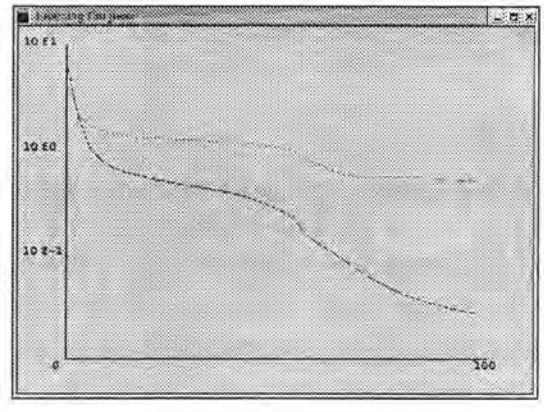


図 5: 入力ベクトルが 3 次元以上の場合

4. おわりに

本研究では，昨年の研究の成果である “RBF Shell” を拡張し，以下のような機能を追加した．まず，入力ベクトルが 2 次元の場合に RBF ネットワークの出力を 3D グラフィックスを用いて表示する．入力ベクトルが 3 次元以上の場合は，2 乗誤差の和が減少する様子が表示される．今後の課題としては，学習結果のより詳細な検討を可能とするような仕組みの追加が考えられる．

なお，RBF Shell は以下の URL よりダウンロード可能である．

http://www.i2s.hiro.kindai.ac.jp/

参考文献

[1] M. Brown and C. Harris: *Neurofuzzy Adaptive Modelling and Control*, Prentice Hall (1994)

問い合わせ先：大谷　崇

〒 739-2116 東広島市高屋うめの辺 1
近畿大学工学部情報システム工学科
Tel:0824-34-7000 Fax:0824-34-7011
e-Mail:hawk@computer.org

Particle Swarm Optimizationのダイナミクスの解析

Analysis of the Dynamics of Particle Swarm Optimization

岩崎 信弘　安田 恵一郎　井出 東
Nobuhiro Iwasaki , Keiichiro Yasuda and Azuma Ide
東京都立大学
Tokyo Metropolitan University

Abstract: The Particle Swarm Optimization (PSO) method is one of the most powerful methods for solving unconstrained and constrained global optimization problems. Little is, however, known about how the PSO method works or finds a globally optimal solution of a global optimization problem when the method is applied to global optimization problems. This paper deals with the analysis of the dynamics of PSO in order to obtain an understanding about how it searches a globally optimal solution and a strategy about how to tune its parameters. While a generalized reduced model of PSO is proposed in order to analyze the dynamics of PSO, the stability analysis is carried out on the basis of both the eigenvalue analysis and some numerical simulations on a typical global optimization problem.

1　はじめに

Particle Swarm Optimization (以下，PSO) は単純化された社会モデルのシミュレーションを通じて、1995 年にパデュー大学の R. Eberhart らにより開発されたメタヒューリスティクスの一つであり，最適化問題を解くための，有力な手法の一つとして知られている。これまでの数多くの数値実験の結果から，連続型多峰関数の大域的最適解を実用的な計算時間内に高い精度で求めることが可能なことが数値実験的に明らかにされてきた。

しかしながら，PSO がどのように大域的最適解を探索するのか，それぞれのパラメータに対する物理的解釈や調整の指針はあり得るのか，また，最適化手法としてのアルゴリズムの特徴や振る舞いはどのように評価できるのかなど，PSO の探索過程におけるダイナミクスに関する解析的な研究は十分に行われていないのが現状である。

PSO の探索過程のダイナミクスに関する解析的な研究としては,M. Clerc と J. Kennedy の論文 [1] がある。この論文では，オリジナルの PSO モデルから，ランダム要素を排除し，個々のエージェントや群れが共有する最良点情報を内分点に縮約し，さらに縮約された内分点を探索過程を通じて定数として扱うという簡略化が行われている。このような簡略化に伴い，オリジナルの PSO，すなわち多点探索手法の持つ最大の特徴であるエージェント間の相互作用が結果として考慮できないという欠点はあるものの，エージェントの基本的なダイナミクスの解析を始めて可能とした点では，十分意義の高い研究である。

本研究では，M. Clerc と J. Kennedy の研究成果 [1] を踏まえ，まず，同一の簡略モデルを用いた解析を，単なる安定性解析に留まることなく，軌道の周期性をはじめとする，より詳細な探索過程のダイナミクスの解析を試みると同時に，多点探索手法における探索の本質であるエージェント間の相互作用を陽に考慮可能な新たな解析モデルを提案する。

提案モデルでは，上述のモデル [1] においては定数として扱われていた最良点情報が線形時不変システムの入力として扱われ，この最良点情報のダイナミクスが個々のエージェントを駆動しているという，PSO に対する新たな解釈を与えている。さらに典型的な関数を用いた数値実験を通じて，探索過程における最良点情報のダイナミクスが，実は最適化すべき目的関数の形状を反映したものであり，関数形状を反映した最良点情報によって駆動される PSO の探索ダイナミクスは，まさに多点情報を活用した関数形状の自律的反映を実現していることを明らかにしている。

2　PSO の概要

本章では，PSO が開発された背景・基本的な概念，およびアルゴリズムの概要をまとめる。

2.1　背景

「Particle Swarm」は，位置や速度の概念を持つ探索点を表現した「Particle（微小粒子）」と，人工生命の研究における Swarm Intelligence の概念より「Swarm（群れ）」が選定されて作られた言葉である。このことからも分かるように，PSO の最大の特徴は複数の探索点から構成された群れによる探索であると言えよう。またそれらがお互いに情報を共有し，それに基づいて解空間を探索する。非常にシンプルなアルゴリズムで構成され，基本的な算術演算しか用いていないにもかかわらず，連続型の非線形な解空間を持つ最適化問題を高速に解くことができることが知られている。

2.2　PSO のアルゴリズム

各エージェント (探索点) は自身が過去に発見した最良解「$pbest$」へ向かうベクトル，群れ全体の最良解「$gbest$」へ向かうベクトル，および前回の移動ベクトル $\boldsymbol{v}^k$ の線形結合として新たな移動ベクトル $\boldsymbol{v}^{k+1}$ を生成し，次の位置 $\boldsymbol{x}^{k+1}$ に移動する。また PSO は元々２次元空間上で群れの動きを表現する過程から開発された手法であるが，これを多次元空間に拡張することもできる。$k+1$ 回目の移動でエージェント i が移動する際，n 次元空間における j 番目の直交座標軸に射影される移動ベクトル v_{ij}^{k+1} は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} v_{ij}^{k+1} &= w \cdot v_{ij}^{k} \\ &+ c_1 \cdot rand() \cdot (pbest_{ij} - x_{ij}^{k}) \\ &+ c_2 \cdot rand() \cdot (gbest_j - x_{ij}^{k}) \end{aligned} \tag{1}$$

ただし，$rand()$ は 0 から 1 までの一様乱数，w, c_1, c_2 はそれぞれの項に対する重み係数である。このとき探索点の移動は次式によって行われる。

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^{k} + v_{ij}^{k+1} \tag{2}$$

3　p 固定モデル

w, c_1, c_2 が各エージェントの振る舞いを決定付けるパラメータであり，これらの設定が不適切であるとき探索は失敗に終わる。探索の失敗する主なケースは以下の通りである。

(1) エージェントが制約領域の外へ発散する。

(2) エージェントがある点に収束して動かなくなる。
(3) エージェントが局所解から抜け出せず，それ以上の解の更新が困難になる。

これらの失敗を回避するために，パラメータの設定とエージェントの振る舞いとの関係，特に収束，発散の傾向を明らかにし，パラメータ設定の指針を得ることが必要である。よって以下の解析によりこれを明らかにする。PSO におけるエージェントの振る舞いは式 (1)，(2) によって決まるがこのままの形で解析を行うことは困難である。そこでランダム要素を排除し，*pbest*, *gbest* を一つに縮約した以下のモデルが提案されている。式 (1) において，

$$c_1 \cdot rand() = \phi_1 \tag{3}$$
$$c_2 \cdot rand() = \phi_2$$

とすれば，

$$v^{k+1} = \omega \cdot v^k + \phi_1 \cdot (pbest - x^k) + \phi_2 \cdot (gbest - x^k) \tag{4}$$

と表せる。さらに，右辺第 2 項，第 3 項の類似性に着目し，

$$p = \frac{\phi_1 \cdot pbest + \phi_2 \cdot gbest}{\phi_1 + \phi_2} \tag{5}$$

とおけば式 (4) は以下となる。

$$v^{k+1} = \omega \cdot v^k + (\phi_1 + \phi_2) \cdot (p - x^k) \tag{6}$$

$$\phi_1 + \phi_2 = \phi \tag{7}$$

$$v^{k+1} = \omega \cdot v^k + \phi \cdot (p - x^k) \tag{8}$$

この変形は *pbest*, *gbest* の代わりに，それらを $\phi_2 : \phi_1$ の比に内分する点 p を導入して簡略化を行ったものである。

更に，$p - x^k = y^k$ とおくと，式 (8)，(4) はさらに次のように変形できる。

$$v^{k+1} = w \cdot v^k + \phi \cdot y^k \tag{9}$$
$$y^{k+1} = -w \cdot v^k + (1 - \phi) \cdot y^k \tag{10}$$

このようにエージェントの位置 x の代わりに x と目標点 p の距離 y を導入することで収束，発散の解析が容易になる。何故なら，エージェントが目標点 p に収束するということは $v^k, y^k \to 0$ $(k \to \infty)$ となることであるからである。

3.1 安定性解析

$$\begin{bmatrix} v^{k+1} \\ y^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega & \phi \\ -\omega & 1-\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^k \\ y^k \end{bmatrix} \stackrel{\text{def}}{=} M \begin{bmatrix} v^k \\ y^k \end{bmatrix} \tag{11}$$

は行列 M の固有値 λ_1, λ_2 と M の対角化行列 Q を用いて，

$$\begin{bmatrix} v^k \\ y^k \end{bmatrix} = Q \begin{bmatrix} \lambda_1^k & 0 \\ 0 & \lambda_2^k \end{bmatrix} Q^{-1} \begin{bmatrix} v^0 \\ y^0 \end{bmatrix} \tag{12}$$

となる。これより，エージェントが目標点 p に漸近収束する条件は $|\lambda| < 1$ であることがわかり，式 (11) から

$$\lambda = \frac{\omega + 1 - \phi \pm \sqrt{(\omega + 1 - \phi)^2 - 4\omega}}{2} \tag{13}$$

と求まるので，以上を整理して次の結論を得る。

$$0 < \quad \phi \quad < 2\omega + 2 \tag{14}$$
$$0 \leq \quad w \quad < 1 \tag{15}$$

を満たすとき，エージェントは収束傾向となり，満たさないとき，発散傾向となる。特に

$$(1 - \sqrt{w})^2 < \phi < (1 + \sqrt{w})^2 \tag{16}$$

を満たすとき，$|\lambda| = \sqrt{w}$ となる。式 (12) より $|\lambda|$ の値が 1 より小さいほど，収束の速さは速くなることがわかるから，この条件を満たすパラメータ設定では，w によって収束・発散の傾向だけではなく，その速さまで設定することができる。

3.2 p 固定モデルの位置付け

この章で扱ったモデルとそれを元にした解析の意義をもう一度述べる。解析に用いた縮約モデルが実際の PSO と異なる点は

(a) ランダム要素が排除されている
(b) *pbest*, *gbest* がそれらの内分点 p に縮約されている
(c) p の変動が考慮されていない

ことである。(a) に関しては，次のように説明がつく。式 (3)，(7) より ϕ は $0 < \phi < c_1 + c_2$ の範囲に正規分布で現れるが平均的な振る舞いとしては期待値 $\phi = \frac{c_1 + c_2}{2}$ の振る舞いをすると考えられる。よって 1 回 1 回の動きにばらつきはあるものの，長期的視野で見れば解析の結果と一致すると思われる。(b) に関しては式 (5) のように代数的な変形を施しただけであるのでこのこと自体は全く問題ない。問題となるのは (c) である。1 つの p に縮約される *pbest* も *gbest* も，本来は探索の過程で値を更新していき，一定値であることはまずありえない。当然 p も一定ではない。p を固定値として扱った本章の解析から言えることは "収束条件を満たすパラメータ設定であれば，ある一定の目標値 p に向かってエージェントは収束していく" ということであり，p の変動に関しては述べることはできない。このことについて，次章で述べていく。

4 p 変動モデル

前章で扱ったモデルは p を一定値に固定したものであったが，本章では p の変動に注目したモデルを提案する。まず，p の変動に注目することの意義を述べる。PSO は多点探索の手法である。多点探索が単点探索と本質的に異なる点は，複数の探索点の間で情報を共有しながら探索を進めることである。もし情報の共有，すなわち探索点間の相互作用が全くなく各探索点が独立に振る舞うならば，多点で探索を行うことに意味はなく，それは単点探索の繰り返しにすぎない。具体的に PSO では，*gbest* として群のいずれかのエージェントの見つけた最良点をすべてのエージェントが共有することで相互作用を作り出している。つまり，PSO においては *gbest* 及び，それを含む p こそが集団の探索が効率的に行われるような作用を生み出しているのである。以上の理由から p の振る舞いの解析を行うことは重要であり，それを行うために以下のモデルを提案する。

4.1 p 変動モデルと安定性

式 (8) において固定値であった p を変数 p^k として式変形すると

$$\begin{bmatrix} v^{k+1} \\ x^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega & -\phi \\ \omega & 1-\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^k \\ x^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi \\ \phi \end{bmatrix} p^k \tag{17}$$

$$\stackrel{\text{def}}{=} \quad M' \quad \begin{bmatrix} v^k \\ x^k \end{bmatrix} + \quad N \quad p^k \tag{18}$$

このモデルは形の上で，現在の状態 $(v^k, x^k)'$ と入力 p^k によって次の状態 $(v^{k+1}, x^{k+1})'$ が定まる線形時不変システムと見ることができる。ここで時不変とは行列 M', N が時間的に変化しないことを意味する。式 (17) のように記述されるシステムにおいては次の性質がなりたつことが知られて

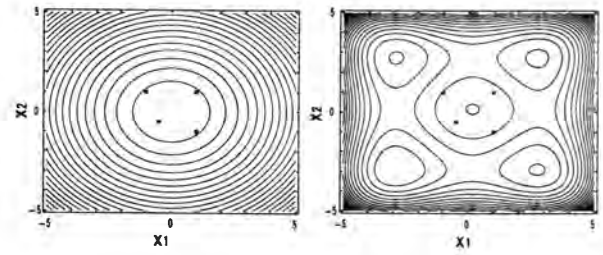


Fig. 1 単峰関数 f_1 と多峰関数 f_2 (等高線)

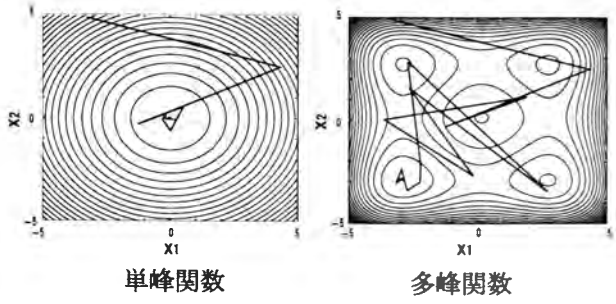


Fig. 2 ランダム探索における最良値の遷移

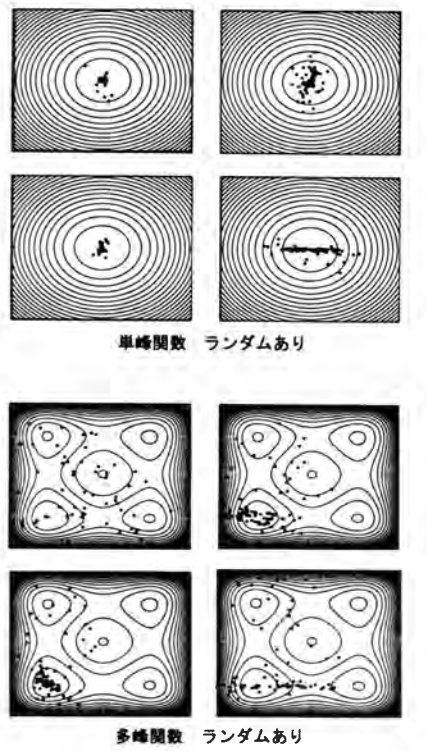


Fig. 3 単峰，多峰関数における探索領域 (ランダムあり)

いる。" 入力 $p^k = 0$ としたときシステムが安定であるならば，そのシステムは有界な入力 p^k に対して出力もまた有界となる。" 式 (17) において $p^k = 0$ としたときのシステムの安定条件は実は前章で行った解析結果と一致する。何故なら行列 M' の固有値は前章の行列 M の固有値と等しく，式 (13) で表されるからである。故にパラメータが式 (14), (15) の安定条件を満たし，かつ入力 p^k の変化が有界な範囲であるならば，エージェントの速度 v，位置 x ともに有界となり発散することはないということがわかった。制約領域の中でのみ p を更新することで，p の変化は有界に抑えることが可能である。p の変化を陽に扱った本章のモデルを通して，p を固定値とした前章のモデルでの解析で得た安定条件が，変動する p に対しても成り立つことが言えた。前章の結論と合わせて " 式 (14), (15) の安定条件を満たしていれば，エージェントは目標値 p が制約領域内で変動する間は，それに引き寄せられながら有界な範囲を動き回り，p が動かなくなると p に収束する " ということがわかった。

4.2 p^k の振る舞い

繰り返しになるが式 (17) において p^k は入力と見ることができる。しかも各エージェントは p^k に追従し，いずれ p^k に収束するのでエージェントの振る舞いを支配するパラメータとも考えることができる。しかしパラメータと言っても p^k は w, c_1, c_2 のように自由に調整することはできない。p^k は対象とする目的関数に依存して変化していくためコントロール不能であるが，その代わり関数の特徴を反映した振る舞いをすると思われる。例えば，単峰に近いシンプルな構造を持つ関数と，複雑な多峰構造を持つ関数では，p^k の変わっていく様子にかなりの違いが出るであろう。シンプルな構造の関数に比べて複雑な関数では，特に探索の初期において，p^k が広範囲に移動すると予想される。目標値 p^k が広範囲に移動するならば，それに追従するエージェントもまた広範囲を移動するので，多様な（大域的な）探索が行われる。逆にシンプルな構造の関数，及び探索の終盤においては p^k の移動が狭い範囲で行われるので，集中的な（局所的な）探索が行われると予想される。" 複雑な関数においては多様な探索を行い，シンプルな関数においては集中的な探索を行う " という理想的な最適化のバランスが PSO では内部的に，また自律的に実現されているのではないかというのが著者らの主張である。以上はあくまで経験に基づく予想であるが，このことを以下の数値実験によって検証する。

5 シミュレーション

ここまでの解析は，単に p^k に対してエージェントが収束するのかどうかについてを扱ってきたため，対象とする目的関数を必要としなかった。逆に言えば，どのような関数においても普遍的な内容であるといえる。次は具体的な関数における p^k の振る舞いをシミュレーションから見る。シンプルな単峰性の構造を持つ関数，及び複数の局所的最適解をもつ多峰性の関数の例として次の 2 つを挙げる。Fig.1 にこれらの関数の等高線を示す。

$$\begin{aligned} &\min && f_1 = x_1^2 + x_2^2 && (19)\\ &\text{subj.to.} && -5 \le x_1, x_2 \le 5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\min && f_2 = \sum_{i=1}^{2}(x_i^4 - 16x_i^2 + 5x) && (20)\\ &\text{subj.to.} && -5 \le x_1, x_2 \le 5 \end{aligned}$$

f_1 は中心に最適解のあるシンプルな形の単峰関数になっている。f_2 はマクロな視点でみると f_1 と類似した形になっているが、4 つの局所的な最適解が存在する。この中で大域的な最適解は左下の局所的な凸構造の中にある。(Fig.1 の中心付近の 4 つの点は最適解とは無関係。これはシミュレーション 2 で用いるため説明は後述する。)

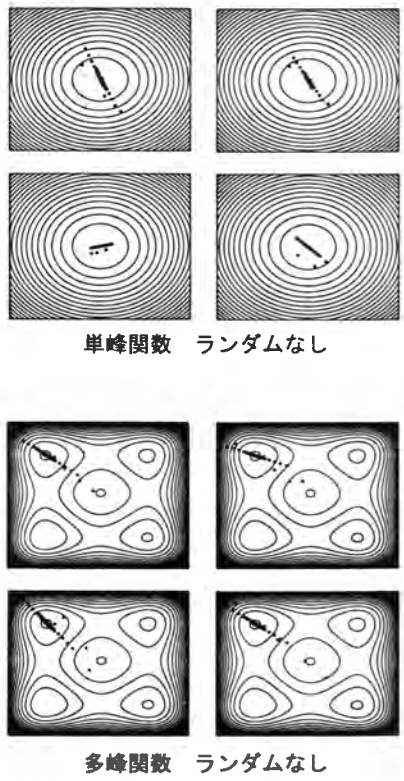


Fig. 4 単峰，多峰関数における探索領域 (ランダムなし)

5.1　シミュレーション 1
＜関数の形状と p の振る舞い＞

これらの関数を用いてまず，パラメータ p が関数の形状を反映して更新していくことを検証する。”①制約領域にランダムに 4 つの点をばらまき，②今までの最良点より値が改善したらその値を保持し，改善しなかったら何もしない，①’そしてまた次の 4 つの点をまく”この操作を 10000 回繰り返し，最良点の変遷を示したのが Fig.2 である。単峰，多峰関数で条件を等しくするため，発生させるランダムを等しくした。単峰関数にくらべて多峰関数では，最良点が広範囲に動き回っていることがわかる。ここで行ったのはランダム探索であるから，この図における違いは関数の形状のみから生じたことになる。すなわち，最良点がどのように変遷するかは主に関数の形状が支配するということになる。探索の過程は異なるものの，PSO における *gbest* 及び p も集団の中の最良点であるため，このように関数の形状に依存して変化していくであろう。

5.2　シミュレーション 2
＜関数の形状とエージェントの探索範囲＞

p が関数の形状に依存して変化していくならば，p を目標値として追従していくエージェントの振る舞いもまた関数の形状に支配されることを検証する。単峰，多峰関数に PSO を適用してエージェントが探索を行う範囲を調べた結果を Fig.3 に示す。横軸，縦軸はそれぞれ x_1 軸，x_2 軸を-5 から 5 の範囲で表示している。パラメータの設定，エージェントの初期位置，発生させるランダム等すべての条件を等しくし，適用する関数だけを変えて比較している。Fig.1 中の 4 つの点で示した箇所にエージェントを 5 つずつ初期位置として配置した。計 20 のエージェントのうちの 4 つを Fig.3 では挙げている。関数 f_2 は左下に大域的最適解を持つ構造であるため，最初からその付近にエージェントがあ

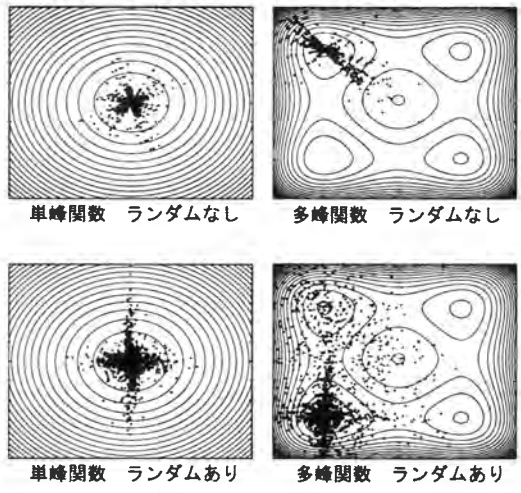


Fig. 5 全探索点による探索領域

ることを避けるためにこの配置を行った。Fig.3 より多峰関数では多様な探索が，単峰関数では集中的な探索が行われていることがわかる。Fig.4 は同じ条件で，エージェントの移動式中のランダム要素を排除した場合である。ランダム要素がない場合はどちらの方が多様か集中かとは言えないようである。ただし，Fig.3 と Fig.4 を比べて，ランダム要素があるほうが多様な探索になっている。更に，20 のエージェントすべてが探索した点を表示したのが Fig.5 である。

6　おわりに

本研究では，安定性解析に留まることなく，軌道の周期性をはじめとする，より詳細な探索過程のダイナミクスの解析を試みると同時に，多点探索手法における探索の本質であるエージェント間の相互作用を陽に考慮可能な新たな解析モデルを提案した。このモデルに基づき，最良点情報のダイナミクスが個々のエージェントを駆動しているという，PSO に対する新たな解釈を与え，さらに典型的な関数を用いた数値実験を通じて，探索過程における最良点情報のダイナミクスが，目的関数の形状を反映したものであり，最良点情報によって駆動される PSO の探索ダイナミクスは，まさに多点情報を活用した関数形状の自律的反映を実現していることを明らかにした。

参考文献

[1] Maurice Clerc and James Kennedy, "The Particle Swarm-Explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.6, No.1, pp.58-73 2002.

[2] 井出，安田：「Particle Swarm Optimization の探索効率改善に関する基礎的検討」，産業計測制御研究会予稿集，IIC-02-8 (2002)

[3] James Kennedy and Russell C. Eberhart : "Swarm Intelligence", Morgan Kaufmann Publishers (2001)

[4] K. Yasuda :"Evolutionary Computation and Metaheuristics", T.IEE Japan, Vol.122-C, No.3, pp.320-323 (2002)

連絡先:

〒 192-0397
東京都八王子市南大沢 1-1
東京都立大学大学院　工学研究科　電気工学専攻
岩崎　信弘
電話:　0426-77-1111
E-Mail:　iwasaki-nobuhiro@c.metro-u.ac.jp

Particle Swarm Optimizationの探索性能向上に関する検討

A study of Improvement on the ability of Particle Swarm Optimization

藤田 剛志
Takeshi Fujita
大阪府立大学
Osaka Prefecture University

石亀 篤司
Atushi Ishigame
大阪府立大学
Osaka Prefecture University

平田 直人
Naoto Hirata
大阪府立大学
Osaka Prefecture University

This article presents a study of Improvement on the ability of Particle Swarm Optimization (PSO) to solve the optimum problems on the power system. First PSO's parameters are considered with two test functions as objective functions. At this time it is very useful to compare the parameter with the visual tool. And we apply the PSO to Power Flow Calculation of the West 10 generator systems.

1．まえがき

近年、群れを構成し、情報を共有して解空間を探索するアルゴリズムである Particle Swarm Optimization（以下PSO）が高次元非線形問題に有効であるとして注目されている。電力系統は大規模複雑なシステムであり、起動停止計画や電源ベストミックス問題などの多くの最適化問題がある。そのため、従来のような数学的手法では求解が困難となっている。本研究は電力システム最適化問題解決のため、PSO の能力向上について検討を行ったものである。

2．Particle Swarm optimization (PSO)

PSO は、近年開発された最適化手法の一つであり、主に群れ理論と進化型情報処理理論の 2 つの理論を基に構成されている。PSO において、各エージェントは位置と速度の情報を持つ。最適化したい目的関数の最良値を目指して速度を修正し、位置を更新していくことで最適解に収束する[1]。各エージェントの速度、位置は次式により更新される。

$$v_i^{k+1} = w \times v_i^k + c_1 \times rand \times (pbest_i^k - x_i^k) + c_2 \times rand \times (gbest^k - x_i^k) \quad (1)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v \quad (2)$$

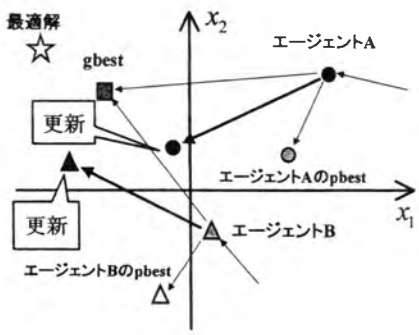


図1 PSO の概念図

ただし x、v はエージェントの位置と速度、w は速度に対する重みで、$rand$ は０～１の一様乱数、C_1, C_2 は定数、$pbest$ は各エージェントが探索したそれまでの最良値をとる位置、$gbest$ は群れ全体での最良値をとる位置を表している。

また、上記は PSO の大域型（global version）であるが、その他に局所型（local version）もある。この場合、群れ全体での最良解 $gbest$ がプログラム上近いエージェント（i 番目のエージェントの場合、前後の i-1･･･番目,i+1･･･番目のエージェント）の中での最良解 $lbest$ となり、各エージェントが共有する。

3．Hybrid Particle Swarm Optimization (HPSO)

HPSO の概念は、基本的に PSO と同じで、アルゴリズムに選択の概念を取り入れたものである。選択とは、評価の悪いエージェントの位置と速度の情報を、評価の良いエージェントの情報に置き換える操作である[2]。この際、各エージェントのこれまで探索してきた最も評価の良い探索点（$pbest$）の情報は残す。PSO もそれまでの探索で有効であった探索点（$pbest$, $gbest$）を利用しているが、現在の位置に対する依存が強く、それ以降の探索点が限定されてしまう。これに対し、HPSO は、現在の探索点に対する依存が徐々に薄らいでいき、最適解近傍を効果的に探索することができる。

4．各種パラメータの検討

PSO および HPSO におけるパラメータである C_1, C_2 と $rand$ 項、および v の最大値の制御についての検討を行った。評価関数には、潮流多根問題などの多機電力系統への適用を考慮し最小解を 18 個持つ 18 解他峰性関数と、2^nminima 関数を用いた。それぞれの関数を以下に示す。

・18 解多峰性関数 ($-10<x_1,x_2<10$)

$$f(x) = \left\{ \sum_{i=1}^{5} i \cos\left[(i+1)x_1 + i\right] \right\} \times \left\{ \sum_{i=1}^{5} i \cos\left[(i+1)x_2 + i\right] \right\} \quad (3)$$

・2^nminima 関数

$$f(x)=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}(x_i^4-16x_i^2+5x_i) \qquad (4)$$

18 解多峰性関数において、PSO(gbest), HPSO は共有情報がただ 1 つであるため、収束が早いという特性を考慮しパラメータを設定した結果、探索性能を大幅に向上させることができた。また、18 解多峰性関数はそれぞれの解が近接しているため、PSO(lbest)には 18 個全ての解を探索するのが難しい。そこで、探索済みの解に再び収束しないように、回避のためのアルゴリズムを考案した。2^nminima 関数は n 次元の関数であり、次元が大きくなるにつれて、探索回数が必要となる。各手法の特性を考慮しパラメータを設定した結果 HPSO は最大で 30 次元まで、PSO(gbest)は最大で 50 次元まで、PSO(lbest) は最大で 70 次元まで導出可能であった。ただし、エージェント数は 20 とし、収束性を高めるため v の最大値は探索回数に反比例して小さくした。また、C_1, C_2の最適値は評価関数、次元等により変化する。

従来は、出力された値を基にアルゴリズムの検討をおこなってきたが、本稿では、エージェントの行動パターンを把握するための視覚的ツールを作成した。図 2 に 18 解多峰性関数の解分布を示し、図 3 に PSO(gbest)での探索過程を示す。

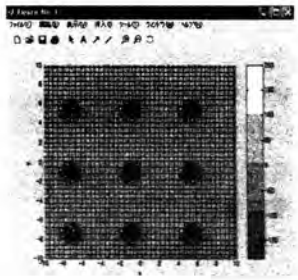


図2 18 解多峰性関数

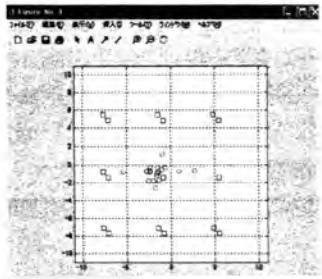


図3 PSO での探索

5．電力潮流計算

電力潮流計算は電力の計画、運用の実務において使用される電力系統解析手法の 1 つであり、n 機母線系統において次式を満たす電圧解を求めることに帰着する。

$$P_i=\sum_{j=1}^{n}\left\{e_i(G_{ij}e_j-B_{ij}f_j)+f_i(G_{ij}f_j+B_{ij}e_j)\right\} \qquad (5)$$

$$Q_i=\sum_{i=1}^{n}\left\{e_i(-B_{ij}e_j-G_{ij}f_j)+f_i(-B_{ij}f_j+G_{ij}e_j)\right\} \qquad (6)$$

$$V_i^2=(e_i^2+f_i^2) \qquad (7)$$

ただし、i=1,2,…,n、P_iは i 番母線負荷の消費有効電力、Q_iは i 番母線負荷の消費無効電力、$V_i=e_i+f_i$は i 番母線の電圧ベクトル、G_{ij},B_{ij}は母線間の線路アドミッタンスである。

PSO を適用するにあたって、目的関数としてエネルギー最適化の考えを適用し、(5), (6), (7) 式とそれぞれの目標値である P_S,Q_S,V_S^2 との差の絶対値を i=1～n まで加えたものを用いる。この目的関数が最小値、つまり 0 になるように最小解を探索することにより、方程式の解を求める。目的関数を定式化すると次式のようになる[3]。

$$f=\sum_{i=1}^{n}\left|V_s^2-(e_i^2+f_i^2)\right| \qquad (8)$$
$$+\sum_{i=1}^{n}\left|P_s-\sum_{j=1}^{n}\left\{e_i(G_{ij}e_j-B_{ij}f_j)+f_i(G_{ij}f_j+B_{ij}e_j)\right\}\right|$$
$$+\sum_{i=1}^{n}\left|Q_s-\sum_{j=1}^{n}\left\{e_i(-B_{ij}e_j-G_{ij}f_j)+f_i(-B_{ij}f_j+G_{ij}e_j)\right\}\right|$$

6．シミュレーション

数値シミュレーションには、WEST10 機モデル系統（図 4 参照）を用い、大規模系統の潮流計算の解法を試みた。その結果 PSO により効率よく潮流解を得ることができた。

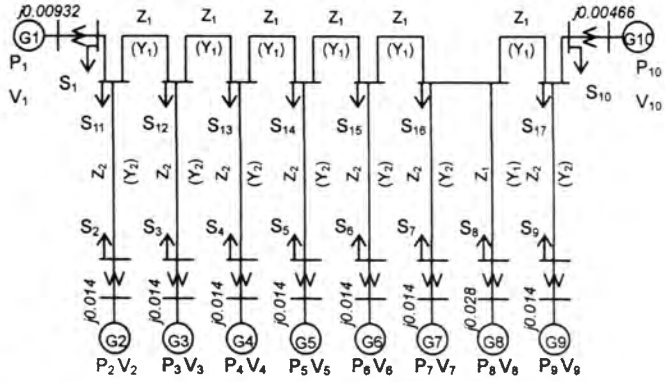


図4 10 機系統モデル

7．あとがき

本研究では、gbest モデル, lbest モデル, および HPSO の特徴を調べ、数値シミュレーションによる各種パラメータの探索性能へ与える影響の検討から、パラメータ設定に対する知見を得た。また、その知見を電力最適化問題の 1 つである潮流計算問題に適用し良好な結果を得た。

今後の課題としては、各モデルの特徴に合ったパラメータの設定法に加え、アルゴリズムの改良,実システムを念頭に置いたより大規模な多機系統でのシミュレーションや他の最適化問題への応用などが考えられる。

参考文献

[1] R.Eberhart, P.Simpson, R.Dobbins : Computational Intelligence PC Tools, Academic Press Professional (1996).

[2] 仲 成規、藤根 栄、元治 崇、由良 俊樹、福山 良和、高山 信一：実系統機器の特性を考慮した配電系統状態推定方式の検討,電学論 B,Vol.120-B,No.12,1566-1571(2000).

[3] 榎本 格士、吉田 健作、石亀 篤司：Particle Swarm Optimization による潮流計算法，平成 12 年度電気学会電力・エネルギー部門大会論文集,No.190,537-538(2000).

〒599-8531 大阪府堺市学園町 1-1
大阪府立大学 大学院 工学研究科
電気・情報系専攻 電気電子システム工学分野
藤田 剛志
Tell：072-254-9250
Fax：072-254-9907
Email：t.fijita@ps.ess.osakafu-u.ac.jp

領域縮小と可変近傍を用いたメタヒューリスティクス

A Metaheuristics Using Variable Neighborhood and Region Reduction

安田 恵一郎　金澤 貴彦
Keiichiro Yasuda and Takahiko Kanazawa
東京都立大学
Tokyo Metropolitan University

Abstract: Under the assumption of $\mathcal{P} \neq \mathcal{NP}$, it is proved that it is hard to obtain the exact optimal solution within a practical computation time for many large-scale combinatorial optimization problems. This study thus proposes a heuristic approximation optimization method using variable-neighborhood for large-scale combinatorial optimization problems. In the case of general search method, extending neighborhood size causes the increase in the calculation amount. But, by using the concept "Proximate Optimality Principle", empirically concludes in combinatorial optimization problems, dividing solution to several regions and controlling calculation amount are possible. Besides, efficient search was realized by changing the number of partitions and the size of partial solutions adaptively.

1　はじめに

工学において対象とする多くの組合せ最適化問題では，近接最適性の原理 (Proximate Optimality Principle:以下，POP と略記) が成立することが経験的に知られている。POP は「優れた解同士は何らかの似通った構造を持っている」という漠然とした仮定である。しかしながら，メタヒューリスティクスの多くは基本的に POP の成立を前提とした手法であるため，この仮定の成立の有無がメタヒューリスティクスと組合せ最適化問題との関連において重要な役割を果たす。

本研究では大規模な組合せ最適化問題を対象とした，可変近傍によるメタヒューリスティクスを提案する。通常の探索方法の場合には近傍の拡大は計算量の増大に直結するが，解を複数の部分解に分割することにより計算量の増大を低いレベルに抑えることができる。これを上に述べた POP を利用して実現し，さらに解の分割数および部分解のサイズを探索状況に応じて適応的に変化させることにより，計算量の低減と探索の効率化を同時に実現した。

2　組合せ最適化問題の定式化および諸定義

一般に，組合せ最適化問題は以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} &\min(\text{or } \max) \quad f(x) \\ &\text{subject to} \quad x \in \mathcal{F} \end{aligned}$$

ここで $f(x)$ は目的関数であり，$\mathcal{F}$ は実行可能領域，x は実行可能解である。また，台集合 $\mathcal{U}$ を，$\mathcal{F} \subseteq 2^{\mathcal{U}}$ を満たす最小の集合と定義する。台集合とは $\mathcal{F}$ 内の解 x を構成する要素の集合であると捉えることができる。以下，本論文では台集合の要素 $u \in \mathcal{U}$ を部品と呼ぶ。

次に，近傍 $\mathcal{N}$ を以下の写像として定義する。

$$\mathcal{N} : \mathcal{F} \to 2^{\mathcal{F}}$$

有効なメタヒューリスティクスを構築する場合には近傍 $\mathcal{N}(x)$ に含まれる要素は何らかの意味で解 x から近い，似通った構造を持つことが望ましい。実用的には，近傍 $\mathcal{N}(x)$ は x に摂動を加えた結果生成される解の集合として定義されることが多い。

Local Search を含め，多くのメタヒューリスティクスは与えられた初期点 x^0 から探索を開始し，移動戦略により近傍 $\mathcal{N}(x^k)$ の中から選択された解 x^{k+1} への移動を繰り返すという基本構造を持つ。なお，ここで移動戦略とは近傍から解を選択する下位のアルゴリズムを意味する。このメタヒューリスティクスの基本構造から分かるように，解の構造，近傍の定義，そして移動戦略はメタヒューリスティクスの振る舞いを決定付ける要因として非常に重要度が高い。

3　Proximate Optimality Principle[3]

多くの組合せ最適化問題には POP が成立していることが経験的に知られていることを既に述べた。ここでは，本研究で用いる $\mathcal{NP}$ 困難問題であるナップサック問題において POP が成立していることを数値実験的に検証する。

POP がナップサック問題において成立しているならば，優れた解同士では多くの部品が共有されているものと予想される。そこで，多数の優れた解の間に存在する類似度の傾向を調べるために，63 要素のある問題例に対して初期点をランダムに設定して後述する領域分割による探索を行い，探索中に得られた優れた解を 1000 点保持しておく。こうして構成した解集合の全ての 2-部分集合について，部分集合に含まれる解が共有している部品の数を調べることにより類似度を算出した。その結果得られた優れた解集合における解の類似度の分布，そして理論的に算出された平均的な解集合における解の類似度の分布を図 1 に示す。

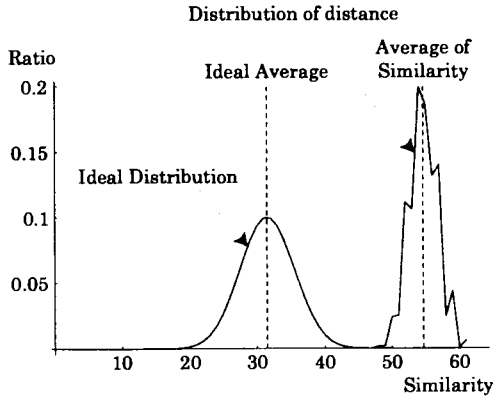


Fig. 1 解の類似度の分布

図 1 の結果から，優れた解集合の方が平均的解集合と比較して類似度が高い傾向にある，すなわち平均的な解同士が共有している部品に対して，局所的最適解同士が共有している部品が多い傾向にあることが分かる。このことは，局所的最適解同士が平均的な解同士と比較して有意な何らかの似通った構造を持つ，すなわち POP が成立していることを示唆している。

4 アルゴリズムの改善

4.1 解の分割による計算量の低減

POP の概念をより拡張すると,「優れた解同士は優れた部分構造を共有する」と捉えることができる。これは，優れた部分解の合成によって優れた解が生成される可能性を示唆している。すなわち，POP の成立する問題については，解の部分ごとに改善を行う手法が妥当性を持つと考えられる。

ここでは，計算量低減の手法として，解の分割による近傍サイズの低減手法について述べる。

移動可能な近傍内を全探索し，その中で最も優れた解へ移動する Best 改善による移動戦略を持つ最適化手法の計算量は，近傍サイズとイテレーションの積に比例する。よって，近傍のサイズを縮小することにより効果的に計算量を低減することが可能である。

問題の規模を N として，この問題に対して解に含まれる部品を同時に k 個入れ替える操作をする場合，この操作によって生成される近傍サイズは $\binom{N}{k} \simeq N^k/k!$ となる。これに対して，解をサイズ n 個の部分解に分割し個別に Best 改善を行うと，近傍サイズは $n\binom{N/n}{k} \simeq N^k/(n^{k-1}k!)$ となり，分割前と比較して近傍サイズが約 $1/n^{k-1}$ 倍に低減される。この式より，計算量低減の相対的効果が分割数 n，操作選択数 k の増加に伴いより大きくなることが分かる。

4.2 POP に基づく適応的な選択圧の導入

3 章で，優れた解同士が似通った構造を持つ傾向が強いことをナップサック問題について示した。このことから，大域的最適解も他の優れた解と多くの部品を共有していることが容易に推測できる。そしてこの類似性を利用することにより，優れた解を効率的に探索できる可能性が高い。これらのことをまとめると，以下のことが言える。

(1) 優れた解集合に共通して含まれる頻度の高い部分構造は，大域的最適解にも含まれる可能性が高い

(2) 優れた解集合に共通して含まれる頻度の低い部分構造は，大域的最適解にも含まれる可能性が低い

本論文ではこれらの可能性を考慮し，探索中の解が大域的最適解と一致していると予想される部品を入れ替える確率をより低く，逆に今後探索を要すると考えられる部分解については入れ替える確率をより高くし，効果的に部分解を分割する手法を導入する。

まず部品ごとに均等な確率を与えた探索を行い，探索中に得られた優れた解をリストに一定数保持し，各部品ごとのリスト中の解に含まれる頻度を求める。次に，リストに含まれる頻度の低い部品および頻度の高い部品についてはほぼ確定したものと見なして確率 p を低く設定し，部分解に含まれる可能性を下げる。逆にリストに含まれる頻度が 0.5 付近の部品についてはより重点的に探索する必要があると考えられるため，確率 p を高く設定する。その上で，各部品についての確率の平均値が目標確率 p_o に一致するように調整する。

このように部品ごとに確率を変えることで，全部品に対して均等な確率を用いる場合と比べ，より詳しく探索すべき部分を重点的に調べるよう探索を方向付けることができる。

4.3 可変近傍の導入

目標確率 p_o を探索が進むにつれて引き下げることにより解の可変部が徐々に減って行き，アニーリング的な解の収束が期待できる。また，これに伴って部分解の縮小化が促進されるため，計算量がさらに低減できる。

探索の初期段階では狭い近傍による探索でも解の改善が容易であるため，比較的大きな部分解へ分割して解の大域的な構造を決定し，狭い近傍による改善が困難となった時点で近傍を拡張し，解の詳細部分を決定する。近傍の拡張は通常計算量の増大を引き起こすが，探索する部分解のサイズを小さくとることで計算量の増大を低いレベルに抑えることが可能である。また，小さな部分解の探索のみでは大域的な視点に立った探索は困難と考えられるが，それまでの探索によって解の基本的な構造が決定されているために，サイズの小さな部分解のみの探索であっても十分に近傍拡張による探索効率向上の効果が期待できる。

5 数値実験による検証

提案手法の探索性能を検証するため，局所探索法，各部品に対して均等な確率を用いた単純分割探索法，優れた解の情報を利用し部品ごとに確率を変えた適応的分割探索法，そして探索の進行に伴い近傍を拡張する可変近傍探索法をナップサック問題に対して適用した。数値実験の問題として用いたのはランダムに生成した 63 アイテムのナップサック問題で，最適解は 2214 である。

Table. 1 計算結果

	解の平均評価値	平均計算量
局所探索法	2207.28 (0.30%)	589216.52
単純分割探索法	2209.96 (0.18%)	261006.20
適応的分割探索法	2211.97 (0.09%)	253217.98
可変近傍探索法	2213.54 (0.02%)	266808.77

表 1 より，単純分割探索法は単純な局所探索法と比較して半分以下の計算量でより優れた探索が実現できていることが分かる。これは部分解への分割により近傍サイズが縮小できた効果によるものであると考えられる。また，適応的分割探索法は単純分割探索法と同様の設定のままで探索能力が向上している。さらに，可変近傍探索法は計算量を他の手法と同程度とするためにループ数をより少なく設定しているにもかかわらず，探索能力がさらに向上していることが確認できる。

6 おわりに

本研究の成果をまとめると，以下の通りとなる。

(1) 大規模な組合せ最適化問題に対して，問題が持つ特徴である POP を反映させた解の分割による計算量低減手法を導入した。

(2) その上で，探索が進むにつれて近傍を拡張し，より詳しく探索を行うためのアルゴリズムを提案した。

(3) 提案したアルゴリズムを $\mathcal{NP}$ 困難問題のひとつであるナップサック問題に適用し，その性能を検証した。

参考文献

[1] Sipser :「計算理論の基礎」共立出版 (2000)

[2] 室田，他 :「離散構造とアルゴリズム IV」，近代科学社 (1995)

[3] 久保，宮本 :「メタ解法の新しいフレームワーク」，電気学会論文誌 C 分冊, Vol.121-C, No. 6 (2001)

連絡先:

〒 192-0397
東京都八王子市南大沢 1-1
東京都立大学大学院　工学研究科　電気工学専攻
安田　恵一郎
電話:　0426-77-1111
E-Mail:　yasuda@eei.metro-u.ac.jp

0-1計画問題に対するタブー探索法に基づく発見的解法

Heuristics based on tabu search for 0-1 programming problems

加藤 浩介 Kosuke Kato 広島大学 Hiroshima University
坂和 正敏 Masatoshi Sakawa 広島大学 Hiroshima University
大林 和寛 Kazuhiro Ohbayashi 広島大学 Hiroshima University

Abstract Actual decision making situations are often formulated as 0-1 programming problems involving many decision variables and constraints. For such a large-scale 0-1 programming problem, it is difficult to find a strict optimal solution because of various restrictions. In this paper, focusing on general 0-1 programming problems, we propose a new heuristic solution method based on tabu search as an extension of tabu search proposed for multidimensional 0-1 knapsack problems by Hanafi et al.

1. はじめに

正と負の係数を含む一般の0-1計画問題は，プロジェクト選択問題において使用経費に下限がある場合などに見受けられる．しかし，現実の問題はしばしば多くの変数と制約式を含む規模の大きな問題となるため，組合せ論的爆発により厳密解を求めることが困難となり，効率的な近似解法が必要となる．

近年，Glover らが中心となって研究が進められてきたタブー探索法は，さまざまな最適化問題への適用における良好な結果が報告されている．特に，多次元0-1ナップサック問題に対しては，Hanafi ら [1] により戦略的振動と代理制約を用いた効率的なタブー探索法が提案されている．

本稿では，提案タブー探索法のアルゴリズムの詳細を述べるとともに，様々な規模の数値例に対する適用と他手法との比較により，提案手法の有用性を検証する．

2. 一般0-1計画問題

一般0-1計画問題は次のように定式化される．

$$\left.\begin{array}{ll} \text{minimize} & \boldsymbol{c}\boldsymbol{x} \\ \text{subject to} & A\boldsymbol{x} \leqq \boldsymbol{b} \\ & \boldsymbol{x} \in \{0,1\}^n \end{array}\right\} \quad (1)$$

ここで，$\boldsymbol{x}$ は n 次元0-1決定変数列ベクトル，$\boldsymbol{c}$ は n 次元係数行ベクトル，A は $m \times n$ 係数行列，$\boldsymbol{b}$ は m 次元定数列ベクトルである．多次元0-1ナップサック問題では，$\boldsymbol{c} \leqq \boldsymbol{0}$，$A \geqq O$，$\boldsymbol{b} \geqq \boldsymbol{0}$ と仮定されるが，一般0-1計画問題では，$\boldsymbol{c}$，A，$\boldsymbol{b}$ の各要素は任意の実数である．

3. 一般0-1計画問題に対するタブー探索法

3.1. 一般0-1計画問題における解の改善

多次元0-1ナップサック問題では，係数の符号に制約のため，x_j の値を0から1に変えると，必ず目的関数値が改善される一方で，実行不可能領域に近づく．(解の実行可能性が減り，実行不可能性が増える．) このような単調性から最適解は制約領域の境界付近にあることが分かり，この部分は有望領域と呼ばれていた [1]．しかし，一般0-1計画問題ではこのような単調性は成り立たず，有望領域も制約領域の境界とは限らない．そのため，探索の方向の決定の判断に目的関数値だけでなく制約の充足度も利用するために，次のような制約式の超過分の総和を表す $\delta(\boldsymbol{x})$ と余裕分の総和を表す $\epsilon(\boldsymbol{x})$ を導入する．

$$\begin{cases} \delta(\boldsymbol{x}) = \displaystyle\sum_{i \in I^+} (\boldsymbol{a}_i \boldsymbol{x} - b_i) \\ \epsilon(\boldsymbol{x}) = \displaystyle\sum_{i \in I^-} (b_i - \boldsymbol{a}_i \boldsymbol{x}) \end{cases}$$

ここで，$\boldsymbol{a}_i$ は A の第 i 行ベクトルを表す．また，I^+ は $\boldsymbol{a}_i \boldsymbol{x} \leq b_i$ を満たさない制約式の集合を表し，I^- は制約式の中で，$\boldsymbol{a}_i \boldsymbol{x} \leq b_i$ を満たす制約式の集合を表す．

3.2. 振動戦略に基づく提案タブー探索法

探索では，複数の初期解を用い，1つの初期解につき決められた回数だけ手順1から手順5を繰り返す．この繰り返しの回数をiterationで表す．各初期解に対して，手順0が一度だけ実行され，その後，手順1から手順5までがiterationだけ繰り返される．

手順 0.

初期解 $\boldsymbol{x}$ をランダムに発生させ，実行可能ならば，手順4へ行く．実行不可能ならば，手順1へ行く．

手順 1.TS_PROJECT

目的:実行不可能領域から有望領域へ解を移動

$\delta(\boldsymbol{x})$ が0でない間 (解が実行不可能である間)，値の変化により $\delta(\boldsymbol{x})$ が減少する変数の中で，タブー（変更が禁止されている）でなく目的関数値が最良となる変数を選択する．もしも，$\delta(\boldsymbol{x})$ を減らす変数がないときは特別にランダムに1つの変数を変更し，$\delta(\boldsymbol{x})$ を改悪して，探索を進める．$\delta(\boldsymbol{x}) = 0$ となり実行可能領域に達し，より目的関数値を改善する変数がなくなれば終

了し，手順2へ行く．

手順 2.COMPLEMENT

目的:有望領域で $\boldsymbol{x}$ の近傍を集中探索

現在の解 $\boldsymbol{x}$ に対し，$\boldsymbol{x}' := \boldsymbol{x}$，$\boldsymbol{x}'' := \boldsymbol{x}'$ として，$\boldsymbol{x}''$ に関してランダムに1個から4個までの変数を変更する．変更後の $\boldsymbol{x}''$ が実行可能 ($\delta(\boldsymbol{x}'') = 0$) であれば手順4を行い，実行不可能 ($\delta(\boldsymbol{x}'') > 0$) であれば手順1を行う．得られた解 $\boldsymbol{x}''$ が $\boldsymbol{cx}'' < \boldsymbol{cx}$ を満たせば $\boldsymbol{x} := \boldsymbol{x}''$ とする．これを任意の回数繰り返して終了すれば，手順3もしくは手順5へ行く．この繰り返しの回数を complement_number とする．

手順 3.TS_DROP

目的:有望領域から実行可能領域内部へ解を移動

値を変更しても $\boldsymbol{x}$ が実行可能となる変数の中で，タブーでなく，最も制約式の余裕分 $\epsilon(\boldsymbol{x})$ が大きくなる変数を選択し，変更する．それを規定回数続けるか，もしくは $\epsilon(\boldsymbol{x})$ を改善する変数がなくなれば終了し，手順4へ行く．

手順 4.TS_ADD

目的:実行可能領域内部から有望領域へ解を移動

$\delta(\boldsymbol{x})$ が0である間（すなわち実行可能である間），値を変更すると目的関数値が改善される変数（$c_j < 0$ かつ $x_j = 0$）または，($c_j \geq 0$ かつ $x_j = 1$) の中で，タブーでなく，変更後も $\boldsymbol{x}$ が実行可能な変数のうち，対応する c_j の絶対値が最大である変数を選択する．そのような変数がなくなれば，手順2へ．

手順 5.TS_INFEASIBLE-ADD

目的:有望領域から実行不可能領域へ解を移動

値を変更すると目的関数値が改善される変数（$c_j < 0$ かつ $x_j = 0$）または，($c_j \geq 0$ かつ $x_j = 1$) の中で，タブーでなく対応する c_j の絶対値が最大である変数を選択する．それを規定回数繰り返す．もしくは，そのような変数がなくなれば終了し，手順1へ行く．

3.3. 探索効率改善のための工夫

問題の規模が大きくなるほど探索領域が広くなり，解の探索にかかる時間が長くなる．そこで，ある程度以上（5つ）の初期解からの探索で，探索終了時点での最良の $\boldsymbol{x}$ をすべて保存しておき，x_j の値が常に同じ値であった変数については，次の初期解からの探索においては値を固定し，残りの変数のみの解領域で集中的に探索を行うことにより探索効率の改善を図る．

4. 数値実験

100〜500変数の一般0-1計画問題を用いた数値実験を行い，その結果を表1〜4に示している．3.2節で述べた提案タブー探索法 (TS) はランダムな5つの初期解から，complement_number=50 で探索を行っている．3.3節の工夫を取り入れた提案タブー探索法 (fixTS) も，TSと同じ初期解数と complement_number で探索を行っている．それぞれの iteration は表に加えている．比較のために，分枝限定法 (LP_SOLVE) と遺伝的アルゴリズムによる結果も示している．GAは，100変数と150変数の問題は最大世代1000，200変数と500変数の問題は最大世代2000で探索した．

表 1: 100 変数 30 制約

解法	Best	Time (sec)
TS(iteration5)	**−9314**	8.90
fixTS(iteration3)	**−9314**	5.86
GA	−9058	152.23
LP_SOLVE	−5846(暫定解)	14400

表 2: 150 変数 40 制約

解法	Best	Time (sec)
TS(iteration5)	**−14527**	28.29
fixTS(iteration3)	**−14527**	16.53
GA	−12443	735.56
LP_SOLVE	−2995(暫定解)	65000

表 3: 200 変数 50 制約

解法	Best	Time (sec)
TS(iteration5)	**−21409**	34.08
fixTS(iteration3)	**−21531**	27.10
GA	−20696	3629.75

表 4: 500 変数 50 制約

解法	Best	Time (sec)
TS(iteration7)	**−55258**	174.30
fixTS(iteration4)	**−55536**	123.08
GA	−46782	14594.81

5. おわりに

本稿では，Hanafi の多次元0-1ナップサック問題に対するタブー探索法を一般0-1計画問題へ適用した．数値実験より，提案したタブー探索法の有効性を検証した．

参考文献

[1] S. Hanafi and A. Freville: An efficient tabu search approach for the 0-1 multidimensional knapsack problem, European Journal of Operational Research, Vol. 106, pp. 659–675 (1998)

問い合わせ先

〒 739-8527
東広島市鏡山 1-4-1
広島大学大学院工学研究科
加藤 浩介
TEL: 0824-24-7693, FAX: 0824-22-7195
E-mail: *kato@msl.sys.hiroshima-u.ac.jp*

自動DJ演奏のための遺伝的プログラミングによる楽曲ミックスの最適化

Optimization of Mixing Audio Input by Genetic Programming for Automatic DJ Performance

藤尾　豪　　椎塚久雄
Tsuyoshi FUJIO　　Hisao SHIIZUKA
工学院大学大学院　工学研究科　情報学専攻
Infomatics, Graduate School of Kogakuin University

Abstract: An automatic method of mixing songs like DJs is proposed, where "mix" means to join some songs in optional timing. It is shown that everyone can enjoy mixing songs easily, because any difficulties of DJ's techniques are unnecessary with this system. In addition, the songs that are created using this system are user's original works, because this system is designed with a consideration of human *KANSEI*(sensibility).
Keyword: DJ, Genetic Programming(GP), Interactive Evolutionary Computation(IEC), Original songs, *KANSEI*

1. はじめに

現在，クラブミュージックシーンにおいてDJは欠かせない存在である．また最近ではDJを必要とするジャンル(Hip Hop, House, Jazz, Rhythm&Blues, Techno)がヒットチャートを賑わせている．

しかし現状のDJに関するソフトウェアは使いにくいものばかりである．

本研究の目的は，従来とは全く異なるアプローチでDJが行うような楽曲ミックスを，感性を考慮しつつ全自動で行うシステムを製作することである．

本手法は3つのステップで構成される．①曲をミックスするタイミングのガイド役を果たすビート(拍)位置を検出する．②抽出されたビート位置の中から，遺伝的プログラミング(Genetic Programming=GP)を用いてミックスに適した箇所のみを提示する．③提示された箇所の中から，本プログラムはいくつかの箇所を提示する．ユーザは自分の感性に従って，それらを比較評価する．これを対話型進化計算(Interactive Evolutionary Computation=IEC)と言う．

上記の手法に基づいてプログラムを作成し，実験を行った．その結果として音楽的に適切な楽曲ミックスを生成することができた．

2. 従来の手法の問題点

DJプレイとは，その場の雰囲気に合った楽曲を選択し，曲と曲のテンポを合わせてミックスし(繋ぎ合わせる)，より良いスクラッチをする(レコードを擦ってノイズを生成する)ことである．したがって他の楽器の演奏とは異なり，DJには難しい音楽理論は一切必要ない．しかしこれらは芸術的センスや熟練の技を必要とするため，DJ経験のない人にとっては難しい．

しかし，これまでのソフトウェアは，ソフト上でユーザがマウスやキーボードを使ってDJプレイするものばかりであった．これらの媒体を通してモニタに表示されているレコードを操作しなければならないため，実物よりも難しい．これでは本末転倒である．

人間が手動で行うことの利点と，コンピュータが自動で行うことの利点を深く理解し，それを効率よく利用すべきである．

3. 本手法の有効性

本システムではDJの高度なテクニックを必要としないので，誰もが気軽に楽曲ミックスを楽しむことができる．またシステムにユーザの感性を組み込むので，生成されたミックスはユーザのオリジナルである．

ユーザはGPが提示したミックス位置を自分の感性で評価する(図 1)．これを十分な回数繰り返すと，ユーザの感性を模倣するプログラムが出来上がる．一度これが出来上がれば，図2の作業を自動で行うことができる．ここで図3はミックスを生成する全ての工程を示している．図2の工程は図3の工程の一部分である．

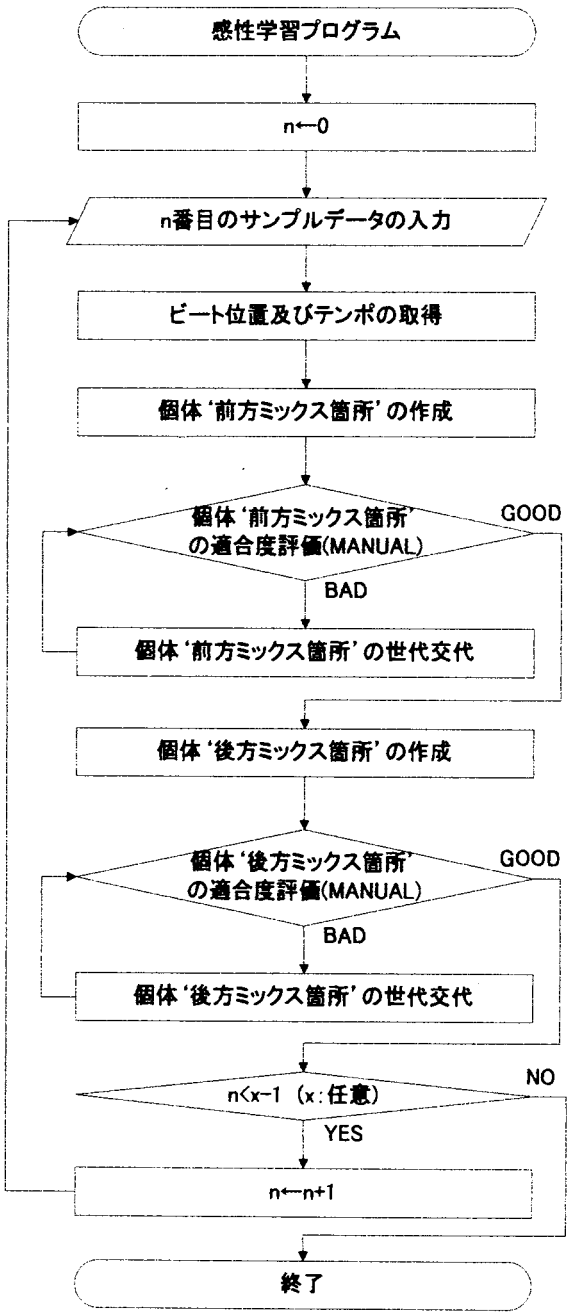


図 1　感性の学習手順

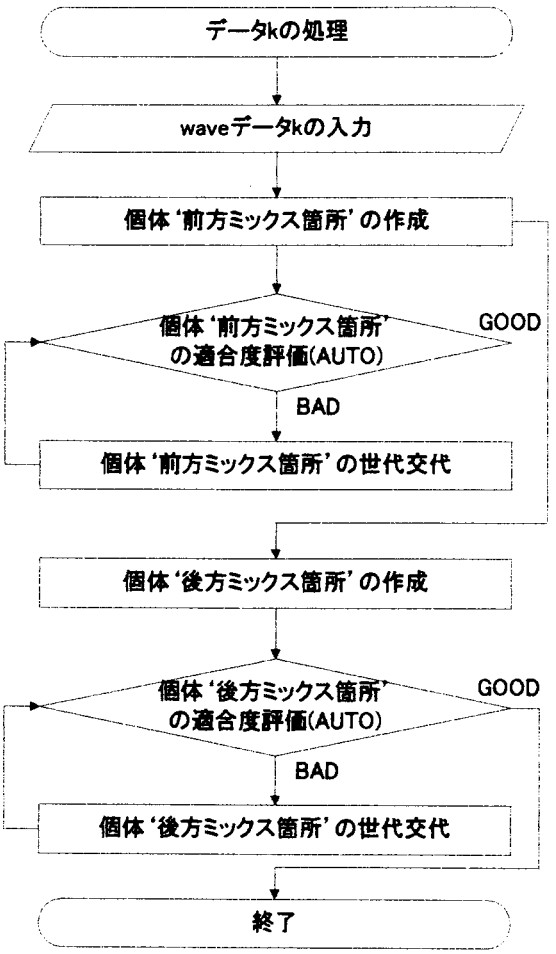


図 2　データの処理手順

表 1　主な音声データ形式

データ形式	特徴
wave データ	実際の音声を扱える.
mp3 データ	wave データを圧縮しているため，容量は少なくて良いが，圧縮したままではプログラムで扱えない.
midi データ	音の三要素(音程，音色，音量)やエフェクトなどの情報を扱えるので作曲に適している．しかし実際の音声を扱えない.

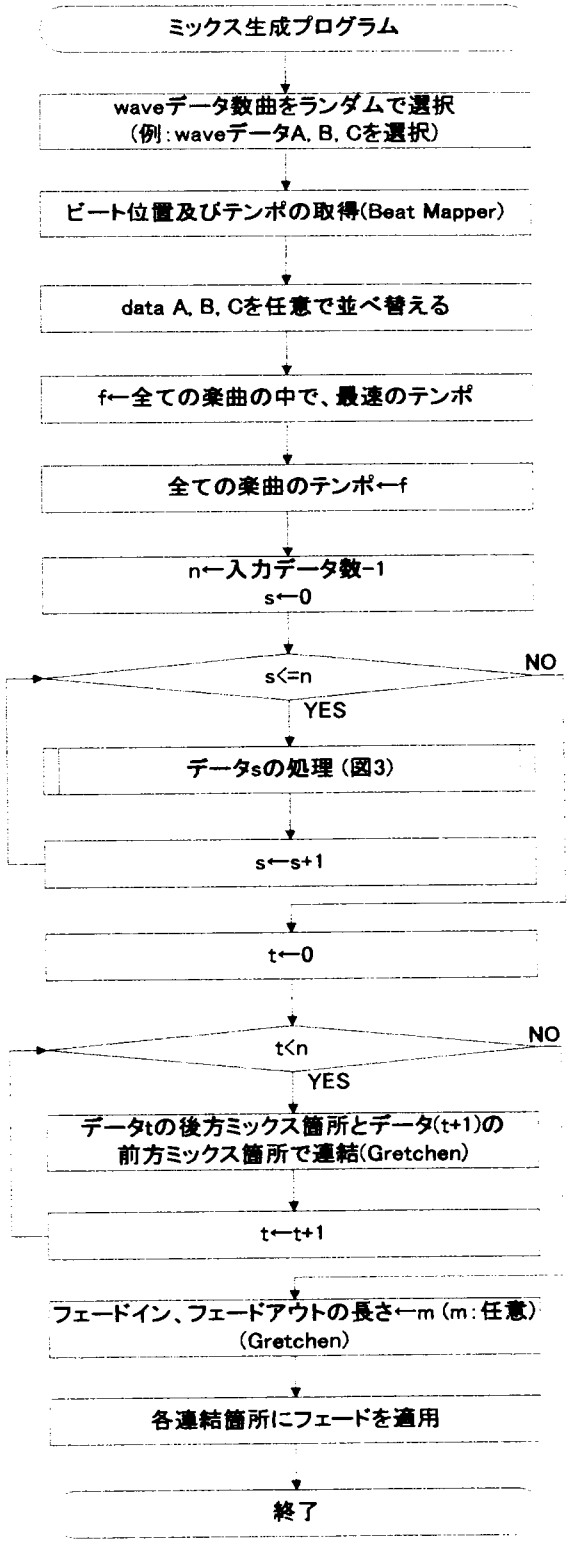


図3　ミックスの生成手順

4. 理論

本項では本システムの構築における問題とその解決策を説明する.

4. 1 データ形式

DJ のシステムでは, CD やレコードのように実際の音声を記録することができるメディアを用いることが絶対条件である. 各データ形式の特徴から wave データを扱うべきであることが分かる(表 1).

4. 2 ビート位置の検出

DJ は楽曲をミックスする際に, 両曲のビートを手掛かりにする. 両曲のビートの同期が取れていないと, そもそも音楽として成立しない. このことから, 本システムにおいても曲のビートを獲得する作業が必要である.

そこで曲をミックスするタイミングのガイド役を果たすビート(拍)位置を検出する. ここでビートを端的に表現する音とはスネアドラムの音(以下, スネア音と呼ぶ)のことである. つまりビート位置とはスネア音の発音点である.

wave データからスネア音の発音点を抽出することは容易ではない. それは楽譜情報を持つ midi データと異なり, wave データは全ての音声が混在した波形情報しか持たないからである.

そこで Sonic Foundry 社のソフト "ACID PRO 4.0" の "Beat Mapper" という機能を用いた. これにより楽曲のビート位置とテンポが獲得できる[3].

4. 3 テンポの変更

音程は音波の振動数によって決まる. ある一定区間内における振動数が多くなると, 音程が高くなる. テンポを上げると, 一回の振動にかかる時間が短くなる. つまり, ある一定時間内に繰り返される振動数が増えることになる. よって音程が高くなるのである.

テンポを変更したことによって曲の音程が原曲と異なると, 違和感を生じる. 特にボーカルパートを含む曲では, 人間の声の音程が変わってしまうので奇異である.

テンポを上げると音程が高くなる, またはテンポを下げると音程が低くなる. これはその音を扱う者としては問題であるが, 一方で wave データとしては安定な状態である. もちろん, 音程を変えずにテンポのみを変えることはできる. しかしこのとき, データは不安定になる. 音程を変えずにテンポを上げると, データは過密になる. また, 音程を変えずにテンポを下げると, データは過疎になる.

大幅なテンポ変更はデータを大きく変形させてしまうことになるので, テンポ変更はできるだけ小さい幅で行うことが好ましい. つまりミックスに関する 2 曲のテンポの違いは少ないほど良いということである. また, テンポを下げてデータを過疎にすることは避けるべきである.

以上のことから, テンポの違う楽曲をミックスする場合はテンポの相違幅が小さいことを確認した上で, テンポを上げると良いということである.

4. 4 ミックス箇所の限定

音楽は時間芸術であるから, いかなる楽曲にも "流れ(展

開)”が存在する．これにより音楽は表現される．つまり流れによって楽曲をいくつかのパートの連結であると考えることができる．さらにその各々も，短いメロディフレーズの連結またはループで構成されている[1].

このフレーズの途中でミックスすることはメロディを壊してしまうことに他ならない．楽曲をミックスするために区切る箇所は，少なくともフレーズの始点または終点でなければならない．

そこで4.2項で抽出されたビート位置候補の中から，GPを用いてミックスに利用できる箇所のみを提示する．

4．5 感性の学習

ユーザの感性を学習するためには，ユーザの主観的な評価が不可欠である．この場合，適合度関数を明示的に定義することは困難なので[2]，IECを用いる．

一度十分な学習をさせれば，どのような楽曲が提示されてもコンピュータは自動でユーザの好み(感性)に合致したミックス箇所を挙げられるようになる．

IECではGP個体の適合度評価を行うユーザへの負荷が懸念されている[2]．長時間，多数の個体の評価を行わなければならないとすると，ユーザは疲労してしまい，終始一貫した気分で評価を行うことは難しい．これを避けるために，ユーザが評価するGP個体数はできるだけ少なくすべきである．

5．実験方法

様々な音楽のジャンルから10曲を選び，感性の学習に用いた．実験の焦点を絞るために，ミックスの生成にはボーカルレスの楽曲2曲のみを用いた．

被験者20人に，感性の学習およびミックスの生成を行ってもらった．このときアンケート用紙には「自分の感性に合致した結果が得られたか」という質問以外は敢えて項目を作らず，より率直な意見を求めた．

なお本プログラム作成にはMicrosoft社の“Visual C++ 6.0 Standard Edition”を用いた．

本実験は以下の環境で行った．

Hitachi：“Prius Deck 770B”, Windows XP, CPU=Athlon 1.3GHz, Memory=512MB

楽曲の連結にはKiyotsugu Arai氏のシェアウェア“DIGITAL Gretchen 1.2.6”を用いた．このソフトは楽曲をスムーズにミックスするために必要なフェードインとフェードアウトを簡単に行うことができる[4].

6．実験結果と課題

実験のアンケート結果から以下のことが分かった．

良い点：

生成されたミックスは音楽として良好である．

改善すべき点：

(a) 本当に自分の感性に合致しているかが不明である．

(b) IECの作業は単調かつ長く，苦痛である．

以上の問題の解決策として以下のことを考えている．

(a) DJ演奏において最も個性が反映される“スクラッチ”や“サンプリングのループ”のテクニックを本システムに組み込む．

(b) ニューラルネットワークを用いて，その出力値が大きい個体を優先的に提示する方法がある[2].

7．結論

本研究では誰もが簡単に自分の感性に沿ったDJ演奏ができるようなシステムの構築を目指している．現在はそのプロジェクトの途中であるため，いくらかの改善の余地がある．そこで6項で挙げた対策を講じることで，もっと個人の感性に沿ったシステムが実現できるだろう．本システムではユーザのオリジナルミックスを作ることができるので，単に娯楽としてだけではなく，クラブのDJやプロのミュージシャンが利用することも可能である．

【参考文献】

[1] 諏訪原理香：“音楽経験則を用いたメロディ生成”，工学院大学卒業論文，2002.3.31

[2] 伊庭斉志：“遺伝的プログラミング入門”，東京大学出版会，2001.7.5

[3] Sonic Foundry：“ACID PRO 4.0a DEMO”，http://www.sonicfoundry.com/

[4] Kiyotsugu Arai：“Welcome to Excla!”，http://www.excla.com/index-J.htm

【連絡先】

〒163-8677

東京都新宿区西新宿1-24-2

工学院大学大学院　工学研究科　情報学専攻

数理情報研究室　椎塚久雄，藤尾豪

℡：03-3340-2971

E-mail：shiizuka@cc.kogakuin.ac.jp

遺伝的プログラミングを用いた株式売買エージェント

AN AGENT SYSTEM FOR STOCK TRADING USING GENETIC PROGRAMMING

平岩孝史 椎塚久雄

Takafumi HIRAIWA and Hisao SHIIZUKA

工学院大学大学院 工学研究科 情報学専攻

Informatics, Kogakuin University Graduate School, Nishishinjuku 1-24-2, Shinjuku, Tokyo, 163-8677 Japan

Abstract : Since the development of internet, new services for the stock trading, such as a stock on-line trade, have been popularized in investors. As is well known, efficient stock trading is a difficult for inexperienced people. It goes without saying that if we have any system for making the judgment of dealing, it provides a useful tool for us. The purpose of this paper is to propose a generation of method of the stock trading for obtaining highest profits at a minimum risk, by using Genetic Programming (it is described with GP). As an application of GP to the stock market, the research on the prediction of the stock price index for Nikkei 225 which is stock price index, etc. is reported. However, the research of creating the effective trade program on the concrete individual brand by GP is not reported like this paper. And, the much until now research has formed the program from statistical numerical values such as average and dispersion. Then, it is shown that it is to use the technical index utilized actually, when specialists of the stocks trade carry out the stocks trade, and that to create the program which is more similar to the thought of specialists of the stocks trade is possible in this paper.

1．はじめに

株式市場は資本主義経済の柱であり，株式市場の活性化なくして日本経済の発展はないとも言えるほど，日本経済にとって重要なファクターの一つである．よって，日本政府も近年の株式売買委託手数料の自由化や株式売却時におけるキャピタルゲイン課税の課税方式の一本化の見送りなど，様々な手を打って，より多くの個人投資家が株式市場に参入するよう働きかけている．しかしながら，2002 年 8 月に内閣府[1]から発表された証券取引に関する世論調査では，現在，株式や証券投資を行っているのは全国民の約 1 割ほどであり，8 割以上が今後も投資をするつもりがないと考えていることが明らかにされた．このような状況を打開し，より多くの個人投資家を株式市場へ参入させるためには，株式売買に関する知識を持ち合わせていない個人投資家であっても、株式売買の専門家達が行うような効率的な株式投資を行えるようなシステムが必要であると考えることができる．

本稿では，株式投資におけるこのような現状を考慮して，進化論的計算手法である遺伝的プログラミング(Genetic Programming:GP)[2]を株式市場へ応用することで，株式売買に関する知識や経験がなくても，株式市場で効率的に利益を挙げることができるような株式売買のためのエージェントシステムの開発を目的とする．

株式市場への GP の適用としては，株価指数である日経 225 を対象とした株価指数の予測に関する研究等が報告されている[3]．しかしながら，本研究のように，具体的な個別銘柄について効果的なプログラムを GP により生成するという研究は報告されていない．また，既存の研究では，平均や分散などの統計学的な要素からプログラムを生成していたが，本研究では，株式売買の専門家達が株式売買を行う上で実際に利用しているテクニカル指標[4-7]と呼ばれる株式売買のための指標を用いることで，より株式売買の専門家達の思考に近いプログラムを生成することを目指しており，この点も本研究の特徴として挙げることができる．

まず，2.では，本稿で株式売買プログラムを生成するために用いた計算手法である GP について紹介する．3.では現在，株式売買をする上で用いられている手法について紹介し，それらの手法と本手法がどのように異なっているのかを述べる．4.では本手法によって生成される株式売買プログラムの形状，特徴などを簡単な例を用いて説明を行う．5. および6. では，本論文の手法を用いて実験を行い，その結果より考察を行う．最後に本稿の締め括りとして，7. で本手法の現状での問題点および，今後の展望について述べる．

2．遺伝的プログラミング

人が何らかのシステムを構築する際に自然界にある仕組みをモデルにするということがよくある．これは，食物連鎖に代表されるように，自然界に存在するシステムが，合理的でいて無駄のない，非常に洗練されたシステムであることが多いためである．遺伝的プログラミング（以後 GP と記す）も自然界に存在する仕組みをモデルとしているという点でその一つであり，これは自然界における生物の進化，遺伝，劣勢淘汰といった仕組みを利用することでプログラムの自動生成や機械学習，推論，概念形成などを実現する進化論的計算手法と呼ばれる計算手法の一つである．同じ進化論的計算手法である，遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm:GA）に比べ、より構造的な解表現が可能であり，この点が GP の特徴および長所になっている．

本稿では GP のこの長所を生かし，株価に影響する様々な要素を構造的に組み合わせることで，効率的に利益を挙げることができるような株式売買のプログラムを生成し，そのプログラムをもとにが株式売買を自動的に行うエージェントシステムを開発することを目指している．

3．株式売買の手法

株式売買を行う上で一般的に用いられる手法は，ファンダメンタル分析と呼ばれる手法と，テクニカル分析と呼ばれる手法に大別される．ファンダメンタル分析とは経済の動向や企業の経営戦略・経営状況などの基礎的要因から，現在の株価が割高か，割安かを判断することにより売買を行う手法であり，一方のテクニカル分析とは，過去の株価の値動きがどのような傾向をもっているかを分析することにより売買を行う手法である．このため，テクニカル分析では過去の株価のデータさえ用意すれば機械的に分析を行うことが可能であるが，分析を行うための様々な指標が存在しており，それらの指標のうち，対象銘柄にどの指標を使用するかの選択が困難であるという問題点を持っている．本論文では，機械的に分析が可能であるというこの特徴からテクニカル分析を用いた売買を行う．テクニカル分析を用いた手法という観点からすると，これまでの株式売買では，数多くのテクニカル指標の中から適当な指標を一つ，もしくは幾つか選び，それらをもとに売買を行うという方法が一般的であった．しかし，実際に株式売買で良い成績をあげるためには，対象銘柄の株価の値動きがどんな特徴を持ち，そしてどんな指標を用いた売買を行えば良い成績を挙げることができるかを研究した上で売買を行うべきである．だが，これらの行程を人手で行うには非常に多くの労力と時間が必要であり，現実にはほとんどの場合において省略されてしまっている．また，このような一連の作業を自動的に行ってくれるようなシステムも，少なくとも一般向けには存在していないように思われる．

これらのことをまとめると，本論文の提案する手法は，GPを用いて過去の株価の値動きを学習する点，および売買においてどの指標を使用するかの選択から最終的な売買の判断までをも自動的に行うという点から見て，株式売買に対する新しい試みであると言うことができる．

4．株式売買プログラム

本稿で提案する手法では，GPに木構造の個体を生成させ，これを株式売買のためのプログラムとして見なすことで株式売買を行う．本手法により生成される株式売買プログラムは，関数記号と呼ばれる，木の節に相当するノードと，終端記号と呼ばれる，木の葉に相当するノードから構成される．そして，これらの選択が株式売買の成績を決定付ける非常に重要な要素となる．本稿での実験において使用した，終端記号および関数記号を以下に記す．

4.1 テクニカル指標

テクニカル指標ノードは２本の枝を持つ関数記号である．テクニカル指標ノードはある時点において，それぞれのテクニカル指標が買いのシグナルを出した場合，売りのシグナルを出した場合，シグナルを出さなかった場合に応じて対応する枝を選択する条件分岐の働きをする．本実験において使用した12種類のクニカル指標を以下に示す．

4.1.1 ストキャスティクス

ストキャスティクスは現在の株価が過去の価格変動のどの位置にあるかに注目することにより株価の分析を行うテクニカル指標である．

4.1.2 順位相関指数

順位相関指数は日付と株価に順位を付け，それらの相関関係を見ることにより株価の値動きの予測を行うテクニカル指標である．

4.1.3 相対力指数

相対力指数は一定期間の株価変動を上昇幅と下落幅に分け，全体の値動きの中での上昇幅のウェイトによって株価の値動きの予測を行うテクニカル指標である．

4.1.4 Ｑスティック

Ｑスティックは４本値と呼ばれる株価の始値，終値，高値，安値から株価の分析を行うテクニカル指標である．

4.1.5 ワコー・ボリューム・レシオ

ワコー・ボリューム・レシオは和光証券（現，新光証券）が1974年に開発したテクニカル指標である．ワコー・ボリューム・レシオでは，「相場はエネルギーの発散と蓄積の循環」によるという考え方を指標にしたもので，上昇相場の出来高と下降相場の出来高の関係から株価を分析する．

4.1.6 マネー・フロー・インデックス

マネー・フロー・インデックスは上昇した日と下降した日の株価と出来高の関係から株価の予測を行うテクニカル指標である．

4.1.7 コモディティ・チャネル・インデックス

コモディティ・チャネル・インデックスは値動きの振幅に対して，現在の株価の乖離がどのくらいであるかを見ることによって株価の分析を行うテクニカル指標である．

4.1.8 フォース・インデックス

フォース・インデックスは値動きに出来高を掛け合わせることで算出した数値を「買いの力」，「売りの力」としてみなすことにより株価の値動きを分析するテクニカル指標である．

4.1.9 モメンタム

モメンタムは相場の値動きの勢いから株価の値動きの予測を行うテクニカル指標である．

4.1.10 ドンチャンズ４週間ルール

ドンチャンズ４週間ルールは，昨日までの４週間の高値を超えたら買い，安値を超えたら売りという簡単なルールにもかかわらず，過去何度も「テクニカル分析ベスト１」として輝いた実績を持つテクニカル指標である[5]．

4.1.11 サイコロジカル

サイコロジカルは投資家の心理的な側面から，相場の分析を行うテクニカル指標である．

4.1.12 ＭＡＣＤ

ＭＡＣＤ（平滑平均）は２つの指数平滑平均移動線の差と、その移動平均線により相場の強弱を判断するテクニカル指標である．

4.2 株式売買判断

株式売買判断ノードは枝を持たず，それ自体で完結する終端記号である．本実験においては Buy1,Buy2,Buy3,Buy4,Stayの５通りの株式売買判断ノードを用意した．BuyN（Nは整数

値）記号はその時点において，買いシグナルを出しているテクニカル指標がN個以上であれば株式を購入するという意味を持つ記号であり，Stay は条件によらずその時点では株式を購入しないということを意味する記号である．

ここで，図1に簡単な株式売買プログラムの例を示す．

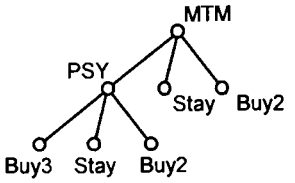


図1：株式売買プログラムの例

図1において，MTM と記されているノードはテクニカル指標の一つであるモメンタム，同じく PSY と記されているノードはテクニカル指標の一つであるサイコロジカルによる売買判断を行うテクニカル指標ノードである．この図では，テクニカル指標による判断が買いシグナルを出した場合に左の枝を，売りシグナルを出した場合に中央の枝を，シグナルを出さなかった場合に右の枝を選択するものとする．例として今，ある時点においてモメンタム，サイコロジカルともに買いシグナルを出したものとしよう．この場合，このプログラムはルートである MTM から MTM→PSY→Buy3 と順に評価が進み，最終的に Buy3 という終端記号が算出され，この時点において3個以上のテクニカル指標が買いシグナルを出していれば株式を購入するというアクションがプログラムによって導き出される．次に，モメンタムが買いシグナル，サイコロジカルが売りシグナルを出したと仮定すると，先程と同様にプログラムのルートである MTM から，MTM→PSY→Stay と評価が進み，最終的に Stay という終端記号が算出され，この時点においては株式を購入しないというアクションがプログラムによって導き出される．

5．株式売買シミュレーション

本手法により生成した株式売買プログラムが実際の取引において，どれほどの成績を挙げることができるかを確かめるため，ソニー株式会社の 1990 年度から 2002 年度までの株価終値（日足）を用いた株式売買シミュレーションを行った．

まずここで，最適な株式売買プログラムを生成するまでの学習プロセスの流れを示す．

Step1: GP における初期世代として，1000 本の株式売買プログラムをランダムに生成し，それぞれのプログラムに対し評価付けを行う．

Step2:株式売買プログラムに対して一定の確率で遺伝的オペレータ（選択，交叉，突然変異）を施す．

Step3:すべての株式売買プログラムに対して過去4年分の株価データを用いて評価付けを行う．

Step4:終了条件を満たしていれば学習を終了し，満たしていなければ Step2 へ戻る．

なお，Step1 および Step3 において株式売買プログラムに対して評価付けを行っているが，その評価値は過去4年分の株価を用いた仮想的な取引においての成績を用いている．また，学習プロセスの終了条件としては，①50 世代の学習を完了した時，②15 世代に渡り最良個体の適応度に改善が見られない場合，のどちらかを満たした場合という条件を用いた．表1に GP による学習を行う上での，主なパラメータを示す．

表1．ＧＰパラメータ

個体数	1,000
最大世代数	50
交差確率	70%
突然変異確率	30%
最大ノード長	200
初期最大深度	3
選択方式	トーナメント方式、サイズ4
交叉方式	1点交叉
突然変異方式	ランダムに選択したノードのラベルを同数の引数を持つラベルに変更
初期化の方法	grow

シミュレーションは上記のような学習プロセスを通して生成された株式売買プログラムを元にして行った．なお，シミュレーションでは以下の３つの条件を設けた．

(1) 資金を１００万円とする．
(2) 株式購入時にはその時点での資金で購入できるだけの株式を購入する．
(3) 株式購入から３日後に株式を売却する．

このシミュレーションでは株式の売却のタイミングを株式の購入から３日後と限定している．テクニカル指標は買いのシグナルだけではなく売りのシグナルも出すため，株式売買プログラムに株式購入とともに株式売却の判断まで下すようにすることも可能であるが，長期的に株式を保有することは株価暴落のリスクを挙げてしまうことに繋がり兼ねないため，今回の実験においてはこのような条件でシミュレーションを行った．

6．シミュレーション結果

シミュレーション結果を表2に示す．表は左から，実験を行った年度，生成された株式売買プログラムの判断により行った取引の総数，購入時よりも売却時のほうが株価が上がったためにキャピタルゲイン（売買益）を得ることができた取引の数，反対に購入時よりも売却時のほうが株価が下がったために損失を発生した取引の数，勝ち取引数の総取引数に対する割合，年度の終わりの集計時の資金,集計時の資金から元金を引いた利益，利益の元金に対する割合という構成になっている．まず，全体を見てみると 1990 年度から 2002 年度までの 13 年間を通して，1995 年度に約 0.2%の元本割れを記録したものの，その他の年度に関しては比較的安定して利益を挙げ，年度別平均で約 20.3%の利益を得られたことが確認できる．取引数で言えば，総取引数 232 に対して勝ち取引が 138

表2．シミュレーション結果

年度	総取引数[回]	勝ち数[回]	負け数[回]	勝率[%]	実行後資金[円]	利益[円]	利益率[%]
1990	19	11	7	57.9	1,113,842	113,842	11.4
1991	18	9	8	50.0	1,149,464	149,464	14.9
1992	28	20	8	71.4	1,456,855	456,855	45.7
1993	20	10	9	50.0	1,205,650	205,650	20.6
1994	22	13	8	59.1	1,028,220	28,220	2.8
1995	7	3	4	42.9	998,200	-1,800	-0.2
1996	18	11	7	61.1	1,144,210	144,210	14.4
1997	30	19	11	63.3	1,230,645	230,645	23.1
1998	16	9	7	56.3	1,109,570	109,570	11.0
1999	25	18	7	72.0	2,039,920	1,039,920	104.0
2000	8	4	4	50.0	1,110,370	110,370	11.0
2001	10	5	5	50.0	1,013,310	13,310	1.3
2002	11	6	5	54.5	1,035,440	35,440	3.5
平均	17.8	10.6	6.9	59.8	1,202,746	202,746	20.3

回と，本手法が生成した株式売買プログラムによる株式購入判断による取引の約 59.5%で株価が上昇したことになる．現段階では他の株式売買のシステム，および株式売買の専門家達の成績との比較を行っていないために，これがどの程度の成績かは安易に判断できないものの，本稿で提案する手法が実際の株式市場において，ある程度の成績を挙げることができるということが確認できる．なお，本実験においては実際に株式を売買する上で必要な株式売買委託手数料とキャピタルゲイン課税については考慮していない．株式売買委託手数料については日本政府の政策により手数料の委託手数料が自由化されたこともあり，現在最も手数料の低いオンライン証券会社での注文で片道あたり約 500 円で売買を行うことが可能である．また，株式売却に伴う税金においては源泉分離課税と申告分離課税の２通りの納税方法があるが，本手法に適している申告分離課税では年間の株式売却において利益を得た場合に利益の 26%を税金として収める必要がある．

7．おわりに

本稿では，株式売買に関する知識や経験がなくても，株式市場で株式売買の専門家達のように効率的に利益を挙げることができるような株式売買を自動的に行うエージェントシステムの構築を目標にしている本研究において，研究の核とも言える，GP による株式売買プログラムの生成と，そのパフォーマンスを実際の株価を用いたシミュレーションを通して紹介した．しかしながら，頻度は少ないながらも，場合によっては損失を出してしまう年度が存在するなど，株式売買プログラムの生成過程においてはまだまだ改良すべき点も確認することができた．今後の展開としては，まず，今回シミュレーションの対象としたソニー株式会社株以外の銘柄でも今回のシミュレーションと同様,あるいはそれ以上のパフォーマンスが発揮できるかどうかを確認した上で，終端記号，関数記号の改良により．さらなる成績の向上を目指したいと考えている．

参考文献

[1] 内閣府ホームページ：http://www.cao.go.jp

[2] Wolfgang Banzhaf, Peter Nordin, Robert E. Kekker, Frank D. Frannone（伊庭斉志，新田徹 訳）：遺伝的プログラミング，科学技術出版，2001

[3] 伊庭斉志：遺伝的プログラミング入門，東京大学出版会，109-125，2001

[4] 仁科剛平：相場を勝ち抜くチャートの鉄則，日本経済新聞社，2001

[5] 田中勝博：テクニカル分析大全集，シグマベイスキャピタル，1998

[6] 伊藤智洋：チャート救急箱，投資レーダー，1998

[7] 吉見俊彦：チャート分析の真実，ラジオたんぱ，2000

[8] 平岩孝史，椎塚久雄：株式売買と人工感性の世界，日本感性工学会 感性工学研究論文集 採録決定済み,2003

連絡先

〒163－8677
東京都新宿区西新宿 1－24－2
工学院大学大学院　工学研究科情報学専攻
数理情報研究室　平岩孝史
Tel ：03－3342－1211(代表)　内線：2653
E－mail：flatrock@jcom.home.ne.jp

遺伝的プログラミングを用いたデータマイニングアルゴリズムの組み合わせ手法

Combined Method of Data Mining Algorithms using Genetic Programming

新美　礼彦 1)
Ayahiko Niimi

1) 公立はこだて未来大学 システム情報科学部 情報アーキテクチャ学科
Department of Media Architecture, Future University-Hakodate

Abstract: Quality of keywords given to each document is important to search documents from a lot of document databases. It is necessary automatically extracting high quality keywords from a document to achieve a document retrieval with high efficiency. We proposed a keyword extraction approach with selection of extracting keyword method depended on document categories using genetic programming. This approach could select only one extracting keyword method. In this paper, we expand this approach to be able to select combination of some extracting methods. By our new proposed approach, we can construct more complex keyword extraction system with combination of some methods.

1　はじめに

現在、インターネットの爆発的は普及により、さまざまな情報が簡単に手に入るようになった。しかし、これらの情報の中から自分のほしい上を探すのは簡単ではない。多量の文献のなかから自分の欲しい文献を検索する時の効率は、各文献に付与されているキーワードの品質に大きく左右される。効率の高い文献検索を実現するためには、与えられた文献から高品質のキーワードを自動抽出する必要がある。今までにいくつかのキーワード抽出法が提案されているが、各キーワード抽出法は文献に応じて精度に違いがあり、パラメータチューニングなども大変である。

この問題に対して、文献をカテゴリーごとに分類し、遺伝的プログラミングを用いてカテゴリーごとにキーワード抽出法を自動選択し、キーワードの抽出を行うシステムを提案した。[1] 提案したシステムでは、1手法のみを用いたキーワード抽出しか行えなかった。そこで本研究では、それを複数のキーワード抽出法を同時に組み合わせてキーワード抽出が行えるように拡張する。これにより、提案手法では複雑なキーワード抽出アルゴリズムの組み合せが行えるシステムを構築可能になる。

提案した手法の検証のため、キーワード抽出実験を行い、その評価を行った。

2　遺伝的プログラミング

遺伝的プログラミング (Genetic Programming:GP) は、生物進化論の考えに基づいた学習法であり、そのアルゴリズムの流れは遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm:GA) と同様である。[2] その特徴は染色体表現がGAと異なり、関数ノードと終端ノードを用い構造表現ができるように拡張してあることである。GPでは、関数ノードと終端ノードを用いてLISPのS式形式で個体を表現する。

GPでは、個体評価に適応度関数を用いる。適応度関数には、個体の精度、大きさ、計算時間など複数の指標を総合して組み込むことが可能である。

3　キーワード抽出法

キーワード抽出法として、さまざまなものが提案されている。提案されているキーワード抽出法を大きく分けると、形態素解析を用いるもの、形態素解析を用いないもの、文章の構造をもとに解析するものなどがある。[3] 本論文では、主に形態素解析を用いるものについて検討した。

3.1 形態素解析

形態素解析とは、入力文を言語学的に意味をもつ最小単位である形態素に分割し、各形態素の品詞を決定するとともに、活用などの語変形化をしている形態素に対しては原形を割り当てることである。[4] 形態素解析で分割された単語を要素単語という。要素単語に分けることにより、頻度解析や特定品詞へのフィルタリングが行えるようになる。

3.2 出現頻度による抽出

形態素解析で分割された各要素単語の出現回数 (頻度) を調べる。出現頻度の高い要素単語をキーワードとして抽出する。出現頻度の高い要素単語をキーワードとして抽出するため、どんな文章からも最適なキーワードを抽出しやすい手法である。しかし、助詞などのキーワードとして適切でない語を抽出する傾向があるため、抽出後のフィルタリングが重要になる。単純な頻度を使わずに、$tf \cdot idf$ を用いることもできる。これは、以下の式で定義される。

$$\text{スコア} = tf \times idf \tag{1}$$

ただし、

tf : あるキーワードがその対象文章中に含まれる出現回数 (Term Frequency)

$idf = \log(N/n)$: (Inverse Document Frequency)

N: 全文章数

n: そのキーワードを含むファイル数

$tf \cdot idf$ 法を用いることにより、多数の文章に多く含まれる一般的なキーワードの重要度を下げ、特定の文章中に多く含まれるキーワードの重要度をあげることができる。

3.3 連続名詞の抽出

情報検索の世界では名詞概念をキーワードとして抽出する傾向が強い。[5] 一般的には、形態素解析を用いて名詞を抜粋し、キーワードの抽出をおこなう。

3.4 N-グラム

構文解析を行わない方法の1つとして、N-グラム (n-gram) 法がある。N-グラムは長い文字列から部分文字列を取り出す方法で、Nには2や3などの数をとることができる。N-グラムのアルゴリズムでは1文字ずつずらしながら、連続するN文字を取り出し、取り出した文字列の出現頻度を調べ、その集合の中で出現頻度の高い語をキーワードとして抽出するというものである。[5] あらかじめ文章に形態素解析による単語分けを行う必要がなく、任意の数の文字数を設定することができる。

しかし、単語分けを行わないで解析すると、単語の一部分を含んだ文字列を大量にキーワードとして抽出する恐れがる。これを改善するために、本論文では形態素解析を行い、要素単語に分けた後で、その要素単語の連続を調べる手法も検討した。

3.5 相関ルール

文章中に現れる文字や単語の相関から、キーワードを抽出することが考えられる。これを相関ルールと呼び、ルールはいくつかの文字 (または単語) からなり、どれだけ同時に現れやすいのか (相関があるか) が評価対象となる。相関ルールを高速に抽出する手法として、apriori アルゴリズムがある。[6] 相関ルールの探索では、支持度 (support value) と確信度 (confidence value) という2つの指標を用いて相関ルールを評価する。本論文では、相関ルールの支持度 (sup) は全データに対する構成要素が含まれる割合、確信度 ($conf$) はある構成要素が含まれたときに他の構成要素が含まれる割合の平均であると定義する。

相関ルール探索は、N-グラムを用いたアルゴリズムと同様に、形態素解析を行わなくてもキーワードを抽出することが可能である。しかしこれも、単語の一部分のみを抽出する可能性を減らすため、本論文では形態素解析を行った後に要素単語間の相関ルールからキーワードも作成することを考える。

4 GPによるキーワード抽出手法の組み合わせ

各キーワード抽出法には、対象文章に得意・不得意があると考えられる。構造化した文章には構造を解析しながらキーワードを抽出することができるが、あまり構造化されていない文章では同じ解析を行うことは難しい。メールなどの短く、あまり構造化されていな文章と、論文などのある程度の長さがあり、構造のはっきりした文章では、異なるキーワード抽出法を用いる方が効果的と考えられる。また、それぞれのキーワード抽出法において、パラメータを対象文章にあわせて、

表 1: AND ノードと OR ノード

関数ノード	定義
(AND A B)	A と B を評価し、両方に含まれているキーワードの割合を出力する
(OR A B)	A と B を評価し、少なくともどちらか一方に含まれているキーワードの割合を出力する

チューニングする必要もある。

そこで以前、GP を用いて、各情報カテゴリーをもとにして各キーワード抽出法を選択し、その時のキーワード抽出法の正答率を求め、正答率が一番高い情報カテゴリーとキーワード抽出法の組み合わせを見つける手法を提案した。この手法では、GP を用いることで情報カテゴリーに適したキーワード抽出法を自動選択し、キーワードの抽出を行うことが出来る。また、適応度関数の設計時に、キーワードの精度や数、抽出までの時間などを考慮することが可能となる。また、キーワード抽出法のパラメータも同時に学習させることが可能である。提案した定義では、関数ノードはどのカテゴリーの文章なのかの条件判断をあらわし、終端ノードはどのキーワード手法を用いるのかをあらわすようにした。

しかしこの定義では、選択る手法は 1 つになってしまう。そこで、本論文では、複数の手法が選択できるように、AND と OR の関数ノードの定義を追加した。(表 1 参照)

以前の定義では、

```
(if_news associate-w_key
    (if_editorial connect_noun_key
        (if_mail associate-w_key ngram-w_key)))
```

のような出力が得られたが、AND と OR を追加することにより、

```
(if_news associate-w_key
    (if_editorial
        (and connect_noun_key associate-w_key)
        (if_mail associate-w_key
                (or ngram-w_key connect_noun_key))))
```

のような出力が得られるようになる。

適応度は、以前と同様に GP の個体により情報カテゴリーからキーワード抽出法を選択し、そのキーワード抽出法によって得られてキーワードの正答率を求め、これをもとにした。これにより正答率が一番高い個体が適応度の高い個体となる。キーワードの抽出数や抽出時間なども適応度計算として定義することにした。

GP を用いたキーワード抽出システムの欠点として、実時間での学習が難しい点が考えられる。適応度をシステム利用者の評価により行う対話的なキーワード抽出システムも考えられる。しかし、GP の適応度計算が個体数やノード数に依存して増加してしまうので、対話的に学習をさせようとすると待ち時間が長くなってしまう。そこで、システム利用者からの評価入力待ち時間やシステムが利用されていない時間などを使って、評価と平行して学習するなどの工夫を行うことにより、実時間での学習に対応させることが可能であると考えられる。

提案手法で前提となるカテゴリー分けに関しても、以前と同様に、文章を自動的にカテゴリー分けする手法は含まず、カテゴリーは使用者により指定されるものとした。

表 2: GP のパラメータ

集団数	500
複製確率	0.1
交叉確率	0.8
突然変異確率	0.1
選択方式	トーナメント方式
関数ノード	表 3 の 7 種類
終端ノード	表 4 の 5 種類
訓練データ数	各カテゴリー 25 文章ずつ、合計 125 文章

5 検証実験

提案手法の有効性を検証するために、複数カテゴリの文章から複数手法を用いてキーワード抽出を行った。文章のカテゴリとして、論文、ニュース、社説、マニュアル、メールを用いた。まず、それぞれから手作業によりキーワードを抽出し、これを正解とした。キーワード抽出手法として、頻度解析、連続名詞の抽出、文字をもとにした N-グラム法、単語をもとにした N-グラム法、単語をもとにした相関ルールを用いた。

GP のパラメータは、以下のものを用いた。(表 2 参照) 適応度は、正答率から求めた。個体評価の際、毎回キーワード抽出を行うと時間がかかるので、実験ではあらかじめ各キーワード抽出法でキーワード抽出を行い、正答率を求めてから GP 学習を行った。以前の実験では正答率にあまり差がない場合にうまく学習が行えなかった。そこで、今回の実験では、正答率の差が適応度の大きく影響するように正答率に重み付けをおこなった。AND と OR に関して、あらかじめ個別の手法での正答率が得られているので、とりあえず表 3 のように定義した。

まず、AND と OR を含まない場合の GP を用いたカテゴリーを元にした各キーワード抽出法の学習では、

表 3: 関数ノード

表示	意味
and	引数 1 と引数 2 を評価し、評価値の小さい方を返す
or	引数 1 と引数 2 を評価し、評価値の大きい方を返す
if_paper	カテゴリーが論文なら引数 1 を、違うなら引数 2 を評価する
if_news	カテゴリーがニュースなら引数 1 を、違うなら引数 2 を評価する
if_editorial	カテゴリーが社説なら引数 1 を、違うなら引数 2 を評価する
if_manual	カテゴリーがマニュアルなら引数 1 を、違うなら引数 2 を評価する
if_mail	カテゴリーがメールなら引数 1 を、違うなら引数 2 を評価する

表 4: 終端ノード

表示	意味
frec_key	出現頻度による抽出法を用いる
connect_noun_key	連続名詞による抽出法を用いる
ngram-c_key	文字をもとにした N-gram による抽出法を用いる
ngram-w_key	単語をもとにした N-gram による抽出法を用いる
associate-w_key	単語をもとにした相関ルール抽出よる抽出法を用いる

以下の結果を得た。この場合の平均正答率は 0.65 であった。

```
(if_mail associate-w_key
    (if_news (if_news associate-w_key
                     ngram-c-key)
             (if_news connect_noun_key
                      connect_noun_key)))
```

つぎに、提案した AND と OR を含んだ GP を用いたカテゴリーを元にした各キーワード抽出法の学習では、以下の結果を得た。この場合の平均正答率は 0.656 であった。

```
(if_mail (if_manual ngram-c_key
                    (or associate-w_key
                        frec_key))
         (if_news associate-w_key
                  connect_noun_key))
```

得られたキーワード選択はほぼ同じであるが、カテゴリーがメールのときに相関ルール抽出と同時に頻度分析を用いるようになり、平均正答率がわずかではあるが上昇した。

6 おわりに

本論文では、以前提案した文献をカテゴリーごとに分類し、遺伝的プログラミングを用いてカテゴリーごとにキーワード抽出法を自動選択し、キーワードの抽出を行うシステムを、複数のキーワード抽出法を同時に組み合わせてキーワード抽出が行えるように拡張した。拡張のため、AND と OR を関数ノードとして定義した。提案した手法の有効性を検証するために、キーワード抽出実験を行い、その評価を行った。

その結果、AND と OR を用いた GP で、用いないものよりも高い正答率を得ることができた。

今後は、単に引数の最大、最小を返す実装になっている AND,OR によるキーワード選択時の正答率を、実際に複数手法でキーワードを抽出した時のキーワード数に応じたものになるように変更し、提案手法が実際に使えるかどうか検討する予定である。

参考文献

[1] 新美 礼彦、安信拓馬、田崎 栄一郎: 遺伝的プログラミングを用いたカテゴリーごとのキーワード抽出法選択. 第 18 回 ファジィシステムシンポジウム論文集:pp.303–306 (2002).

[2] Koza, J.R.: Genetic Programming. MIT Press (1992).

[3] 市村 由美、長谷川 隆明、渡部 勇、佐藤 光弘: テキストマイニング - 事例紹介, 人工知能学会誌 Vol.16 No.2,pp.192–200 (2001).

[4] 松本 裕治、北内 啓、山下 達雄、平野 善隆、松田 寛、浅原 正幸:日本語形態素解析システム『茶筌』version 2.0 使用説明書 第二版 (1999).

[5] 那須川 哲哉、河野 浩之、有村 博樹:テキストマイニング基盤技術, 人工知能学会誌 Vol.16,No.2,pp.201–211 (2001).

[6] Rakesh Agrawal, Ramakrishnan Srikant: Fast Algorithms for Mining Association Rules, the 20th International Conference on Very Large Databases, Santiago, Chile, September 1994:32pages (1994).

[問い合わせ先]

〒 041–8655

北海道函館市亀田中野町 116–2

公立はこだて未来大学 システム情報科学部

情報アーキテクチャ学科

新美 礼彦

TEL:0138–34–6222 FAX:0138–34–6301

E-mail:niimi@fun.ac.jp

線形構造を用いたGPと ウイルス感染の組み合わせによるGPの高速化

Improvement in the speed of GP by having combined virus infection with Linear GP

工藤 功　江本 全志　山内 ゆかり　向殿 政男
Isao Kudo　Masashi Emoto　Yukari Yamauchi　Masao Mukaidono

明治大学
Meiji University

Abstract

The Genetic Programming (GP) is what extended The Genetic Algorithm (GA) so that a structural expression can be treated. Although GP is very useful, there is a weak point that execution time will become very long, because a lot of amounts of calculation is required. In order to improve this problem, we proposed and verified new GP which combined Linear GP and GP using virus infection.

1 はじめに

遺伝的プログラミング(Genetic Programming, GP)は一次元配列を用いる遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, GA)を木構造などの構造的な表現を扱えるように拡張したものである。GP はコンピュータのプログラムの自動生成や、学習、推論、人工生命など幅広い分野で使われている。

しかし、GP には莫大な計算量が必要であり、実行時間が非常に長くなってしまうという欠点がある。これを改善するために本研究では、人工蟻問題を解く GP を対象にして、GP の構造を改良し木構造ではなく線形構造を用いた GP と遺伝的オペレータの交叉部分をウイルス感染に改良した GP を組み合わせた新しい GP を作成し、検証を行った。

2 人工蟻問題

2.1 人工蟻問題とは

32×32 のフィールドに 89 個の餌が断続的にゴールまで並べられていて、1 匹の蟻がスタートからゴールまで餌をたどりながら進む。たどることのできた餌の数で評価値は決まり、すべての餌をたどりかつゴールに到着できたものが最大の評価を得る。

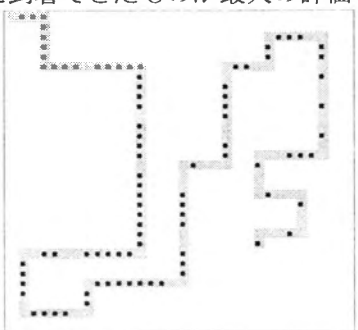


図 2.2.1　人工蟻問題のフィールド

2.2 パラメータの設定

パラメータの設定値は以下の通りである。終端記号集合・関数記号集合を表 2.1・2.2 に示す。

- 交叉率：90%
- 突然変異率：5％
- 個体数：100
- 最大世代数：500
- 選択法：エリート保存＋トーナメント方式
- 最大適応度：100(餌 89 個＋ゴール報酬 11)
- プログラムの最大繰り返し回数：500 回
- プログラムの終了条件：蟻がゴールする、蟻が場外に出る、プログラム繰り返し規定回数オーバー

表 2.1　終端記号集合

記号	意味
move	その時の向きに 1 マス移動し、ゴールに到着したかチェックする。
left	その場で向きを左に 90 度回転する。
right	その場で向きを右に 90 度回転する。

表 2.2　関数記号集合

記号	意味
IF_FOOD_AHEAD	1 マス前方に餌があれば第 1 引数を、なければ第 2 引数を実行する。
PROG2	2 つの引数を順に実行する。

2.3 実行結果

人工蟻問題に対する通常の方式の GP プログラムを 50 回実行した。実行時間・適応度の平均と最良適応度(100)を得られた回数を表 2.3 に示す。

表 2.3　通常の GP による人工蟻問題の実行結果(50 回)

平均実行時間(s)	平均適応度	最良適応度を得た回数(回)
192.1	61.4	7

3 ウイルス感染 GP

3.1 ウイルス感染 GA とは

ウイルス進化論はダーウィンの進化論と異なり、生物はウイルスにより進化するという考え方に基づいている。GA を改良したもので、通常の GA では 2 つの個体間で遺伝子の一部分を入れ替える交叉という操作を行うのに対して、ウイルス進化ではある優秀な個体の一部分ですべての個体の同じ場所において置き換えを行う感染という操作を行う。

3.2 ウイルス感染 GP とは

GA の場合には決まった場所において置き換えを行うのは常に可能であるが、GP の場合は個体ごとに木の深さが異なり常に置き換えが可能ではない。そこで、本研究では置き換えが不可能となった場合、感染を行う位置を変えてその処理を行う。具体的には、根から置き換えを行う場所まで探索を行う際に、終端記号が現れた時点でその終端記号をウイルスで置き換えを行う。

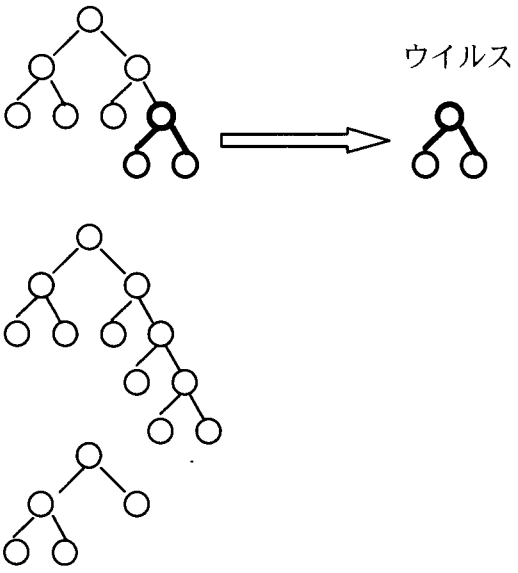


図 3.1　ウイルスの選択

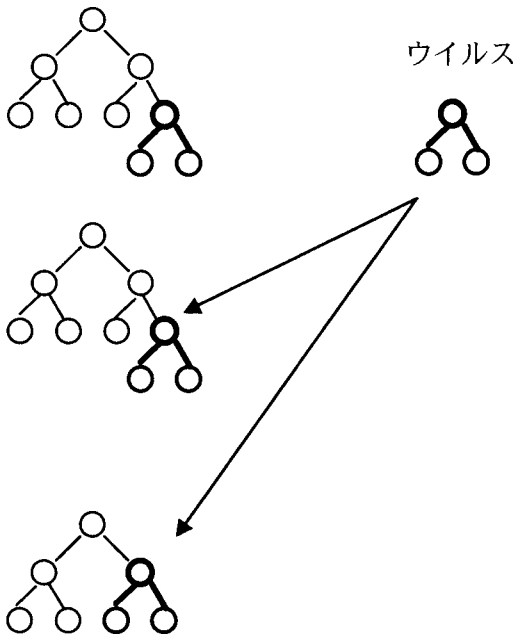


図 3.2　ウイルスの感染

3.3 実行結果 1

ウイルス感染 GP の場合、同じ部分を全体に広めるために同じような木ばかりの集団になってしまい、集団内の多様性が失われてしまう恐れがある。ウイルス感染 GP の突然変異の確率が 5%、10%、15% のものの結果を表 3.1 に示す。

表 3.1　手法 1 において突然変異率が 5%・10%・15%の場合の実行結果(50 回)

突然変異確率	平均実行時間(s)	平均適応度	最良適応度を得た回数(回)
5%	45.2	46.9	6
10%	47.5	55.7	10
15%	56.4	60.4	12

3.3.1 検証 1

表 3.1 において、平均実行時間は突然変異の確率が 5%のときにもっとも良い結果が得られている。これには 2 つの理由が考えられる。ひとつは、単純に突然変異の処理を行う回数が少なかったためである。もうひとつは、感染の場合にはウイルスをすべての個体に一気に広めるため、ウイルスがあまり良くない部分木であった場合には通常の GP の場合よりも早い段階で多様性が失われていくため、個体の進化がうまくいかず適応度の計算時間が短縮されたためである。具体的には早い世代ですぐに場外に飛び出してしまうような蟻の遺伝情報が全体に広まってし

まったことが原因となっている。

また、上記の理由から最良適応度を得た回数・平均適応度は突然変異率が 5%のときはあまり良い結果が得られていない。それに対し突然変異率が 15%の場合は、通常の GP の場合とほぼ同じくらいの平均適応度が得られた。つまり、ウイルス感染を用いることによって集団内の多様性が失われてしまうことを回避するには突然変異率をあげることが有効であるといえる。

3.4 実行結果 2

ウイルス感染を用いた GP、通常の GP の実行結果を表 3.2 に示す。通常の GP の実行時に得られた結果を落とさないために、この時のウイルス感染 GP の突然変異の確率は 15%とした。その他のパラメータ値は通常の GP の場合と同じである。

表 3.2 ウイルス感染 GP による人工蟻問題の実行結果(50 回)

	平均実行時間(s)	平均適応度	最良適応度を得た回数(回)
ウイルス GP	56.4	60.4	12
通常の GP	192.1	61.4	7

3.5 検証 2

表 3.2 においてウイルス感染を用いた GP の平均実行時間は通常の GP の場合の約 30%となり、大幅に短縮された。これは感染を用いたことによって、交叉を行う位置を決定する処理が不要となりその分の計算時間が短縮されたためである。具体的には交叉を行う位置を決定する処理の回数が通常の場合には世代ごとに個体数回(100 回)行うのに対し、感染の場合にはウイルスの位置を決定する 1 回だけでよいからである。

ウイルス感染を用いることによって最良適応度を得た回数も多くなっている。これは多様性が失われやすい反面、ウイルスが優秀な部分木であった場合には、それを一気にすべての個体に広めることが可能だからである。つまり、局所的な探索能力は向上していると言える。

4 線形構造を用いた GP

4.1 線形構造を用いた GP とは

ポインタでノード同士をつなぐ木構造を 1 次元配列で表現することによって、木構造の解析時にポインタ参照を繰り返すことによるシステムの負荷を低減する。木構造を 1 次元配列で表現する例を図 4.1 に示す。木構造を前置記法で解析し、それを表 4.1 に従ってコード化していく。その結果できたものを遺伝子として扱う。

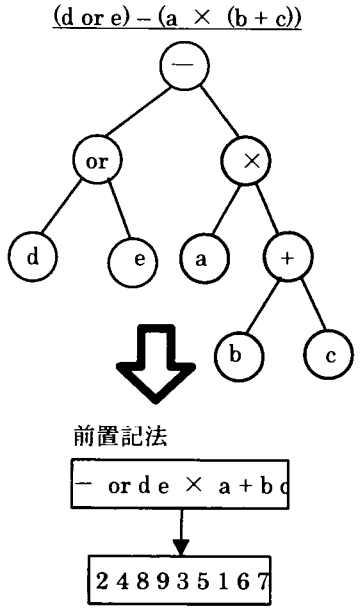


図 4.4.1 木構造を 1 次元配列で表す例

表 4.1 関数のコード化表

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9
関数	+	–	×	or	a	b	c	d	e

4.2 構造解析の方法

終端記号は+1、非終端記号は－1 をする。ある関数からの合計が+1 になる関数までが部分木となる。

– or d e × a + b c

(-1 -1 1 1 -1 1 -1 1 1)

例：×を根とする部分木は

×: -1

a: -1 + 1 = 0

+: 0 + (-1) = -1

b: -1 + 1 = 0

c: 0 + 1 = 1

⇒×から c までが部分木

4.3 実行結果

各種パラメータの設定は通常の GP の場合と同じ。遺伝子の配列サイズは 100 とした。つまり、最大 100 個のノードを持つ個体を作れる。また、突然変異の確率は 5%とした。実行結果を表 4.2 に示す。

表 4.2 線形構造を用いた GP の実行結果(50 回)

	平均実行時間(s)	平均適応度	最良適応度を得た回数(回)
線形 GP	112.9	69.2	12
通常 GP	192.1	61.4	7

4.4 検証

表4.2より線形構造を用いたGPの平均実行時間は通常の GP の場合の約 58%となっている。これはGP を木構造ではなく線形構造を用いて作成することによって、構造解析の際にポインタ参照を何度も繰り返す木構造を用いた場合よりも大幅に処理が軽くなったためである。

また平均適応度・最良適応度を得た回数も改善されている。これは通常の GP の場合には交叉などを行う部分木の決定において、木構造の場合には根から構造解析をはじめていくために根に近い方のノードが選ばれやすい傾向があった。それに対し線形構造では部分木の根を決定するのに、配列の中からランダムに部分木を選ぶことが可能となるので、木構造の場合のように交叉などが行われる場所が偏ってしまうことがない。よって、線形構造の方が集団の多様性は優れていると言える。つまり、線形構造の方が広範囲の探索を行えるので得られた適応度の値が向上したと考えられる。

5 線形構造を用いた GP とウイルス感染を組み合わせた GP

線形構造を用いた GP を交叉のかわりに感染を行うように改良した。3章と同様に置き換えが不可能となった場合にはランダムに新たな場所で置き換えを行うことにした。

5.1 実行結果

突然変異の確率は15パーセントに前述の理由により多様性が失われるのを防ぐためにあげた。その他のパラメータの値は今までと同じである。

表 5.1 線形構造とウイルス感染を組み合わせた GP の実行結果(50 回)

	平均実行時間(s)	平均適応度	最良適応度回数
線形 VGP	55.1	61.4	12
線形 GP	112.91	69.2	12
通常 GP	192.12	61.4	7

5.2 検証

平均実行時間は 4 章の線形構造 GP の約 48%となった。ウイルス感染を用いたことにより 3 章の平均実行時間が通常の GP の約 30%になったという結果ほど実行時間が短縮されなかったのは、線形構造を用いた時点ですでに交叉部分の処理が大幅に軽くなっていたためである。線形構造 GP もウイルス感染を適用することにより平均実行時間は通常の GP の約 30%となっている。

平均適応度はウイルス感染を用いる前に比べて下がってしまっている。これは線形構造を用いることによって広がった多様性がウイルス感染を用いたことによって損なわれてしまうためにこのような結果になってしまったと考えられる。しかし、ウイルス感染は局所探索能力に優れているため最良適応度を得られた回数は保たれている。

6 おわりに

本研究では、人工蟻問題を解く GP を高速化するためにウイルス感染・線形構造を組み合わせて用いたプログラムの作成・検証を行った。検証の結果、線形構造を用いた GP にウイルス感染を組み込んだ方式は、通常の GP の実行時間の約 30%となり、今回作成した方式は有効であるといえる。

しかし、今回の検証では通常の GP にウイルス感染を組み込んだものと、線形構造を用いた GP にウイルス感染を組み込んだものの実行時間の差はほとんどなく、更なる検証と線形構造を用いた GP の実装法の見直しが必要である。

参考文献

1. 平野廣美:遺伝的アルゴリズムと遺伝的プログラミング,パーソナルメディア,2000
2. 中谷直司:ウイルス進化論に基づく進化型アルゴリズム,情報処理学会論文誌,Vol.40,No.5
3. 徳井直生, 伊庭斉志:「汎用 LinearGP システムの構築と評価第 56 回情報処理学会全国大会予稿集(2)」pp. 187–188,1998
4. 伊庭斉志,遺伝的プログラミング,東京電機大学出版局, 1996
5. 萩原将文:ニューロ・ファジイ・遺伝的アルゴリズム, 産業図書,1994
6. 竹内康雄:遺伝的プログラミングにおける連想推論を用いた適応度算出
7. 金子哲也:遺伝的プログラミングを用いた複数制御プログラムの生成

連絡先:
〒214-8571
神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1 (6404)
明治大学 理工学部 情報科学科
工藤 功
電話: 044-934-7442
FAX: 044-934-7912
Email: isaokd@cs.meiji.ac.jp

MaTX を利用した制御工学演習

Exercise in Control Engineering Using MaTX

秋山　孝夫　　大久保　重範
Takao Akiyama　Shigenori Okubo
山形大学　　山形大学
Yamagata University　Yamagata University

Abstract : In this paper, we introduce the exercise in control engineering using free software MaTX at faculty of engineering in Yamagata university.

1．緒　言

最近，工学系大学においては JABEE（日本技術者教育認定機構）[1] の認定水準を満たすべく教育改善が盛んに行われている．専門知識等の定着をより効果的にするための授業改善・工夫もその一つであり，FD（Faculty of Development）[2] の中核としてその重要性が高まっている．

そこで，著者らが所属する山形大学工学部機械システム工学科の授業科目「システム解析及び演習」において実践してきた計算機を利用した制御工学演習の内容を紹介し，ご批判をいただいて授業改善の一助としたい．実際の制御系の解析・設計においては，CAD が利用されており，制御工学の教育においてもその一端に触れさせることや種々の線図を計算機を使って容易に描き視覚に訴えさせることは，教育効果が増すと考えられる．古賀雅伸氏が開発されたフリープログラミング言語ソフトウェア MaTX [3] は，制御系解析・設計が容易に実行できることから，演習等の授業に MaTX を活用する大学も見られようになってきた [4]．以下の各章において，著者らの一人が 2 年間実践してきた MaTX を利用した制御工学に関する演習内容 [5] 等を報告する．

2．授業計画

山形大学工学部機械システム工学科では，4 年次前期において「システム解析及び演習」（4 単位，一週 180 分）という授業科目が平成 5 年度から開講されている．比較的少人数による工学的課題に対する計算機シミュレーション技法の習得等を目標としている．受講学生は 2 班に分かれ，著者らはその中の 1 班の学生に対し，制御工学に関する課題を与えて講義と演習を行ってきた．当初は C 言語を使った計算機演習を行ってきたが，プログラミング言語の扱いやすさに鑑み，昨年度から MaTX に切り替えている．今年度のシラバス [5] に基づいて授業計画を示せば，第 1 週：制御系 CAD の実際例の紹介／第 2 － 3 週：行列計算ソフトウェア MaTX の使い方（基本演算，ベクトル・行列演算，多項式演算，グラフ）／第 4 週：システムの過渡応答（微分方程式，状態方程式および伝達関数間の相互演算，多項式演算，グラフ）／第 5 週：周波数応答法（ベクトル軌跡，ボード線図）／第 6 週：安定性の判別（ラウス・フルビッツの安定性判別法と極，リアプノフの安定定理）／第 7 週：根軌跡（根軌跡の性質と作図）／第 8 週：PID 制御（部分的モデルマッチング法）／第 9 週：可制御性と可観測性（可制御性と可観測性の定義と判別法，対角化）／第 10 週：状態フィードバック制御の極配置法（可制御正準形，レギュレータ）／第 11 週：同一次元オブザーバの構成／第 12 週：同一次元オブザーバとフィードバック制御の併合システム／第 13 週：最小次元オブザーバの構成／第 14－15 週：最適レギュレータの構成である．伝達関数法と状態空間法を併せて取り上げている [11]．初回を除いて毎回演習問題を課し，レポートとして提出させている．

3．授業内容

商業制御系 CAD ソフトウェアとしては，MATLAB [6] や MATRIXx [7] 等が挙げられるが，前者のほぼ互換フリーソフトウェアには，MaTX，Octabe [8]，Scilab [9] がある．著者の授業では，著者自身が使い慣れた MaTX を使った対話型の数値計算を取り入れている．数値計算プログラム作成にあたっては，Octabe で書かれた浪花智英氏のプログラム [10] を参考にした．授業の前半で基礎的事項の解説とプログラムの説明を行い，後半は数値計算演習に充てている．

演習の 1 例として第 10 週：状態フィードバック制御の極配置法 [11] の例題を示せば，以下のようになる．

□ **可制御正準形**

1 入出力システム

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

$$y(t) = cx(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 2 \\ -1 & -4 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, c = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

を可制御正準形に変換する．

```
>> A=[[-1 2];[-1, -4]]
>> b=[1 1]'
>> c=[1 0]
>> Mc=[b, A*b]
>> rank(Mc)
>> p=makepoly(A)
```

特性多項式が s^2+5s+6 となることがわかる.

```
>> T=[b, A*b]*[[p(1), 1][1 0]]
>> Abar=inv(T)*A*T
>> bbar=inv(T)*b
>> cbar=c*T
```

□ **状態フィードバック制御の極配置**

1入出力システム

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

$$y(t)=cx(t)$$

$$A=\begin{bmatrix}-1 & -2\\ -1 & -4\end{bmatrix},b=\begin{bmatrix}1\\ 1\end{bmatrix},c=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}$$

の極を $-1+2j$, $-1-2j$ に設定する状態フィードバック則

$$u(t)=-fx(t)$$

のゲイン f を求める.

```
>> A=[[-1, -2][-1, -4]]
>> b=[1 1]'
>> c=[1 0]
>> Mc=[b, A*b]
>> rank(Mc)
>> p1=makepoly(A)
>> T=[b, A*b]*[[p1(1), 1][1 0]]
>> j=(0,1);
>> p2=makepoly([-1+2*j, -1-2*j])
>> f=[p2(0)-p1(0), p2(1)-p1(1)]*inv(T)
```

初期値 $x(0)=\begin{bmatrix}1 & -1\end{bmatrix}^T$ の場合の応答を確かめる.

```
>> AA=A-b*Re(f)
>> x0=[1, -1]'
>> t=[0.0:0.05:5];
>> {y,x}=lsim(AA,[0 0]',c,[0],0*t,t,x0);
>> mgplot(1,t,x);
>> mgplot(2,t,y);
```

授業では，例題を実行させるとともに例題と類似した演習課題を与えている．第10週の演習課題[12]を以下に示す.

1．次の1入出力システムの可制御正準形を求めよ.

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

$$y(t)=cx(t)$$

（1） $A=\begin{bmatrix}2 & 1\\ 1 & 3\end{bmatrix},b=\begin{bmatrix}1\\ 0\end{bmatrix},c=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}$

（2） $A=\begin{bmatrix}1 & 0 & 1\\ 1 & 2 & 0\\ 0 & 0 & 3\end{bmatrix},b=\begin{bmatrix}1\\ 1\\ 1\end{bmatrix},c=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\end{bmatrix}$

2．状態フィードバック制御によって次の1入出力制御系の極を任意に置くことができるかを判定し，可能であれば指定された極を実現する状態フィードバック係数ベクトルを求め，レギュレータの応答を描け.

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

$$y(t)=cx(t)$$

（1） $A=\begin{bmatrix}1 & 2\\ 0 & 1\end{bmatrix},b=\begin{bmatrix}1\\ 1\end{bmatrix},c=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}$,

$x(0)=\begin{bmatrix}1 & -1\end{bmatrix}^T$,

極：-3, -4

（2） $A=\begin{bmatrix}-1 & 0 & 0\\ 1 & 1 & 0\\ 2 & -1 & 2\end{bmatrix},b=\begin{bmatrix}1\\ 1\\ 1\end{bmatrix},c=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\end{bmatrix}$,

$x(0)=\begin{bmatrix}1 & 2 & -1\end{bmatrix}^T$,

極：-1, -2, -3

本例題及び課題はほとんど筆算でも求められるが，レギュレータの時刻歴応答のグラフを描くことは容易ではない．しかし，計算機を利用すれば，グラフは簡単に求められ，現象の理解を助けることになる．また，煩雑な行列演算も容易に行うことができる．さらに，計算機の利用により基本的なベクトル線図やボード線図（片対数線図）[11]等も容易に描ける．グラフや線図を手軽に描けるツールを提供することは，学習者にとって理解度が増すことになる.

4．授業評価・課題

今後，今年度の受講生からアンケート形式による授業評価を受ける予定である．その結果は講演時に報告する．今後の課題としては，アンケート結果等に基づく演習内容の更なる見直しである.

5．結　論

昨年度から講義内容の理解をより深めるために，MaTX による制御工学の計算機演習に取り組んできた．例を挙げて授業内容を具体的に紹介した．試行錯誤の段階ではあるが，更なる内容充実に向けた授業改善を図りたい.

参考文献

1．ホームページ http://www.jabee.org/.

2．（財）大学セミナー・ハウス編，大学力を創る：ＦＤハンドブック，東信堂，1999.

3．古賀雅伸，制御・数値解析のための MaTX，Linux・Windows でできる MaTX による数値計算，東京電機大学出版局，2000.

4．ホームページhttp://www.matx.org/ .

4．SYLLABUS（授業計画）Ａコース，2003，山形大学工学部，103.

6．ホームページhttp://www.cybernet.co.jp/matlab/.

7．ホームページhttp://www.windriver.com/.

8．ホームページhttp://www.che.wisc.edu/octave/.

9．ホームページhttp://www-rocq.inria.fr/scilab/.

10．浪花智英，Octave/Matlab で見るシステム制御，科学技術出版，2000.

11．森泰親，制御工学，コロナ社，2001.

12．田中幹也ほか２名，現代制御の基礎，森北出版，1999.

連絡先

〒992-8510　米沢市城南４丁目３－16

山形大学工学部機械システム工学科　秋山孝夫

工学教育用ロボットの開発

Development of Robot for Engineering Education

小松崎年雄
Toshio Komatsuzaki
八戸工業大学
Hachinohe Institute of Technology

横地弓夫
Yumio Yokochi
八戸工業大学
Hachinohe Institute of Technology

藤田成隆
Shigetaka Fujita
八戸工業大学
Hachinohe Institute of Technology

Abstract: Recently, thing-making becomes more important in the engineering education of the university. The elementary knowledge of the electronics, information and mechanical engineering can be learned by making suitable robots. So, for the education, we developed robots which filled the following conditions. 1) An electric circuit is simple and easy. 2) Material fee is cheap. 3) Programming is easy. 4) It is possible to make high function robots on this roboto. 5) Parts of robots can be recycled.

1．はじめに

ロボット工学の基礎は、電気電子、情報、機械（機構学）工学分野の総合領域から成り立っている。ゆえに、ロボット作製にはそれらの分野の総合知識が要求され、初心者にはややとりつきにくい分野となっている。しかし、逆に、ロボットを作ることにより電気電子、情報、機械工学の基礎知識を学ぶことができるともいえる。ゆえに、学生が興味を持つ「ロボット作り」を通して、電気電子、情報、機械工学の基礎を学ぶことができれば理想的教育ができる。そこで、本報告では、次の条件を満たすような教育用ロボットを開発した。1)電気回路がシンプルでやさしく理解しやすい。また、電子部品になじめる。2)制作費が安く、一人一台づつ製作できる。3)やさしく理解できるＣ言語、およびフリーソフトのＣコンパイラを使用する。4)発展性がある。5)部品はリサイクルが可能なものとする。

2．障害物回避ロボットＩ（入門用）

本論では、ロボットの機能である入力（センサ）→CPU→出力（モータ）を持つ一番簡単な自律型ロボットの開発を行った。センサは赤外線センサ S7136（浜松フォトニクス社)、CPU はワンチップマイコン PIC16F84 (Peripheral Interface Controller)、モータドライバ IC は M54544AL（TA7291P でも可）を用いた。これらの電源は、電池（4.5V, 3V）である。また、赤外線発光ダイオードは、TLN110 を選んだ。プログラムはＣ言語を用いた。

製作したロボットの動作は、電源を入れると前進し、正面の障害物に跳ね返った赤外線をＳ7136 が受光した場合、後退、右回転、その後前進するという回避行動をとるようにプログラムした。。

2．1　電気回路

このロボットの全体の電気回路図を図 1 に示す。LED は、PIC まわりの回路および赤外センサまわりの回路が正確に配線されているかの確認のために接続されている（LED の接続は電気回路の入門として、LED の点滅はロボット動作プログラミングの入門ともなる)。

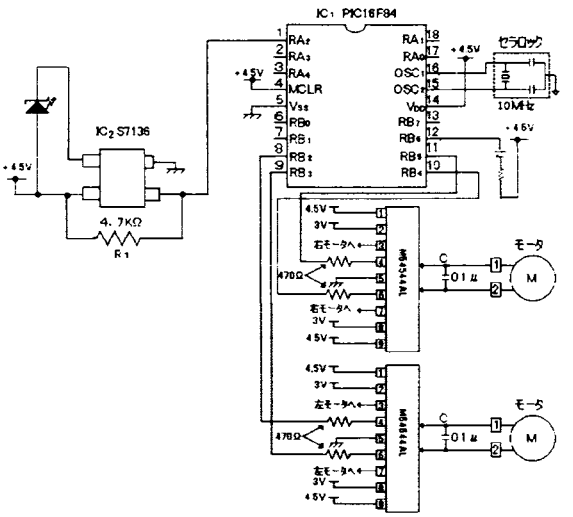


図 1　障害物回避ロボットＩ電気回路図

2.2　駆動部部品リスト

ギヤ部：　タミヤツインモータギヤーボ

ックス、
モータ:　マブチ　ＲＥ１４０、
タイヤ:　タミヤスポーツタイヤセット

2.3　プログラム

PICに書き込むプログラムに使用するPIC用のＣ言語コンパイラとしては、CCS コンパイラが標準である。しかし、CCS コンパイラは使い易いが高価である。そこで、PIC16F84 のＣ言語コンパイラとしてフリーソフトであるPICC-LITE を採用した。プログラムは、if-else、while、および関数のみを使用し、初心者でもわかりやすいものとした。プログラムは、基板に取り付けられた LED の点滅プログラム、赤外センサが感知すれば LED が点灯するプログラム等を実習しながら学べるよう工夫した。また、これらのプログラムは各電気回路が正確に配線されているかの検査用にも用いることができる。

３．障害物回避ロボットⅡ

次ぎに、前節で述べたロボットの発展したものとして、検知用の赤外線発光ダイオード２個により左右の障害物を検知でき、また障害物を回避する行動も左右回転するロボットを開発した。

3．1　電気回路

赤外線センサまわりの電気回路図を図 2 に示す。前節述べたロボットとの回路の違いは、センサまわりである。すなわち、前節で述べたロボットＩの赤外線発光ダイオードの電源は、直接 4.5ｖ電源から取った。ここでは、図2のように、赤外線発光ダイオードを2個とし、またその電源をワンチップマイコンPICのRB1ポート、RB6 ポートよりとっている。 また、赤外線発光ダイオードとして TLN205 を用いた。

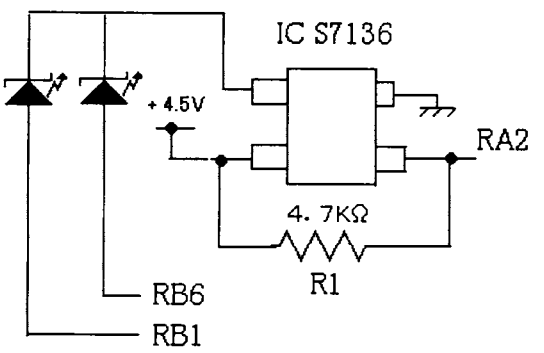


図２　ロボットⅡのセンサまわりの回路図

3.2　プログラム

プログラムは、左右の赤外線発光ダイオードを交互に発光させている。左の赤外線発光ダイオードが発光しているときにセンサが検知したときは、左に障害物があるのでバックした後に右に回転し、その後前進して障害物をさける行動をとる。また、右の赤外線発光ダイオードが発光している場合も同様で、このときはバック後に左に回転するようにプログラムしている。 プログラムも前節のものを発展したものとなっている。

４．割り込みを持つ障害物回避ロボットⅢ

さらに、前節で述べたロボットを発展させたものとしてにコンデンサマイクを取り付け、音による割り込み処理を持つロボットを開発した。このロボットは、電気回路的には、コンデンサマイクからの出力電流は微少なので、IC LM324 により増幅している。LM324 の電源は５Ｖなので３端子レギュレータにより５Ｖをとりだしており複雑となっている。プログラムも音による割り込み処理を行っておりやや高度になっている。

５．おわりに

本研究では、１節で述べた条件１）～５）を満たすロボットの開発を行った。 このロボットは、実際に本学の電気電子工学科１年の「基礎ロボット工学」のなかで製作している。また、高校からのインターンシップの教材としても用いている。

ロボット教育は、低学年からの必要を感じ、小中学生用のロボット開発（C 言語ソフトを含む）を行っている。

プログラムの例

```
//赤外線センサチェックプログラム
#include <pic.h>
void main()
{
  TRISA=1;    //A ポートを入力用に設定
  TRISB=0;    //B ポートを出力用に設定
  RA2=1;       //入力ポートを初期化
  RB7=1;       //出力ポートを初期化
  while(1){
      if(RA2==0)      //赤外線入力あり
        {  RB7=0;  }      //点灯
      else             //赤外線入力なし
        {  RB7=1;  }      //消灯
          }
}
```

ロボットの実在性とマンガの想像性を融合した創造性育成法の開発

Development of the Creativity Raising Method for Having Used the Robot and Manga

王　碩玉[1)]　牧野　圭一[2)]　河田　耕一[1)]　井上喜雄[1)]　土谷　武士[3)]
Shuoyu Wang　Keichi Makino　Koich Kawata　Yoshio Inoue　Takeshi Tsuchiya

1)：高知工科大学　2)：京都精華大学　3)：北海道大学

Kochi University of Technology,　Kyoto Seika University,　Hokkaido University

Abstract : Our research target is developing creativity training methods. We have proposed a new creativity training model. This original model will be called spiral cycle of creativity training. In this report, the robot's actuality and the imaginative power of MANGA are used as a concrete method of realizing the spiral cycle of this creativity training. Since the experiment for a schoolchild was conducted based on the spiral cycle of this creativity training, finally the result is explained.

1．はじめに

昨今、児童生徒の「科学技術離れ」「理科離れ」の懸念が様々な場面で指摘されている。「科学技術創造立国」を実現していくためには、将来の科学技術を担う児童生徒に科学技術や理科・数学に対する興味・関心を培い、自然についての知的好奇心、探求心を高め、論理的思考力や創造性を伸ばし将来有意な人材を育成していくことが必要不可欠である[1]。

創造性育成の代表的事例としては体験教室や工作などが挙げられるが、実在性を強調する反面、想像性を軽視する傾向がある。創造力は、経験のない事物や現象を頭の中に思い描きながら目的を設定する力と、その目的を達成するために具体的な問題を解決する力からなっており、豊かな感性から生れ、想像できる空間で高められ、そして現実世界で確められるものである。また、真の感性は現実の世界からしか得られな い。よって、創造性育成は想像と実在の間で行うべきである と考えている。本研究では，実世界とのインタラクションを通じて、子供の感性の向上に着目し、創造性育成モデルを提案することを最終目的としている。今回の報告では、創造性育成モデルについて述べ、本モデルに従って、基礎実験により確認できた事項について説明する。

2．創造性育成のスパイラルサイクル

ここで提案する創造性育成モデルを図１に示し、創造性育成のスパイラルサイクルと呼ぶことにする[2] [3]。

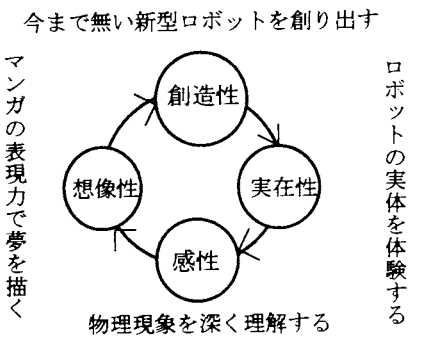


図１ 創造性育成法モデル

図１に示すように、創造性育成のスパイラルサイクルは四つの要素つまり、実在性、感性、想像性、創造性から構成されている。これらの要素は環状に関係しており、実在の道具や材料を見たり触ったりすることで実体験をし、その現象や原理について深く理解し、イメージを膨らませて、何かを創り出すという「もの作り」考え方から生まれている。具体的な創造性の育成手段として、実在性においてロボットの実態を体験する。感性において物理現象を深く理解する。想像性においてマンガの表現力で夢のロ

ボットを描く。創造性において今までに無い新型ロボットを創り出す。この一連の作業をサイクルとして繰り返すことにより、創造性の向上が期待される。次に各要素について詳細に述べる。

2．1　現実性と感性

ロボット作りやロボコン参加をすることで、創造性を向上するアプローチの有効性がすでに認められている[4][5]。ここで図1に示すように、現実性のフィールドでは、ロボットの持っている実体性を利用し、子供がロボットに、触れる、乗る、操縦するという実体験を通じて、図1に示すように次のステップとして「感性」の向上を誘発する。人間は幼い頃の体験によって、その後の人生に大きな変動をもたらす。幼児期の子供は、好奇心が旺盛なので、外界からの刺激に応じて、思考が始まったり、感情が生まれたりする傾向にあり、この時期で真の感性が育てやすい。よって、感性向上の教育方法の取り組みとして、良い物にできるだけ多く触れる機会を与えることが最適だと考えられてきた[7]。

ところで、感性を育成する立場から、一般的に感性を「物事の価値、価値観に気が付く能力」と広意味的に定義されている[6]が、本研究では、狭い意味ではあるが、感性をより具体的に考えている。すなわち、ここで感性とは速度や加速度など物理的な量に対しての感受性、高速で走っている物体が急に止まれないなどのような物理現象に対しての理解度を指す。したがって、真の感性は現実の世界からしか得られない。具体的には図1中の実在性のフィールドで、ロボットに乗り込んで操縦をしたり、観察をしたりする事で、重力やその振動を体感し、物理的概念や現象を身をもって理解する。

最初に我々がロボットを用意する必要がある。子ども達に、実体としてのロボットの認識をあたえ、なおかつロボットに対する自由なイメージを拘束しないものとして、今回宇宙を飛び回る「UFO 型ロボット」というテーマで開発をする。具体的には第3章　感性の向上を目的とした「UFO 型ロボット」に示す。

2．2　想像性

実体験をする事で、子供の持っていたイメージをより現実的に近づけるという意味では、想像性の幅を狭くするといっても過言ではない。そこで、この図1に示すように、創造性のフィールドにおいては、マンガの持つ想像力を利用することで、狭くなった子供に空想できる領域を提供する。通常、マンガと学術的要素とは掛け離れ、娯楽的要素が強いが、本研究では、子供の内面に持っている、自由な空想性を外に発散する機会として利用する。マンガを用いてほしい、創りたい夢のロボットを描く特長しては、まず物の形や特徴をうまく強調したりして、目に見えない物理現象をも自由に表現できる。次に文字より遥かに多い情報が伝達できる。更にストーリー性も用意に表せる[8][9]。なんのために書いているのか。何を伝えたいのかという事をマンガで描くことで、子供に思考させることができる。子どもにとってはマンガが紙の上に自由な夢を描く手段として最適である。よって、この空想性フィールドでは、子供に対して、実際に乗ってみたい、作ってみたいロボットのマンガを書かせ、創造性への準備を行う。

2．3　創造性

用意した現実「UFO 型ロボット」に感性で触れ、自分の作りたいロボット、夢のロボットについて空想し、「マンガ」で表現をした子ども達の次のステップとして、「ロボット作成教室」を提案する。これは実際に子ども達が自分たちで形や構成を設計してロボットを作り、空想を具現化する力である創造性の向上を目的としている。その際、既存のロボット作成キットではなく、我々の提案するロボットのパーツセットを使用する。その理由として、従来のキットでは技術的なしきいが高く、子どもが短時間で理解しながら作業をするのが困難であること。一部のものを例外として、その多くは説明書のとおりにしか作れないこと。作った物の規模はあくまでおもちゃの域を出ず、何かに役立てる物をつくる方法が学べたという達成感が薄い事などが上げられる我々の用意するロボットのパーツセットの狙いは、プラモデルのように与えられた説明書をなぞるのではなく、子ども達自身が自分で考え、設計し、組み立て、遊び方を考え、特徴を理解することで創造性を高めるツールを目指す。具体的には第4章　創造性の向上

を目的とした「ロボット製作教室」に示す。

3．創造性向上を目的とするロボット

子供たちにロボット操縦の実体験を与え、物理現象への興味から感性の向上を図る「UFO 型ロボット」を図２に示す。

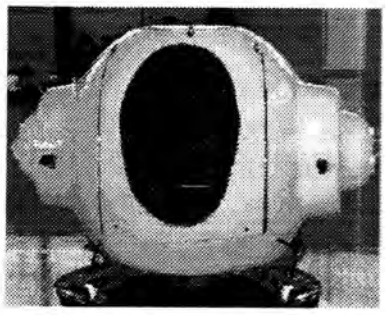


図 2　UFO 型ロボット

球型アクチュエータ４個［11］を擁する土台はアルミ製の中空フレームを使用している。操縦者の乗り込むボディはＦＲＰで成形している。移動機構として、球型アクチュエータ４個による全方向移動機構を採用。正面の窓による視界は狭いため、CCD カメラ３台で視角補助をおこなう。また、両サイドから後方にかけて対物センサを配置し、壁の接触などに対する安全対策をおこなっている。

実際に子ども達がロボットを作り、空想を具現化する創造性の向上を目的として、ロボットを製作する。その際、既存のロボット作成キットではなく、図３に示すような、我々の提案するロボットのパーツセットを使用する。

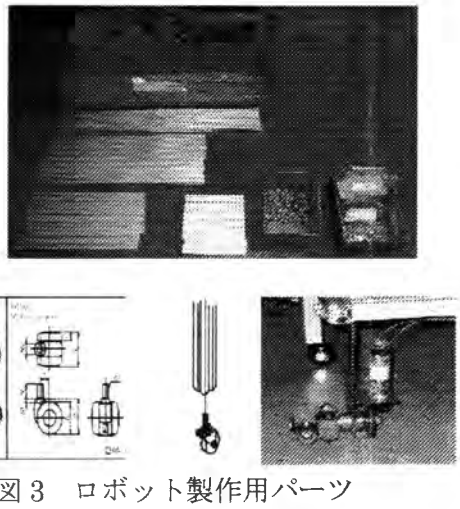


図３　ロボット製作用パーツ

4．実験結果

小学一年生２８名を対象として、図４に示すように創造性育成の一次実験を行った。

図３　試乗実験様子

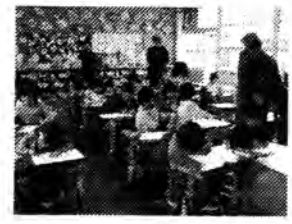


図４　夢をマンガで表現

創造性育成のスパイラルサイクルにしたがって、まず写真４に示すように、試乗の前にマンガ教室を開き、「乗りたいUFOロボット」というテーマを与えて、自由に描いてもらった。その後、個人ごとに試作したロボットに乗って、ロボットの実在性に対して感性的な理解を得た上で、再度テーマである「私のUFOロボット」を想像しながら描いてもらった。

図５　試乗前に描いたロボット

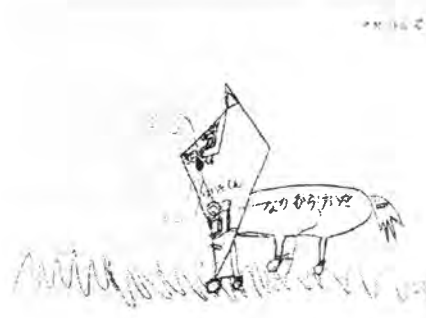


図６　試乗後に描いたロボット

図５と図６はA君は描いたマンガであるが、試乗する前後の作品を比較すると、ロボットの物理実在性を理解でき、想像力が膨らまれたことが判った。これはAだけではなく、実験結果から大体同じ傾向にあることが言える。すなわち、テレビや絵本から

影響を受けた所為か、乗る前のワンパターンUFOロボット作品に比べて、試乗後に多様なユニックなUFOロボット作品が現れたからである。アンケートも取ったが、小学一年生の場合は文字や言葉よりお絵かきの表現力が遥かに豊かであることが分かった。

5．まとめ

本研究は、14年度より三年間の計画で研究している。創造性育成モデルとして図1に示す創造性育成のスパイラルサイクルを提案し、基礎実験を行った。現時点では下記の諸点について確認できた。これらの結果は今後本研究を展開していくにあたって重要な基礎になると考えている。

(1) 子供達が実物に興味を持っている。

(2) 試乗や手作業が想像性を促進する。

(3) マンガやお絵描きが有効な表現手段である。

今後より用意に使用できるパーツの開発と、距離型ファジィ推論[14]による創造性の定量化を行う予定である。

謝辞： 本研究は文部科学省科学研究補助金費特定領域研究『新世紀型理数科系教育の展開研究』から研究費の一部分をいただきました。ここで筆者らの創造性育成のスパイラルサイクルをご理解くださった審査員の皆様に深くお礼申し上げます。また、本研究に興味を示し、積極的に手伝ってくれた院生の浜口和洋君と野村和寿君に感謝を表す。最後に実験にご協力頂いた片地小学校の先生方々と生徒達、本当にありがとうございました。

〒782-8502 高知県香美郡土佐山田町宮ノ口185番地
高知工科大学工学部知能機械システム工学科 王 碩玉
TEL: 0887-57-2306 FAX: 0887-57-2320
E-mail: wang.shuoyu@kochi-tech.ac.jp
http://www.mech.kochi-tech.ac.jp/staff/wang/index.html

参考文献

[1]増本健：新世紀型理数科系教育の展開研究, http://risuka.ei.tohoku.ac.jp/rsroot/mainmenu.html

[2]王碩玉、牧野圭一、河田耕一、井上喜雄、土谷武士：ロボットの実在性とマンガの想像性を融合した創造性育成法の開発、特定領域研究申請書(2001)

[3]浜口和洋，王碩玉，河田耕一，北野斎一：創造性育成を目的とするUFO型アミューズメントロボットの開発，第6回知能メカトロニクスワークショップ論文集, pp. 65～70（2001）

[4]森正弘:ロボコン博士のもの作り遊論, オーム社,（1999）

[5]油田信一:ロボットを通した工学教育, ロボット学会誌, vol.16, no.4,pp21-22（1998）

[6]河田耕一: 生産技術者と感性、日本機械学会誌、102,965, pp221-225 (1999)

[7]片岡徳雄:子どもの感性を育む、NHKBooks(2000

[8]牧野圭一：古今東西- マンガが面白い理由, 東京都現代美術館現代マンガ学講座(1998)

[9]牧野圭一：マンガ学・情報圧縮の視点から見たマンガキャラクター—熟語的発想法, スタンフォード大京都研究センター講演（2001）

[10]日本創造性学会：創造性研究4－創造と教育－, 共立出版株式会社

[11]Wada Masayoshi･Haruhiko H Asada : Design and Control of a Variable Footprint Mechanism for Holonomic Omnidirectional Vehicles and its Application to Wheelchairs, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, vol15, No6 , 978-989 (1999)

[12]王碩玉，河田耕一，石田健司，木村哲彦，土谷武士：健康増進機能と全方向移動機能を備えた電動車椅子による健康増進実験，第19回日本ロボット学会学術講演会論文集，Vol.2，pp.457-458（2001）

[13]K. Sinomiya, S. Y. Wang, K. Ishida, T.Kimura : Development and Muscle Strength Training Evaluation for Horseback Riding Therapeutic Equipment Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.14,No.5, pp.48-56 (2002)

[14]王碩玉，水本雅晴，土谷武士： 命題真理値を考慮した距離型推論法，バイオメデカルファジィシステム学会論文集，Vol.2, No. 1, pp.1-16(2000)

[15]浜口和洋： ロボットの現実性とマンガの想像性を融合した創造性育成法の開発，高知工科大学修士論文(2002)

[16] 野村和寿：感性、創造性の向上を目的とした教材としてのロボットの開発，高知工科大学修士論文(2002)

教育評価へのファジイ推論の応用

Application of Fuzzy Logic Inference to Education Skill Evaluation

－システム設計を面白くするコツ－

Hints for Teaching the System Design Techniques

高橋恒介（Kousuke Takahashi）
静岡産業大学国際情報学部
Shizuoka Sangyo University、Faculty of Communications.and Informatics

Abstract： The skill-up education program has been designed and analyzed based on the transitive fuzzy logic-inference model. It is figured out that the education quality in the training can be evaluated by the fuzzy logic inference fidelity.

1．まえがき

システム設計教育にかぎらず、スキルを向上させる教育では、スキル目標に到達に至るメソッド付演習課題を要素とする教育プログラムが使われる。著者の場合、3年次の学生に対してシステム設計演習の授業でスキルアップの教育プログラムを行う。各目標に向けた演習課題を分割してスキルアップをし易くする教育プログラムの設計と分析にファジイ推論モデルを適用した。

2．システム設計演習でのスキルアップ

たとえば、**表計算ソフトを使って時刻を入力するスキルを学ぶ演習課題の場合にスキルの課題を以下の3段階に分けて達成させる。**

Ⅰ)現在時刻を表示する NOW 関数を使う。

Ⅱ)データ入力時点の時刻を保持させる。

Ⅲ)注文時刻の表示の書式を決めさせる。

スキル学習課題

スキルⅠ	NOW関数の使用	2003/6/22 16:12
スキルⅡ	形式指定 貼付け	37794.5967
スキルⅢ	セル書式:日付	2003年6月22日
スキルⅢ	セル書式:時刻	14時19分

時刻入力のスキル獲得(10分以内でできるか？)

図 1.演習課題を 3 段階に分割の例

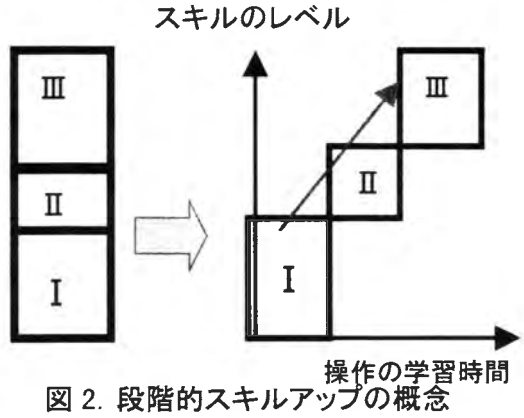


図 2. 段階的スキルアップの概念

図２は、図１に示すような３つの操作の合体したスキルを分解して教育すると、学生は個々の課題を短時間で楽しく達成できる。また、このような演習を通して学生は、以下のことを学ぶ。

①時刻入力処理が意外に簡単な基本処理の組合せで実現できることを理解し、

②HIPO(階層的入力処理出力)の設計概念を学べ、

③基本操作を正確に連結して処理操作を覚えるとマクロ登録で苦労しないことを知り、

④学生の持つノート PC がかなり高度な情報処理システムの実現能力を持つことを理解し、多くの機能を引き出すスキルを学ぶようになる。

3. 教育におけるファジイ推論モデル

演習授業の教師は学生がレベルⅠなら

自分のメソッド付演習課題を体験することでレベルⅡに到達すると確信し、「レベルⅠ→レベルⅡ」という含意を信じる。同様に、上記の含意につづく演習においても、たとえば、含意「レベルⅡ→レベルⅢ」や「レベルⅢ→レベルⅣ」を信じる。連結することで学生が演習によりレベルⅣに到達するという「レベルⅠ→レベルⅣ」の含意を信じる。これを図示すると以下のようになる。

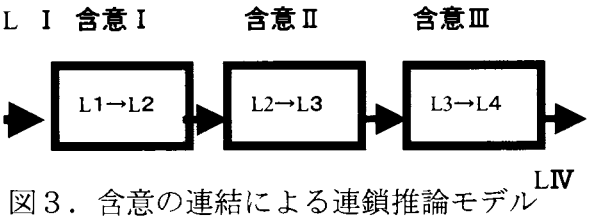


図３．含意の連結による連鎖推論モデル

課題を分割しないで、学生をレベルⅣに到達させる演習は下図のファジイ推論モデルで記述される。

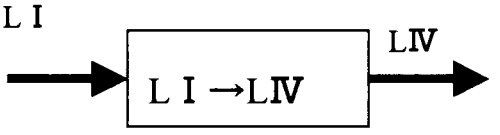


図４．従来のスキルアップの含意

図４の演習教育が成功するのは、学生が演習授業を受ける前にレベル Ｌ１以上であるときである。この教育に対する含意の真理度R14は次のファジイ含意の論理式で決められる。

R14==MAX([LⅣ]、１－[Ｌ１])

すなわち、[LⅣ]は学生が演習で目標のレベルに到達したという命題の真理度であり、［Ｌ１］は学生がレベルⅠに到達している命題の真理度である。（１－［Ｌ１］）はレベルⅠに達していない命題の真理度になる。つまり、[Ｌ１]が１に近いとMAX演算式の後者が小さいので、[LⅣ]がR14に等しいと推論される。学生が演習後にレベルⅣに到達する確信の度合いがR14で表される。

4．Fidelity（信用度）

教師の演習授業での信用度は授業を行ってほとんどの学生がレベルⅠからⅣへ到達することで得られる。教師の頭の中では

R14＞（１－［Ｌ１]）、[LⅣ]=R14

という条件式にしたがったファジイ推論でスキルアップが達成されると信じる。

しかし、実際には、学生のスキルがばらついている。教師の不安は不等式の左辺と右辺の差（推論フィデリティ）で表される。

F14=R14 －（１－［Ｌ１]）
=R14＋［Ｌ１］－１

フィデリティF14が大きければ、教師の思い通りのスキルアップが達成され、教育に対する信用度が上がる。

学生の初期スキルがレベルⅠに至っていないと、[Ｌ１]が１より小さくなり、その分だけ、F14が減る。つまり、学生の初期のスキルレベルが低いと結果として教師の教育への信用度も下がることになる。これが図４の問題である。

5．教育プログラムの最適化

そこで、スキル達成目標を図３のように分解する。

スキルⅠの学生に含意LI⇒LⅡを適用して学生をスキルLⅡに到達させることを
（Ⅰ、LI⇒LⅡ）→LⅡ　で表し、
スキルⅡの学生に含意LⅡ⇒LⅢを適用し、学生をスキルⅡに到達させることを
（Ⅱ、LⅡ⇒LⅢ）→LⅢ　で表し、
スキルⅢの学生に含意Ⅲ⇒Ⅳを適用し、学生をスキルⅢに到達させることを
（Ⅲ、LⅢ⇒LⅣ）→LⅣ　で表すと、

これらの連結で得られるファジイ推論は
（Ｌ１，LI⇒LⅡ、LⅡ⇒LⅢ、
LⅢ⇒LⅣ）→LⅣ
で表される。

このようなファジイ連鎖推論で上記のフィデリティはどうなるかを考える。

含意LI⇒LⅡ、LⅡ→LⅢ、LⅢ⇒LⅣの真理度をそれぞれ、R12、R23、R34で表し、レベル命題ＬＩ、LⅡ、LⅢの真理度を[ＬＩ]、[LⅡ]、[LⅢ]で表すと、これらの含意の論理式は

R12＝max（１－[LI]，[LⅡ]）、
R23＝max（１－[LⅡ]、[LⅢ]）、
R34＝max（１－[LⅢ]、[LⅣ]）、

であらわされる。これらの式から、
R12＞（１－[ＬＩ]）であれば、 [LⅡ]=R12
R23＞（１－[LⅡ]）であれば、[LⅢ]＝R23
R34＞（１－[LⅢ]）であれば、[LⅣ]＝R34
であるというファジイ推論が成り立つ。

スキルレベル ＬＩの学生がスキルアップ演習でレベルLⅣに到達する条件式を
R12＞（１－[ＬＩ]）から、f12=（[LI]＋R12－１）＞０　であれば、［ＬⅡ］＝Ｒ12
R23＞（１－[LⅡ]）から、f23=（R12＋R23－１）＞０　でれば、［ＬⅢ］＝Ｒ２３
R34＞（１－[LⅢ]）から、f34=（R23＋R34－１）＞０　であれば、［ＬⅣ］＝Ｒ34
で表すと、f12>0、ｆ23>0、f34＞0が共に成立するときに、連鎖推論によって学生がレベルⅣに到達すると結論される。

f12、ｆ23、f34の中のどれか１つでもが負になると連鎖が途切れる。ということで、min（f12、ｆ23、f34）が連鎖推論の信用度(fidelity)であり[2]、演習課題分割の教育プログラムの信用度に対応つけられる。

このフィデリティが前節に登場した F14＝（R14 ＋［ＬＩ］－１）と比較される。達成目標の課題を小さく分割し、min（f12、ｆ23、f34）の中のいずれもが F14 より大きくなるように演習課題を作れるということで、教育プログラムが改善される。

5.教育プログラムのさらなる改善策

演習課題を多段階に分割しても、学生の初期スキルがレベルＩに達していないと、たとえば、最初の演習での教育指標となる推論の信用度が、

f12=（[LI]＋R12－１）

[LI]の低下によって、低減し、結果として信用度 min（f12、ｆ23、f34）が低下するという不安が残る。

これを回避するため、教育プログラムの中に、学生の初期スキルをレベルＩに整える含意の演習を追加することを考えた。

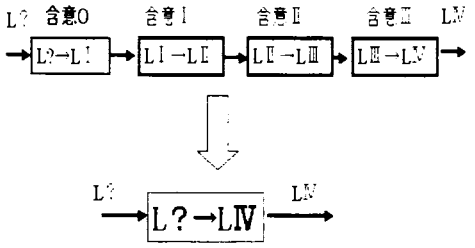


図５．予備教育を加えた教育プログラム

学生の初期スキルが ＬＩでなくても、含意Ｌ?→ＬＩを追加して、学生の初期スキルをＬＩに整える。年度によってＬ?→ＬＩに対応する演習の仕方が変化するが、これを追加することで、ＬＩ以降の教育プログラムを変えないで、有効に利用できる。つまり、信用度は以下のようになる。

min （f01、f12、ｆ23、f34）

f01だけが不確定であり、f12、f23、f34は実績に支えられ、どれも高く保持される。初期スキルを揃える教育の信用度(f01)だけは学生のスキルの影響を受けるが、予備演習の課題は元々レベルが低いので、数回の演習でレベルL1に整えられる。つまり、

ｆ01＝（R01 ＋［Ｌ？］－１）

はそれほど下がらない。これがトータルの教育の信用度を高めることになる。

6．スキルアップ未達成の原因分析

目標スキルは大きくは以下の３つに分けられ、各々が幾つかのサブ目標スキルに分けられる。

１）表計算ソフト(関数)を使うシステム設計。この段階の先頭に予備教育プログラムを追加される。

２）マクロ登録機能を取入れたシステム設計。

３）VBAなどのプログラミングを組み合わせたシステム設計。

サブ目標スキルも演習ごとで小さく分けられる。スキルアップのための演習課題が考えられ、教育プログラムが作られる。

その教育プログラムの設計に際しては、常に、演習時間に関する実績データを収集

し、どういう原因でスキルアップが達成できなくなるかを調査分析する。すなわち、演習の都度、学生に課題ごとの達成時間を記入させる。90 分授業で 60 分程度で完成するように課題を設定して、達成時間がその通りになれば、スキルアップ含意の真理度を高く設定する。40 分から 90 分以上にばらつく場合は、含意の真理度が低くされる。真理度は過去の実績で決まり、演習課題に無駄や無理が無くなると、高くなる。

スキル不足の原因分析に際しては、演習課題を時間内に達成できないのはその前の課題が達成できていないという対偶含意を考える。図 2 の例で説明するならレベルⅣに到達しないのはレベルⅢに到達していなかったからだという後向き推論の対偶含意

¬LⅣ⇒¬LⅢ

を頭に描く。これを用いる後ろ向き推論は、

（¬LⅣ、¬LⅣ⇒¬LⅢ）→¬LⅢ

で表される。この推論を前に辿っていくと、以下の図に示される後向きファジイ連鎖推論（¬LⅣ, ¬LⅣ⇒¬LⅢ、¬LⅢ⇒¬LⅡ、¬LⅡ⇒¬LⅠ）→¬LⅠが起こる。つまり、演習でレベルⅣに到達できないのは、演習開始時にレベルⅠでなかったからか、あるいは演習を途中で欠席したからだと判断する。

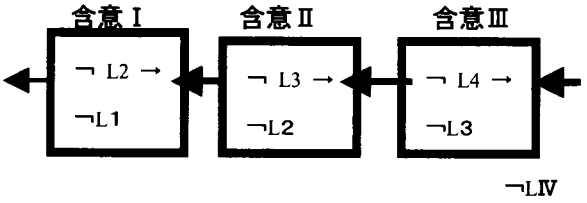


図6．対偶含意による後向き連鎖推論モデル

この対偶含意に基づく後向きファジイ推論は、対偶含意の論理演算式が

R43 =max（[ＬⅣ]、1－[LⅢ]）＝R34

であるから、

R43> [ＬⅣ]、1－[LⅢ]＝R43

となる。後向きファジイ推論の信用度は、

ｆ43=R43－［ＬⅣ］

で表される。

［ＬⅣ］が低いのは［ＬⅠ］が低いか、欠席があったからだと考える。総合的な連鎖推論の信用度は

ｍｉｎ（ f43、f32, f21 ）

で表される。ここに、

f32＝R32－［ＬⅢ］

f21＝R21－［ＬⅡ］

原因は f43、f32, f21 の中で最も低い値の後向き推論にあるといえるが、多くの場合、演習の途中を欠席することに由来する。

色々な演習課題は、演習課題の達成時間の分析によって選択される。レベルⅠの学生をレベルⅡに到達させるに最も良い演習課題がレベルⅠからレベルⅡへのスキルアップ演習に利用される。達成時間にばらつきの大きくならない(無理や無駄の無い)演習課題を見付け出して、教育プログラムを組み立てる。

9．結論および考察

システム設計を学生に楽しく学ばせるコツがあるのかどうかは分からないが、すでにある教育プログラムを改善するには何らかの対策がありそうである。スキルの効果的な達成に都合の良い演習課題を見つけることであるが、その根底にはファジイ推論モデルでの推論の信用度（フィデリティ）を高めるための努力が必要であるとわかる。今後、学生が演習を１０回に１度ぐらいは欠席する場合の演習システムも考慮してみたい。

参考文献

1）K. K Thornber: "The Fidelity in Fuzzy-Logic Inference" , IEEE Trans. On Fuzzy Systems, Vol.1(4), pp.288 - 297 (1993)

2) K. K Thornber: "A Key to Fuzzy-Logic Inference" , Int. J. Approx. . Reasoning 8 pp.105-121 (1993)

3) 高橋恒介「ファジイ論理の連鎖推論とその応用方式」、電子情報処理学会 CPSY94-103(1995-01)

4）L.A.Zadeh;"Fuzzy Sets",Information and Control 8， pp338-353、(1994)

[連絡先]
静岡産業大学　高橋恒介
Tel.054-646-5443　　Fax.054-645-0195
Mail:takahasi@ssu.ac.jp

Javaプログラミング教育の方法

Hints for Java Programming Education

川口順功
Junkou Kawaguchi
静岡産業大学国際情報学部
Shizuoka Sangyo University , Faculty of Communications and Informatics

Abstract: In this paper, hints for Java programming education are reported on. Java is an object oriented programming language and applied to many products, such as computers and cellular phones. Therefore, programming education using Java has enhanced students' interest higher.

1．まえがき

大学でプログラミング教育を始めて 15 年になる。授業時間数の割には、効果が上がらないのが現状である。その原因の一つは、学生の興味・関心を高められないことである。Java は画像処理が簡単で、ゲーム作成などに応用できる。筆者は、講義で C を教えているが、ゼミでは 1 年前から Java を中心に学生を指導している。ゼミ学生の反応から察して、Java を使うと学生の興味・関心を高められそうな気がしている。

本稿では、C のプログラミング教育と Java でのゼミ学生の指導の経験をもとにまとめた、Java によるプログラミング教育を行なう際の要点について報告する。

2．Java について

Java は、米国 Sun Microsystem 社が提供する Java VM（Virtual Machine）上で動くオブジェクト指向言語である。その最大の特徴は、同社の標語「Write once, run anywhere」の通り、Java VM があればどのような環境でも実行可能なプログラムを作成できることである。Java には、プラットフォームに対応して、次のような 3 つの機能のソフトウェア開発環境がある[4]。

- Java2 Standard Edition（J2SE）
  他の基礎となる標準的機能を備えたもの
- Java2 EnterPrise Edition （J2EE）
  企業の業務システムや電子商取引などのサーバに必要な機能をまとめたもの
- Java2 Micro Edition （J2ME）
  家電製品や携帯電話などの組み込み機器向けの機能をまとめたもの

また、Java では、次のようなアプリケーション（以下、AP）を作成できる[3]。

- 一般的なコンソール AP
- Windows AP（以下、Windows-P）
- Web 用の AP（アプレット）
- サーバ用の AP（サーブレット）
- Java の構成部品のプログラム
  （JavaBeans コンポーネント）

3．Java によるプログラミング教育の方法

Java を大学のプログラミング教育で使う場合、J2SE を使い、次のような順序で教育することを提案したい。

① 一般的なコンソール AP
② アプレット
③ Windows-P

しかし、学生の興味・関心を引き付けるのは②や③であるので、①を中心に適宜②③を交えることがポイントである。

プログラミング方法で学ぶべき事項は、大きく次の 3 つに分類できる。

- データ型（データ構造）
- プログラムの制御構造
- プログラムの表現（アルゴリズムを含む）

まず、コンソール AP によって、これらに関する Java の基礎的なものを教える。その際、次のようなオブジェクト指向的なプログラミング方法[1]を意識的に取り入れる。

- クラス定義と情報隠蔽
- クラス(インターフェイス)の継承と再利用
- ポリモーフィズム（overload、override）

3-1．コンソール AP による Java の基礎

（1）データ型

Java のデータ型は、大きく値型（value type）と参照型（reference type）に分かれる。値型には 8 つの基本型（byte・short ・int・long・float・double・char・boolean）があり、参照型には配

列やクラス型の変数などがある。

プログラミング教育では、まず変数の概念を理解させ、次に、上の2つのデータ型の変数の違いを理解させたい。要点は次の通りである。

・変数は、コンピュータ内部の記憶域のアドレスに対応し、プログラムではそこに記憶されている内容（値かアドレス）を指す。
・値型の変数は、変数自体が値を持っている。
・参照型の変数は、それ自体はアドレスを記憶するためのもので、別に作成されるオブジェクトに対応付けて使われる。
・Java では、参照型が多くなる。

（2）プログラムの制御構造

プログラムの制御構造と Java で対応する文は次のようになる。

・逐次構造　・選択構造（if、switch）
・反復構造（while、for、do-while）

C と違う点は、選択構造や反復構造で使う条件式の判定方法である。条件成立は、C では「条件式の値が非ゼロ」、Java では「条件式の値が true（boolean 型）」である。

（3）コンソール AP によるプログラムの表現

ここでは、標準入力（キーボード）と標準出力(ディスプレイ画面)を使ったプログラムを例に挙げて、Java のプログラム表現について述べる。

プログラム 3-1（DataIO）は、下記の実行例のように、2つのキーボードから2つの整数値を入力し、その合計を表示するプログラムである。

（実行例）i = 12（1行目）j = 23（2行目）
12 + 23 = 35（3行目）

このプログラム例を通じて教えるべき主な事項は、次のようになる。特に①②が重要となる。

①Java プログラムの基本形

```
mport java.io.*;
public class DataIO {
    public static void main(String args[]) {  }
}
```

・import 文、クラスの定義（main メソッドの定義）の順になる
・public なクラス定義は、コンパイル単位のファイルにはただ一つで、ファイル名とクラス名は同じにする。
・プログラムは main から開始される。

②クラスの定義方法

・コンストラクタ
・変数とメソッドの定義
・変数の種類（ローカル変数、クラス変数、インスタンス変数）
・クラスのインスタンス化

③演算子と制御構造
④Java ライブラリのクラスの使い方
⑤標準入出力（クラスとメソッド）
⑥例外処理

次に、プログラム 3-1 を、実数（小数点付きの数）も扱えるように変更する。クラスの再利用を考慮して、IntIn(整数入力クラス)を AllIn（全タイプ入力クラス）にして、その中で「getValue」を overload（多重定義）する。入力したいデータ型を引数にして、次のように定義する。

整数の場合：public int getValue(int v) { }
実数の場合：public double getValue(double v){ }

このプログラム作成を通じて教えるべき主な事項は、次のようになる。

①overload（多重定義）
②汎用的なクラス作成

```
import java.io.*;
public class DataIO
{
    public static void main(String args[]) {
        IntIn vi = new IntIn();
        int i,j,k;
        vi.setMsg("i = ");   i=vi.getValue();
        vi.setMsg("j = ");   j=vi.getValue();
        k=i+j;
        System.out.println(i + " + " + j + " = " + k);
    }
}
class IntIn {
    String msg;
    BufferedReader d = new BufferedReader
          new InputStreamReader(System.in) );
    IntIn() { msg = "?="; }
    IntIn(String msg){ this.msg = msg; }
    public void setMsg(String msg)
    { this.msg = msg; }
    public int getValue( )
    {
        int a=0;
        boolean loop=true;
        while ( loop ) {
            try {
                System.out.print(msg);
                a=Integer.parseInt( d.readLine() );
                loop = false;
            }
            catch(IOException err) {}
        }
        return a;
    }
}
```

プログラム 3-1 コンソール AP（DataIO）

3-2．アプレットによるプログラミング方法

アプレットは、Web ブラウザ環境で動作する Java プログラムのことで、HTML ページを Web ブラウザにロードして実行する。アプレット

（GUI プログラム）を作成するには、AWT (Abstract Window Toolkit) と Swing を使うが、ここでは AWT のみを使ったプログラム例を示す。

（1）アプレットの作成手順

アプレットは、一般的なプログラムと違ってブラウザ上で実行させるので、作成手順は次のようになる。

①ソースプログラムの作成
②コンパイル（拡張子 class のファイル作成）
③HTML ドキュメントの作成
④アプレットの実行（ブラウザ上で実行、テストは appletviwer でもできる）

実用的なアプレット作成をするにはある程度の HTML に関する知識が要求されるが、最低限アプレットタグ（<applet>～</applet>）の使い方を覚えればよい。

（2）アプレットのプログラム例

ここでは、プログラム 3-1 に対応したアプレット例を示す。プログラム 3-2（AppletIO）がそのプログラムで、図 3-1 が実行例である[5]。左の Box と中央の Box に整数を入力して、右の OK ボタンをクリックすれば、右の Box に 2 つの整数の合計を表示するプログラムである。

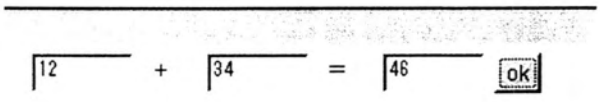


図 3-1　アプレットの実行例

このプログラム例を通じて教えるべき主な事項は、次のようになる。

①アプレットプログラムの基本形

```
import 文
public class Boxio extends Applet implements
ActionListener {
    public void init( ) {    }
    public void actionPerformed(ActionEvent e) {  }
}
```

②クラスの継承とインターフェイス
- Applet クラスの継承（extends）
- ActionListener インターフェイスの実装（Implements）

③アプレットのライフサイクルのメソッド
- init ()：ブラウザに読み込まれたときに実行されるメソッドで、main メソッドやクラスのコンストラクタに相当する。
- その他のメソッド
  start ()、stop ()、destroy ()

④Component クラスの扱い
- Button、Label、Textfield

⑤イベント処理
- イベントソース（Button など）とイベントオブジェクトの作成
- イベントリスナーによるイベント処理
- イベントリスナーのクラスの作成と登録

（3）機能を拡張したプログラム例

図 3-2 は、プログラム 3-2 に演算用の選択ボタンをつけて機能を拡張したプログラムの実行例である。プログラムの主な変更点は次のようになる。
- 演算子の部分を Label（ラベル）から Choice (選択ボタン)にする。
- 選択ボタン用のイベントリスナー (ItemListner) を作成・登録する。
- 計算処理を変える

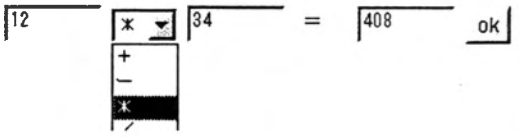


図 3-2 選択ボタンをつけたアプレットの実行例

```
import java.applet.*;
import java.awt.*;
import java.awt.event.*;
public class AppletIO extends Applet implements
ActionListener
{
    TextField box1    = new TextField(5);
    TextField box2    = new TextField(5);
    TextField box3    = new TextField(5);
    Label     label1 = new Label(" + ");
    Label     label2 = new Label(" = ");
    Button    ok      = new Button("ok");
    public void init( )
    {
        resize(320, 240);
        add(box1);add(label1);add(box2);   add(label2);
        add(box3); add(ok);
        ok.addActionListener(this);
    }
    public void actionPerformed(ActionEvent e)
    {
        int i,j,k;
        String v1 = box1.getText();
        String v2 = box2.getText();
        i = Integer.parseInt(v1);
        j = Integer.parseInt(v2);
        k = i + j;
        String s = Integer.toString(k);
        box3.setText(s);
    }  }
```

プログラム 3-2 アプレット（AppletIO）

3-3．Windows を使ったプログラミング方法

Windows-P は、機能が同じであればアプレットプログラムを変更して作成できる。主な相違点は次の通りである[2]。

① 継承するクラスが Frame になる。
② アプレットの init メソッドは main メソッドに相当する。init メソッド内の処理は、main メソッド内と main メソッドを含むクラスのコンストラクタで行なう。
③アプレットはブラウザで自動的にオブジェクト化されるが、Windows-P はオブジェクト化が必要となる。
④アプレットの Window サイズは HTML で定義されるが、Windows-P では setSize などのメソッドで行なう。

プログラム 3-3（WinIO）は、プログラム 3-2 と同じ機能を持つプログラム例で、図 3-3 はその実行例である。プログラムの内容は、上述した変更点を説明すれば、一部を除きほとんど機械的に変更できる。

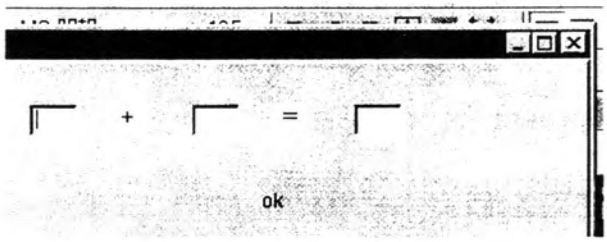


図 3-3　Windowd-P の実行例

```
import java.awt.*;
import java.awt.event.*;
public class  WinIO extends Frame implements
ActionListener
{   TextField box1   = new TextField(5);
    TextField box2   = new TextField(5);
    TextField box3   = new TextField(5);
    Label     lab1   = new Label(" + ");
    Label     lab2   = new Label(" = ");
    Button    ok     = new Button("ok");
    public boxfr()
    {   setLocation(50,50); setSize(400,200);
      addWindowListener( new WindowAdapter()
       {public void windowClosing(WindowEvent e)
        {  System.exit(0);} } );
        box1.setLocation(50,50);
        box1.setSize(30,20); add(box1);
        lab1.setLocation(100,50);   lab1.setSize(20,20);
        add(lab1);
        box2.setLocation(150,50);   box2.setSize(30,20);
        add(box2);
        lab2.setLocation(200,50);   lab2.setSize(20,20);
        add(lab2);
        box3.setLocation(250,50);   box3.setSize(30,20);
        add(box3);
        ok.setLocation(150,100);
        ok.setSize(20,20);    add(ok);
        ok.addActionListener(this);
    }
    public static void main(String[] args)
    {   WinIO myw = new WinIO();
        myw.show();
    }
    public void actionPerformed(ActionEvent e)
    {   int i,j,k;
        String v1 = box1.getText();
        String v2 = box2.getText();
        i = Integer.parseInt(v1);
        j = Integer.parseInt(v2);
        k = i + j;
        String s = Integer.toString(k);
        box3.setText(s);
    }
}
```

プログラム 3-3　Windows-P（WinIO）

4．まとめ

Java は、プログラミング教育を行なう際、どのような内容に重点を置くか選択肢の多い言語である。したがって、教える順序を間違うと効率の悪い教育になってしまう危険性がある。本稿では、次のような方法で教育することを提案し,具体的なプログラム例を示した。

①コンソール AP で Java の基礎を教える。少なくとも、次のアプレットや Windows-P で使う GUI プログラミング以外のオブジェクト指向プログラミングの基礎は教える。
②アプレット作成のプログラムで、GUI プログラミングの基礎を教える。
③アプレットのプログラムを変換しながら Windows-P を作成させる。
④コンソール AP を中心にする初期段階でも、学生の興味・関心を高めるために、アプレットや Windows-P を交える。

参考文献

［1］P. Niemeyer、J. Knudsen 著、滝沢他訳「詳解 Java プログラミング第 2 版」オーム社、2003
［2］池田誠「Java 言語ハンドブック」ナツメ社、2002
［3］柏原正三「はじめての Java 完全入門」技術評論社、2002
［4］ヤン・ブホ監修、（株）12C ソリューションズ著「はじめての Java プログラミング入門」DAI-X 出版、2002
［5］戸川隼人「ザ・Java 2」サイエンス社、2003

[問い合わせ先]
〒 426-8668　静岡県藤枝市駿河台４－１－１
静岡産業大学　国際情報学部
川口順功
Tel　：054-645-0191
Fax　：054-645-0195
E-mail：kawaguti@ssu.ac.jp

栄養学科の情報処理教育でおこなう統計リテラシー教育（講義編）

The basic statistics in computer education for nutritional sciences

井ノ口　美佐子
Misako Inokuchi

西南女学院大学保健福祉学部
Seinan Jo Gakuin University
Faculty of Health and Welfare

Abstract: The computer education for beginners in the general education is shifted to the high school education. It is seemed that the importance of basic statistics is increased in the computer education of the university. This is the teaching report about the basic statistics which is the new curriculum for nutritional sciences.

1　はじめに

管理栄養士法が改訂されて，国家試験のガイドラインも新しくなった．そこに示された新しいキーワードとして疫学と栄養アセスメントがある．疫学では疫学的方法というものがあり，それは広い意味で使われて，たとえばアンケートなどのデータを集める方法も含まれる．栄養アセスメントもこのひとつである．したがって，キーワードとして表には出ていないがそこには統計が含まれ，重要な位置をもつことになる．

そこで，管理栄養士の養成施設でもある栄養学科の新しいカリキュラムとしての健康情報処理論の中で統計基礎の講義（２単位９０分），健康情報処理実習（１単位１３５分）ではコンピュータを利用した統計解析を含めることにした．

この報告は前半の講義に関するものであり，実習に関するものは今後の報告を予定している．

2　講義の必要性

今後は文系理系に関わらず，コンピュータを利用した統計の必要性は高まってくると思われるが，講義なしにコンピュータソフトを利用した実習だけで済ますことは，コンピュータが何をやっているか理解できないままになり，間違った判断や思い込みの危険性も出てくると考えられる．そこで，講義では簡単な問題は自分で電卓利用の計算を行い，統計計算の仕組みを理解する必要がある．

3　受講者と教科書選定

講義の対象学年は栄養学科２年１１６人の女子学生である．栄養学科の学生は文系ではないが，数学に強いと期待できないこと，１度に１００人を超す学生を対象とする講義に対応するために教科書選定で考慮した点は，内容が栄養学科に関連した例が含まれていることや数式の扱い方そしてその説明のわかりやすさ等である．その結果今回は同じ数式でもΣ記号を使わないものを教科書として選定した[1]．予習・復習の自習時の学生たちにΣ記号による拒否反応を生じさせないための配慮である．しかしΣ記号を用いないために生じる紛らわしい日本語表現については今後の課題である．

4　講義内容と課題

講義回数は12回であるが，正味10回で，中間に復習１回，最後にまとめの１回である．講義内容は次の通りである．

① 統計学の必要性について
② 記述統計
③ 相関と回帰
④ 確率分布
⑤ 母集団統計値の推定
⑥ 仮説検定１（パラメトリック検定）
⑦ 仮説検定２（ノンパラメトリック検定）

教科書利用の復習を義務付ける意味もあって，ほぼ毎回課題を出し，３日後に締め切りとし，それを次回の講義に返却するというパターンをとる．

教師がはじめての統計の講義ということもあり，毎回の講義資料・配布物の準備と採点におわれるようになる．しかし，学生たちも自分たちで解決できないときは研究室まで質問にくる学生もあって，熱心に見えた．途中の復習のための１コマは学生の要望である．正味１０回の講義としては，講義内容は上記①～⑦がやっとであるが，ほとんどの学生は記述統計までは何とかついてきたものの，その後，推定と検定では，統計用語の氾濫と用い方に戸惑うと言う学生もでてきた．そのため統計解析の案内板を配布し，学生たちにチェックさせるなど，問題解決に活用させることにする．

5　学生へのアンケート調査

最終講義の６月末の週に，無記名でアンケート調査をする．とくに講義を受けるときの動機①と講義を受ける姿勢に関連する項目（②～⑥）についてつぎのようなものを用意した．

① 受講前の意識（積極的に統計を理解したい／必須科目なので，仕方ない）
② 受講後の意識変化（統計の理解と必要性への意識変化）
③ 受講態度
④ 講義理解度
⑤ 課題提出
⑥ 配布物活用

6　調査結果と今後の課題

表１に調査結果を示す．今回は統計リテラシー教育を実習で行うことが目的であるが，そのための理解を高めるための講義でもある．課題も全員ではないが毎回そこそこに提出し，質問にもやってくる熱心な学生のかげに，この理解度の低さ13.8%についていけなかった問題は教師にある．学生達の意識も90.4%は必須科目なので仕方なく受講したという現実は厳しい．その後の受講により統計の必要性を感じるようになった学生は42.6%である．さらに学生達は自由形式の記入の中で，細長い現在の教室（横１列９人×縦１５）の悪さを指摘し，さらに人数を半分にという講義改善要望が１割の学生から出されている．これらは当然のことであり，来年度の改善事項とする．

表１．講義に関する調査

項目	1	2
①受講動機（初回時の意識）	積極的受講 9.6%	必修なので受講 90.4%
②意識変化	有り 42.6%	無し 57.4%
③受講態度	熱心・普通 68.1%	悪い 31.9%
④理解度	理解できた 13.8%	理解できない 86.2%
⑤課題提出	した 68.1%	しなかった 31.9%
⑥配布物活用	した 73.4%	しなかった 26.6%

7　おわりに

記述統計の時点では理解率が84.5から89.3%であった．このことからも，やはり推計と検定に入ってからの講義は課題の提出だけでなく，理解させるためのゆとりと色々な工夫が必要だったことを感じる．今後は内容を厳選して，ゆとりのある講義内容にしたい．後期の健康情報処理実習ではこの厳しいアンケート結果を踏まえて，必須科目だからやむなく受ける受身の学生達に，いかに無理なく，確実に少しでも多くの学生に興味を持たせることができるか，そして統計に対する意識をさらに高めることができるか，今後の重い課題である．

参考資料

【１】縣俊彦著，“やさしい栄養・生活統計学”，南江堂，1997

連絡先
〒803-0835　北九州市小倉北区井堀1-3-5
西南女学院大学保健福祉学部
井ノ口　美佐子
E-mail：inokuchi@seinan-jo.ac.jp
TEL/FAX：093-583-5478

文科系学部におけるプログラミング教育の実践

Practice of the Programming Education in a Liberal-arts Faculty

藤井　雅章
Masaaki　Fujii

北海学園大学　経済学部
Hokkai　Gakuen　University

Abstract　In the programming education in the department of economics, although the education by program language was mainly performed, the information literacy education which used the application software of a word processor (Word) or a spreadsheet (Lotus, Excel) with the time of Windows is performed. However, it is necessary to follow and to change the contents of programming education in a university to which the education of a high school subject "information" will be carried out from the 2003 fiscal year. This report examines the example of practice of the programming education in the department of economics.

1　はじめに

2003 年度から始まった高等学校普通教科「情報 A」・「情報 B」・「情報 C」は，今後の文科系大学の情報リテラシ教育，情報処理およびプログラミング教育へどのような影響を与え，また，どのような情報教育が望ましいのかを検討しなければならない。既に，大学の情報教育がどのようにあるべきかについては多数の論文などがある。しかし，現状の文科系学部の「プログラミング」科目について実践的教育の議論が少なく，プログラミングの必要性が何にあるのかを見極めることが大切である。ここでは，経済学部の実践的なプログラミング教育の事例報告と検討を行なう。

2　高校教科「情報」のプログラミング教育

高等学校普通教科『情報』試作教科書[1]の「情報 A」・「情報 B」・「情報 C」で取り扱われている「プログラミング」および「情報処理」に関連する項目は，表 1 のようにまとめることができる。

表 1　高校「情報」におけるプログラミング教育

教科 / 項目	「情報 A」	「情報 B」	「情報 C」
Web 利用と HTML 言語	○	－	○
表計算と情報処理	－	○	－
ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑとﾌﾟﾛｸﾞﾗﾐﾝｸﾞ	－	○	－

2003 年度の高校『情報 A』は，電子情報ネットワークへの情報発信で扱う WWW プレゼンテーション用としてマークアップ言語が含まれている。即ち，HTML 言語記述は Web ページの文書等を取り扱うプログラミング教育と解釈できる。『情報 B』には，問題解決におけるコンピュータの活用方法が扱われている。さらに，情報処理の定式化とデータ管理の中では“問題のモデル化・アルゴリズム・プログラミング言語(C＋＋)”のプログラミング教育とデータベースを含めた表計算ソフトの活用(数値処理)が教材になっている。『情報 C』には，情報の表現と WWW による情報発信の HTML 言語が扱われているが，「情報 B」の教材で扱われたようなプログラミング教育は含まれていない。

3　「プログラミング I」の教育事例

ここでの事例は，経済学部経済学科および経営学科 3 年次の履修希望学生を対象に，複数の教員が同じ「プログラミング I」科目の教育をネットワーク上のパソコン(クライアント)を利用しながら，担当クラス毎にプログラミング教育を行っている。その授業計画は，シラバス[2]によると，多少異なっている。

● 授業のねらい

コンピュータ操作を通じて，実地に情報処理能力を培う。

- 文書処理，メール送信，WWW の復習
- 表計算ソフト Excel の基本操作の復習
- 表計算ソフト Excel を使った応用
- その他

● 授業計画 (*A, B, C, D, E* 教員の概要による)

各教員の授業概要は，表 2 に示すようにまとめた。

表2　経済学部の「プログラミングⅠ」の概要

内容＼教員	A	B	C	D	E
Word 文書処理	●	●	−	−	●
一太郎 文書処理	−	●	−	−	−
WWW Web の利用	−	−	●	−	−
Excel 基本操作	●	●	●	●	●
Excel 応用 関数（統計）	●	−	●	●	●
Excel 応用 (ﾃﾞｰﾀ分析)	−	−	●	−	−
VBA（ﾏｸﾛ） ﾌﾟﾛｸﾞﾗﾐﾝｸﾞ	−	−	●	−	−
Access 基本操作	−	−	−	●	−

4　経済学部を意識したプログラミング教育？

Windows のバージョンアップに伴いアプリケーションソフトウェアの機能が高性能化されると共に，文科系学部・学科に於ける「プログラミング」科目は，アプリケーションソフトウェア活用の教育へと大きく代わって来ている。本来，文科系の中でも〝情報系〟とそれ以外の〝非情報系〟と呼べる学部・学科とに分けてプログラミング教育について議論するべきであるが，ここでは経済学部に於けるプログラミング教育の実践と2003年高校教科「情報A～C」の係わりを踏まえて報告する。既に，文科系大学・学部における情報教育に関する報告等[3]は多数あるが，プログラミング教育に関連した報告は少ない[4), 5)]。現在，多数のアプリケーションソフトウェアがあふれている現状では，プログラミングはSEには必要な技術であっても，文科系の学生が学ぶ必要がないというのが大方の理解であるとされている。大学の一般教育課程における情報教育の提言[4]によると，情報系学科におけるSEに対するプログラミング技術のあり方と，非情報系学科に対して，2003年高校「情報C」との係わりから，大学の情報教育が体系的に行われることを提言している。

本文は，非情報系の経済学部を意識したプログラミング教育とは，どのような形態が望ましいのかについて考察するにあたって，表2「プログラミングⅠ」の授業概要から見ると，現状は本来のプログラミングと云える部分を失ったExcelの基本と応用が主な内容になっている。しかし，非情報系と云えども，プログラミング思考の能力は必要と考える。その能力は，誰もがプログラムを書けなくとも，コンピュータの動作概念の理解や表計算ソフトウェア利用の手順を要領よく理解できるために必要である。さらに，経済学部を意識したExcelによるプログラミング教育には，つぎのような面から教材選びも大切と考える。

① 経済学・経営学に必要なデータの収集・処理加工・分析・結果取得
② データの共有化，データ処理の自動化のためのマクロ命令(VBA)の理解

その上，Excelのソフトによるプログラミング教育に際しては，下記のExcelの利点と欠点を補うようなプログラミング的な考え方を学ばせる必要性がある。

［利点］ 複雑な処理数式の代わりに，関数・分析ツールが容易に利用できる。
［欠点］ 関数・分析ツールは処理内容がブラックボックス化されている。また，出力結果の解釈が難しい。

5　高校教科「情報」と今後の情報処理教育

高等学校における教科「情報A」，「情報B」，「情報C」は，それぞれの高校毎に3科目の中から1科目を選択必修するとよいとのことである。このような履修方式は，大学では〝情報〟に対するレベルがバラバラな学生を迎えることになる。この事実は，大学に於ける情報処理やプログラミング教育の在り方に大きな影響を及ぼすことになる。大学におけるプログラミング教育等では，高校の「情報B」を学んだか否かによって，情報科目の履修指導が必要となるであろう。さらに，大学の情報リテラシ教育は必要性がなくなる可能性がある。今後，非情報系に属する文科系学部では，専門分野固有の内容に従った実践的な情報処理教育が必要かつ十分に行われなければならないであろう。

参考文献

[1]情報処理学会初等中等情報教育委員会ﾜｰｷﾝｸﾞ･ｸﾞﾙｰﾌﾟ:普通教科『情報』試作教科書(仮称), (1998)
[2]北海学園大学経済学部:講義概要, 2003年度
[3]江原暉将編:文科系大学･学部における情報教育, 情報処理, Vol.41, No.3, pp.226-248(2000)
[4]佐野洋:大学の文科系学部におけるプログラミング教育の試み, 情報処理学会,CE-No.50,pp.57-64 (1998)
[5]駒谷昇一:大学の一般教育課程における情報教育に対する提言, 情報処理学会,CE-No.54,pp.49-55 (1999)

連絡先：
〒062-8605　札幌市 豊平区 旭町4－1－40
北海学園大学　経済学部　コンピュータ実習室
藤井 雅章　　(非常勤講師)
E-mail：　mfujii@seagreen.ocn.ne.jp

Teaching New Artificial Intelligence

－ Hands-on, Soft Computing Approach －

Atsushi Inoue *
Department of Computer Science
Eastern Washington University
Cheney, WA 99004-2412 U.S.A.

Abstract: A new approach of teaching introductory Artificial Intelligence is introduced. This incorporates 'hands-on' experiences and the concept of Soft Computing as the core principle. Students learn AI as an alternative framework of complex problem-solving throughout the course works. Course plans, selection of textbooks, tools and operations of comprehensive research projects, and compliances of CC2001 are discussed.

1. Paradigm Shift in Artificial Intelligence

Artificial Intelligence (AI) has been recognized as one of primary knowledge core of computer science (CS). Within the most recent Computing Curricula 2001 (CC2001), the curricular guidelines for undergraduate programs in computing [1], AI is identified as one of fourteen areas in the body of knowledge including 10 core hours (out of 280 core hours). This consists of the following ten topics:

1. Fundamental issues [core, 1hr]: history and definition.
2. Search and constraint satisfaction [core, 5hrs]: brute-force search, heuristic search and two-player games.
3. Knowledge Representation and reasoning [core, 4hrs]: logic and resolution.
4. Advanced Search: simulated annealing and *genetic algorithm.*
5. Advanced knowledge representation and reasoning: frames, non-monotonic reasoning, temporal reasoning, *uncertainty management.*
6. Agents: multi-agents, robotic agents, architectures.
7. Natural language processing: parsing, corpus-based, IR, MT, speech recognition.
8. Machine learning and neural networks: decision tree, *neural networks*, nearest neighbor, overfitting, reinforcement learning, PAC.
9. AI planning systems
10. Robotics: sensing, control.

Reviewing transitions of Computing Curricula published almost every decade since late 60s, we observe, at least, the following paradigm shift in AI:

1. From individual to social: agents and artificial life
2. From measured to perceptual: neural networks, fuzzy logic and genetic algorithms
3. From Procedural to structural: genetic algorithms, agents and neural networks
4. From non-adaptive to adaptive: neural networks
5. From batch process to real-time basis: robotics

Considering the incorporation of Soft Computing (SC) in CC2001, its methodologies have been observed within AI area (namely, genetic algorithms, neural networks and uncertainty). However, none of them are included as a part of the core and, more importantly, the term, SC, never appears in CC2001.

Observing introductory AI courses at undergraduate level (in US), a typical course plan (for a semester: 16 weeks) appears as follows (note: underlines indicate topics with core hours in CC2001):

1. Definitions and overview of AI (1)
2. Brute-Force Search (2)
3. Heuristic Search (2)
4. Two-player games (2)
5. Logic and resolution (2)
6. Knowledge based systems and architectures (3)
7. Additional topics and projects (2)

*TEL:+1-509-359-4373. FAX:+1-509-359-2215 (ATTN: Inoue). E-mail: atsushi.inoue@ewu.edu (Please send Japanese messages as attachments). This work is in part supported by EWU's congressional appropriation of Technology Initiative for New Economy (TINE).

Other topics such as agents, uncertainty management, modal logic and reasoning, natural language processing, machine learning, robotics and planning are taught as advanced AI courses, which are considered as electives in many curricula. Consequently, students do not learn the paradigm shift in sequel AI courses, and this leads students identifying AI as premature, impractical, insignificant study within CS.

There is the other paradigm shifts: those of programming language and tools for computational experiments in AI. Traditionally, LISP and PROLOG are dominantly used due mainly to their advantages on built-in complex data structures (lists) and computational frameworks (logic and function). Recently, other imperial languages such as C++ and JAVA support such advantages (as built-in libraries). In addition, convenient, comprehensive simulation tools are available (e.g., MATLAB). This is yet another challenge to introduce students advantages of using such various languages and tools.

2. New Artificial Intelligence: Soft Computing Approach

Reviewing the description written by Zadeh [2],

> 'Soft computing differs from conventional (hard) computing in that, unlike hard computing, it is tolerant of imprecision, uncertainty and partial truth. In effect, the role model for soft computing is the human mind. The guiding principle of soft computing is: Exploit the tolerance for imprecision, uncertainty and partial truth to achieve tractability, robustness and low solution cost.'

It is fair to conclude that SC is indeed an instance of AI, despite of controversy and arguments in some academic societies, in a sense that the role model is the human mind. However, it is very important to know that the objective is common. Taking all into account, it is natural and essential that SC is treated as a study on alternative problem solving approaches. Please notice that this is identical to the treatment of AI in decades ago (60s and early 70s).

Here, we treat SC as the *core principle* of AI and design and teach courses in compliance with CC2001 accordingly.

2.1. Course Design

The current course design consists of the following 7 academic modules (1 unit = 500 contact minutes):

1. *Foundation* (1 unit) – definition and history of AI, logic as constraint satisfaction problem (CSP), logic programming.
2. *Search* (2 units) – state space representation, brute-force search, heuristic search, probabilistic search, genetic algorithms.
3. Knowledge Representation and Reasoning (2 units) – knowledge and semantic representation, probabilistic reasoning, evidential reasoning, fuzzy logic, fuzzy-neuro systems, mass assignment theory (MAT) [3], natural language processing.
4. *System Architecture* (1 unit) – expert systems, multi-agent, blackboard, production, robotics.
5. Machine Learning (2 units) – version space, PAC and VC-dimension, NN, Bayesian learning, instance-based learning, support-vector machine.
6. System Identification (1 unit) – clustering, computational theory of perception (CPT) [4].
7. Applications (1-2 units) – image and signal processing, robotics, planning and reinforcement, information retrieval, machine translation, intrusion detection.

Each module consists of illustrative descriptions, formal (mathematical) descriptions, and some computational experiments or programming. All modules contain introductory materials only.

Within above academic modules, the idea and thought of SC are introduced as follows:

- From brute-force search to evolutionary search (module 2) by introducing students the following algorithms (in order):
  1. Brute-force search: depth-first and breadth-first
  2. Iterative deepening and uniform cost search
  3. Heuristic search: best-first, A*, and IDA*
  4. Probabilistic search: Monte Carlo and Las Vegas (brief introduction)
  5. Hill climbing and simulated annealing
  6. Evolutionary search: genetic algorithm and programming
- From crisp decision to fuzzy decision in knowledge representation and reasoning (module 3):
  1. *Crisp decision*: a particular decision $x_c \in D$ is made (i.e. probability $P(x_c) = 1$).
  2. *Probabilistic decision*: a decision $x_p \in D$ associated with a point probability $P(x_p)$ such that $P(x_p) + P(\overline{x_p}) = 1$ is made.
  3. *Support decision*: a decision $x_s \in D$ associated with a support pair, i.e. an interval of probability, $(P_l(x_s), P_u(x_s))$ where $P_l(x_s) \leq P_u(x_s)$ is made. Consequently, the support pair for the complement $(P_l(\overline{x_s}), P_u(\overline{x_s}))$ is determined such that $(1 - P_u(x_s), 1 - P_l(x_s)) = (P_l(\overline{x_s}), P_u(\overline{x_s}))$.

4. *Fuzzy decision*: a decision $x_f \in D$ associated with a fuzzy probability $P_f(x_f)$, a fuzzy set defined over $[0, 1]$, is made. (E.g., $P_f(x_f) =$ 'high' where 'high' is a fuzzy set defined over $[0, 1]$).

Note that this is taught via MAT as the underlying theory.

- From stochastic to perceptual construction of knowledge:

  1. Fuzzy-neuro systems (in module 3)
  2. Neural networks and learning by GA (in module 5)
  3. Fuzzy clustering (in module 6)

Currently, those academic modules are incorporated within courses [1] offered from our department as follows:

- CSCD480 & CSCD580 Intelligent Systems (4 crds for 11 weeks) – modules 1, 2 & 7, a logic programming language and/or a functional programming language.
- CSCD481 & CSCD581 Knowledge-Based Systems (4 crds for 11 weeks) – modules 3, 4 & 7, a logic programming language.
- CSCD482 & CSCD582 machine Learning (4 crds for 11 weeks) – modules 5, 6 & 7, some simulation and statistical tools (e.g., R, MATLAB, octave, Excel).

In our degree programs, the AI concentration consists of CSCD481 and CSCD482 for undergraduate as well as CSCD581 and CSCD582 for graduate (master level). In addition, CSCD580 is a core requirement of our master degree program (this serves as the alternative (non-deterministic) algorithm course).

2.2. Textbooks

The ideal textbook for this AI course should satisfy the following criteria:

1. It contains both illustrative and formal (mathematical) descriptions.
2. It contains some programming codes.
3. It contains possible project plans and ample exercises.
4. It contains a comprehensive reference list.

In addition, it is better if the textbook includes a programming language chapter for project works. Table 1 shows a comparison on coverage of topics, tools, exercises, references and descriptions within scales from 1 (poor) to 5 (excellent). As can be seen, there are no ideal textbooks that satisfy above criteria. Further, no introductory AI textbooks have descriptions of SC. We are currently using Luger's book with supplemental online materials (lecture notes of SC approaches and coding samples)[2].

[1] CSCD4XX: undergraduate senior level, CSCD5XX: graduate level.

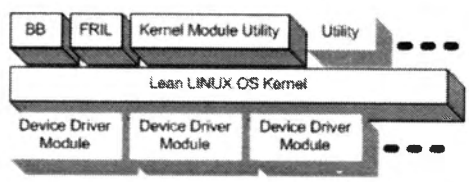


Figure 1. SEPIA System Architecture

2.3. Tools

the following tools are mainly being used:

1. Programming language: Fuzzy Relational Inference Language (FRIL) [3].
2. MATLAB, Octave or R for stochastic processes and visualizations.

In addition, some preparations for C++, LISP and Scheme are available (for comparative study).

Further, simple embedded intelligent system architecture, so-called Simple Embedded Perceptual and Intelligent System Architecture (SEPIA), shown in Figure 1 is currently under development. SEPIA consists of a lean LINUX OS kernel with a minimal system command tool (BB: BusyBox), kernel module utilities and FRIL. The lean SEPIA with a network interface can be easily stored on a single floppy disk (FD). The SEPIA FD coverts any PC (it can be an obsolete machine such as 486 and Pentium) into an intelligent system.

2.4. Projects

Comprehensive research projects can be naturally and easily incorporated within module 7. Currently, we manage the following projects:

1. PADE: Perceptual Autopilot for Distance Education – Autonomous and intelligent audio-visual device controls for distance education classrooms.
2. PRIMES: Perceptual and Real-time Intrusion Management Embedded System – Intrusion detections and responses based on the framework of CTP as an embedded system (built on SEPIA).
3. SPIDER: Synergistic and Perceptual Intrusion Detection and Reinforcement [11, 12, 13, 14] – A multi-agent intrusion detection system capable of

[2] We will be using Russell's new AI book in academic year 2003-2004 (with a supplemental PROLOG programming textbook).

Table 1. Reviews of AI textbooks

Textbook	topics	exercises	references	tools	descriptioon
Tanimoto [5]	4	3	3	LISP	easy
Nilsson [6]	3	3	3	none	adv.
Poole et. al. [7]	3	3	3	PROLOG	easy
Bender [8]	3	3	4	none	adv.
Luger [9]	5	3	5	LISP&PROLOG	easy
Russell [10]	4	5	5	none	ok

reinforcement learning. These agents use SC approaches such as genetic algorithms, neural networks and fuzzy logic.

All student projects are formally documented as project panels (1-page comprehensive description consisting of problem statements, computational models and experimental results) and archived on our web server as references for prospective students.

3. Concluding Summary

In this paper, a new approach of teaching introductory AI courses using SC approach is introduced. In these instructional operations, comprehensive research projects are incorporated so that students obtain 'hands-on' experiences.

The promising outcome of this teaching approach is beneficial for both students and faculty as follows (2002.1–2003.6):

1. good teaching evaluations ($[1, 2]$ for scale of $[1, 5]$)
2. high attendance
3. high passing rate
4. 8 master thesis projects (3 completed, 5 on-going)
5. 3 proceeding publications from completed master thesis projects
6. 2 research grant applications

The on-going and future works include

1. participation of a local economy development project (Terabyte Triangle and Virtual Possibility Networks) and
2. development of international computer science exchange program in collaboration with our English language training program (ELI) at both undergraduate and graduate (master) level.

References

[1] IEEE-ACM Computing Curricula 2001, `http://www.computer.org/education/cc2001/final/index.htm`

[2] L. A. Zadeh, *What is Soct Computing?*, `http://www-bisc.cs.berkeley.edu/bisc/bisc.memo.html\#what_is_sch`

[3] J. F. Baldwin, T. P. Martin, B. W. Pilsworth, *FRIL - Fuzzy and Evidential Reasoning in Artificial Intelligence*, Research Studies Press Ltd. (John Wiley & Sons Press in U.S.A.), 1995.

[4] L. A. Zadeh, *From Computing with Numbers to Computing with Words: From Manipulation of Measurements to Manipulation of Perceptions*, IEEE Tranc. Circuits and Systems I, vol. 45, No. 1, pp. 105-119, 1999.

[5] S. Tanimoto, *The Elements of Artificial Intelligence Using Common LISP (2nd eds)*, W. H. Freeman, 1995.

[6] N. J. Nilsson, *Artificial Intelligence: A New Synthesis*, Morgan Kaufmann, 1998.

[7] D. Poole, A. Mackworth, R. Goebel, *Computational Intelligence, A Logical Approach*, Oxford University Press, 1998.

[8] E. A. Bender, *Mathematical Methods in Artificial Intelligence*, IEEE CS Press and J. Wiley & Sons Press, 1998.

[9] G. F. Luger, *Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving (4th eds)*, Addison Wesley, 2002.

[10] S. Russell, P. Norgig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach (2nd eds)*, Prentice Hall, 2003.

[11] P. Miller, J. Mill, A. Inoue, *Synergistic and Perceptual Intrusion Detection and Reinforcement (SPIDER)*, Proc. MAICS2003, pp. xx-xx, Cincinnati, OH, 2003.

[12] A. Inoue, *Perceptual Intrusion Detection System*, Proc. NAFIPS2003, to appear, Chicago, IL, 2003.

[13] P. Miller, A. Inoue, *Collaborative Intrusion Detection System*, Proc. NAFIPS2003, to appear, Chicago, IL, 2003.

[14] J. Mill, A. Inoue, *An Application of Fuzzy Support Vector*, Proc. NAFIPS2003, to appear, Chicago, IL, 2003.

あいまいなコンセプトが精緻化される過程の理解と支援
Understanding and Facilitating Concept Articulation Process

庄司 裕子
Hiroko SHOJI

川村学園女子大学
Kawamura Gakuen Women's University

This study addressed the information presentation method to help the customers make a concept-articulation type of purchase. When customers follow the concept-articulation type of thinking, they only have vague requirements, and try to make a gradual clarification of what they want through the interaction with salesclerks. We constructed a system called S-Conart (Concept Articulator for Shoppers) to support the concept-articulation type of purchase based on the observations from an analysis of human behavior in actual purchase activities. The result of the experiments conducted using S-Conart suggests that S-Conart is expected to be useful for building the decision-making support system for concept-articulation type of shoppers.

1. はじめに

物質的に豊かな現代社会では，顧客の意思決定を大きく左右する感性的な要素を重視したマーケティングが求められている[Peppers 1993]. 近年脚光を浴びているオンラインショッピングにおいても，顧客の感性に訴える情報提示の必要性が意識されるようになってきた[斎藤 2000]. このような背景から筆者らは，オンラインショッピングにおいて顧客の意思決定を効果的に促進できる対話的システムを実現するための取り組みを行なってきた[庄司 2001]. 特に，欲しいもののイメージが曖昧な顧客に対して効果的な情報提示手段を解明しようとしている. そのための基礎として，筆者らはまず，現実世界の店舗での人と人とのコミュニケーションを観察し，顧客の思考過程を理解することから始めた. そして，購買の思考過程は問題解決型とコンセプト精緻化型の 2 種類に大別されることを見出した. 問題解決型の購買では，顧客は欲しい商品のイメージや機能がはっきりしており，自分の要求を満足するような商品を探すという問題解決を行なう. 一方，コンセプト精緻化型の購買では，顧客は自分の欲しいものについての要求が不明確であり，店員との対話などを通して徐々にイメージを作り上げていく. 現実の購買ではコンセプト精緻化型購買が多数観察されるにもかかわらず，既存のオンラインショッピングサイトは，顧客の要求が明確に定まっていることを前提としてきた. すなわち，既存のオンラインショッピングでは，問題解決型の購買のみを対象としてきたのである. そこで筆者らは，コンセプト精緻化型の購買を支援するためのオンラインショッピングシステム作りを目指し，コンセプト精緻化型購買を支援するためのシステム S-Conart を作成した. 本稿では S-Conart の概要について紹介し，S-Conart の有効性を検証するために行なった実験結果について簡単に述べる. 2 種類の実験を通して筆者らは，S-Conart が気づき(conception)および理解と納得(conviction)の支援に効果的であることを確認できた. したがって S-Conart はコンセプト精緻化型購買での意思決定を効果的に支援するインタラクションを実現していると考えられる.

2. S-Conart の概要

筆者らは，実購買行動の分析を通じて得た知見[庄司 2001]をもとに，オンラインショッピングシステムにおいてコンセプト精緻化型購買を支援するための効果的な情報提供手段について考え，実験システム S-Conart(Concept Articulator for Shoppers)を作成した[庄司 2003]. 筆者らは，人間同士のコミュニケーションの特徴をそのまま Human-Computer Interaction(HCI)に置き換えるのではなく，コンセプト精緻化を支援するために適切な情報提供を行なうことに重点を置いたシステム作りを行なっている. 本研究では実購買行動の分析を通じて，コンセプト精緻化型購買を支援するには「気づき(conception)」と「理解と納得(conviction)」の支援が重要であることが示されている. そこで S-Conart では次のようなアプローチでこの両者の支援を試みた.

- **空間配置による気づきの支援**
  S-Conart では，MDS(多次元尺度構成法)を用いた空間配置による情報提示によって「気づきの支援」を行なう機能を実装している(図 1 の左側・枠で囲んだ部分参照). また，空間配置形式の情報提示の効果を検証するための比較対象として，同様の情報をリスト形式によって提示するインタフェースを実装している(本稿では紙面の都合上図は割愛した. ご興味のある方は[庄司 2003]を参照されたい).

- **場面情報を利用した理解と納得の支援**
  S-Conart では次の 2 つの機能を実装し，現在のユーザの思考に適した場面情報を提供してユーザのコンセプト精緻化を支援する.
  (1) 商品に関する場面情報が記載されたコメントを閲覧できるようにして理解と納得の支援を行なう(図 1 の下側参照).
  (2) 全商品に関するコメントから抽出した語を「場面情報ウィンドウ」内にグラフとツリー形式で表示し，ユーザのコンセプト精緻化を支援する(図 2 参照).

3. オンライン購買実験

筆者らは，S-Conart がコンセプト精緻化型購買の支援に効果的であるかどうかを検証するために 2 種類の実験を行なった．実験内容および結果の詳細については[庄司 2003]に譲るが，第 1 の実験として，S-Conart で採用した「空間配置形式の情報提示による気づきの支援」の効果について検討した．そして第 2 の実験として，場面情報の提示による「理解と納得の支援」効果について検討した．

第 1 の実験結果の分析を通して，「空間配置」を用いた場合には「リスト」の場合と比べて，「空間を見ているときに他の商品がふと目に入ってくること」によって現在の視点に基づく定常的(routine)な思考ループからの思考の飛躍が起こり，別の探索プランへとシフトしやすいことが確認できた．この結果から，空間配置形式の情報提示は「気づきの支援」に効果的であると考えられる．しかしながら第 1 の実験では，商品の空間配置が探索プランの変更に効果的（すなわちコンセプト精緻化効果が見られる）なのは，商品に対する興味や知識が高い被験者の場合のみであり，商品知識の少ない素人的な被験者には効果が少なかった．一方，第 2 の実験で場面情報を提示した場合を調べると，すべてのグループの被験者について同じ程度にコンセプト精緻化の効果が現れた．商品に関する知識や関心が豊富な被験者たちは，トリガーとなる情報に気づきさえすれば，自分自身の知識を背景として自動的に理解と納得が行なえる．それに対して，知識が少ないアマチュア的な被験者は，仮に何らかの情報が目に留まったとしても，理解と納得につなげることはできない．コメント情報を提供したり，場面情報ウィンドウを併用することによって，専門的知識のないユーザであっても理解と納得を支援できると考えられる．

4. まとめ

筆者らは，最初は曖昧なコンセプトしか持たない顧客を対象として，コンセプト精緻化型購買を効果的に支援するための情報提供方法について考え，それを実現するための Human-Computer Interaction(HCI)の設計の枠組みを提案した．具体的には，空間配置形式の情報提示による「気づきの支援」および，場面情報の提示による「理解の納得の支援」によってコンセプト精緻化型購買を支援するためのシステム S-Conart を作成した．そして 2 種類の評価実験を通じて，S-Conart を作成する上で採用した手法がコンセプト精緻化型購買の支援に有効であることを確認した．

実世界での購買行動では，最初は曖昧なイメージしか持たない消費者が徐々に欲しいもののイメージを作り上げていくコンセプト精緻化型購買が数多く見られるにも関わらず，従来のオンラインショッピングシステムでは問題解決型購買のみしか対象としてこなかった．したがって筆者らが，コンセプト精緻化型の購買をオンライン購買でも支援できることを示したことは，将来のオンラインショッピングシステムをより柔軟で使いやすいものに改良するための基礎として工学的に有意義であると考えられる．さらに，曖昧なコンセプトが精緻化される過程の理解と支援に関する本研究の知見は，購買以外のシステムに対しても応用できると期待される．

図 1：S-Conart の空間配置形式インタフェース

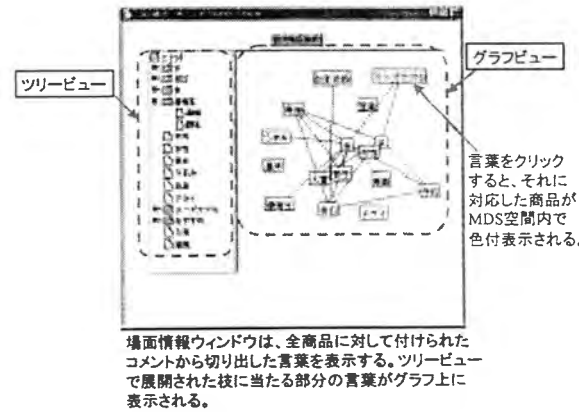


図 2：S-Conart の場面情報ウィンドウの画面

参考文献

[Peppers 1993] Peppers, D. and Rogers, M., The One to One Future, Doubleday, 1993. (井関利明, 監訳, One to One マーケティング ―顧客リレーションシップ戦略, ダイヤモンド社, 1995.)

[斎藤 2000] 斎藤 国博, 安東 一真, "売れる EC サイトを作る", 日経インターネットテクノロジー, 2000 年 8 月号, 2000.

[庄司 2001] 庄司 裕子, 堀 浩一, オンラインショッピングシステムのインタフェースの向上へ向けて ―実購買行動の分析結果からの示唆, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.6, pp.1387-1400, 2001.

[庄司 2003] 庄司裕子, 堀浩一, 購買におけるコンセプト精緻化を支援するためのインタラクション手法とその評価, 日本知能情報ファジィ学会論文誌, Vol.15, No.3, 2003. (in press)

連絡先

〒270－1138 千葉県我孫子市下ヶ戸 1133
川村学園女子大学 情報コミュニケーション学科
庄司 裕子
電話:04-7183-7101, FAX:04-7183-0115
電子メール: hiroko@da2.so-net.ne.jp

CoordiNaviを用いた文脈を考慮する情報探索過程の可視化

Visualization of Search Processes Designed with Contexts Using by CoordiNavi

森 幹彦
Mikihiko Mori
京都大学
Kyoto University

堀 浩一
Koichi Hori
東京大学
The University of Tokyo

Abstract: We will propose the method of information visualization, when it is hard to classify information. In this method, the information is expressed by infon in situations and contexts. The information is represented by situation graphs and context graphs. We will also propose CoordiNavi using the method above.

1 はじめに

電子化されたものを含め、多くの文書が存在している。これらの文書に対して必要なカテゴリを用いて分類することが多い。古くは図書館の十進分類法から、最近ではWeb空間に対するYahooのWeb Site Directoryまで様々である。

しかし、これらにはいくつかの問題点がある。まず、これらの分類の仕方はあらかじめ決められており、情報を分類するときはその文書がどのカテゴリなのかを決めて入れていく。多くの場合それは手作業である。ある程度の量のときはうまくいくだろう。しかし、一つのカテゴリに入る文書が多くなると、そのカテゴリの中から、さらに必要な情報を探すための労力をかけなければならなく、本末転倒である。一方で、このような状況に対してカテゴリを増やすことで対応するなら、別の問題を引き起こす。すなわち、自分の求めている文書のあるカテゴリがどこにあるのかを探すための作業をしなければならない。この他に、自分の考えている分類基準とは異なる基準で分類されている場合には混乱してしまい、求めている文書のカテゴリを得ることも難しくなってしまう。これらの問題点は、結局のところ文書には決まったカテゴリがあらかじめ存在しており、それに沿って分類すれば文書を分類できるという仮定が間違っていることを意味している。上記では文書について議論しているが、文書が情報を伝える媒体である以上、情報の分類にも言えることである。

我々は上述の問題点を解決するためにはカテゴリについて以下のような性質が要求されると考える。

1. 分類は人によって異なる。
2. 分類は時間によって異なる。
3. しかし、カテゴリ間の関係が全く維持されないということはない。

そこで、本稿では、我々は、決まったカテゴリに分類することをあきらめ、情報を探す人の立場から情報を分類して提示する手法を提案する。あらかじめ決めたルールの代わりに、我々はカテゴリよりも小さい単位の概念を考え、その単位の合成をすることで文脈や状況によってカテゴリが生成されるグラフを用いた情報の表示法を議論する。

2 情報の表現と可視化

一般的に、文書の内容に重なりがある。例えば、文書を考えれば、類似文書がよく存在することからもわかる。文書が伝達する情報には最小単位があり、それが組み合わさってさまざまな情報を作り出していると考えることができる。ただし、情報の要素は全くばらばらではない。シソーラスにおける類似語同士の関係のように、情報の要素の間にも関係があると仮定する。つまり、ある情報に2つの情報の要素が存在するとき、この2つは別の情報の中にも存在することが期待され、このときに2つの情報の要素の間に関係があると認識される。

このような考え方は、情報意味論[1]における情報と状況の関係に似ており、状況意味論の用語を利用しながら我々の枠組みについて議論していくことにする。

したがって、本論文では情報に対し次のような仮定をする。情報には情報の要素すなわち情報素があり、情報は情報素が集まってできたものだと仮定する。すると、情報が形をなしてできる文書はその表現形である。また、情報の要素が集まって概念を形成していて、概念の構造が変化することで状況が変化し、その流れ

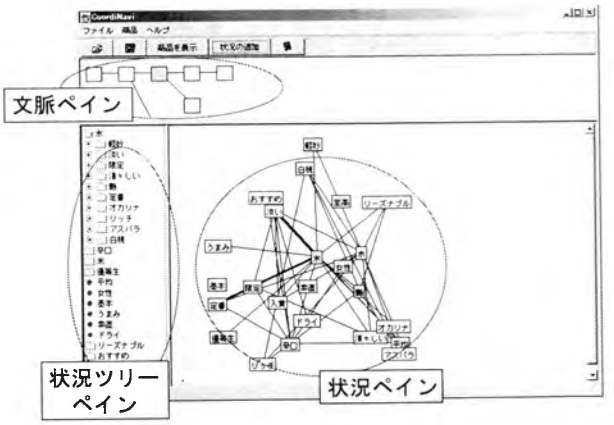


図 1: CoordiNavi の実行例

が文脈となると仮定する。

情報素は、オブジェクトとその関係で表される。そこで、オブジェクトを頂点として関係を辺とするグラフで情報を表現することにする。このとき、あるの情報は複数の情報素の集合であると考えられるので、多くの頂点を持つグラフになるはずである。また、その情報を伝達する文書が複数あるなら、文書を分類する行為は、このグラフの部分グラフを生成する行為であると考える。

このグラフはある状況下における情報素の関係であるため、このグラフが必ず一意に決まることはない。情報を探索する中で利用者の中にある探索要求の変化に従って状況も変化する。状況が変化するとそれに応じてオブジェクトの関係が変化し、情報素の関係も変化する。

このグラフは、ある状況における情報を俯瞰的に見ていると考えられる。しかし、情報の利用者にとって情報全体が見えることが好ましいとは限らない。多くの要素が見えた場合、利用者が混乱することが予想できる。そこで、情報と状況を利用者に理解させながら情報を提示することが重要であると考え、次の手法によりそれを実現する。重要であると考えるいくつかのオブジェクトを根に持つ木を先のグラフから生成し、利用者にその木を根から葉にたどらせることでオブジェクトのつながり方から情報素の関係を見つけ出させる。

一方、状況の流れが文脈を作るとした場合、文脈の表現法が必要である。そこで、状況を頂点とし状況の変化を辺とする木で表現する。一連の状況の変化を与えると、親子が 1 対 1 の木で表される。もし、ある状況における情報のグラフを再利用してもう一度その状況から新たな探索を始めると、木はその頂点から枝分かれする。

そこで、我々はこのようなグラフ・木を用いた状況と文脈を表現できる情報探索システム CoordiNavi を提案する。図 1 において、状況ペインは状況を情報素におけるオブジェクトの関係で表すグラフが表示される部分、状況ツリーペインは状況の木を表示する部分、文脈ペインは状況の流れを表す部分である。

3 関連研究

CoordiNavi のグラフ表現法を用いた前身のシステムとして、オンラインショッピング実験システム S-Conart[3] がある。このシステムは、それぞれの状況を表現するために状況ツリーペインと状況ペインは持っていたが文脈を表現することができなかった。

DualNavi[2] は辞書と新聞記事を検索するシステムである。グラフと木で単語を表現する点で CoordiNavi の表示部分が似ているが、検索過程を表示できないという点で異なる。

4 まとめ

本稿は情報の分類における問題点を挙げ、その解決法の一つとして分類そのものをあきらめる一方で、情報素を考慮したオブジェクトの関係を表現して分類に近い意味を持つ集合を得ることで情報の探索を可能にするシステム CoordiNavi を提案した。今後、CoodiNavi にを蓄えた情報を元に探索をする実験を通じてシステムの評価を行いたい。

参考文献

[1] Barwise, J. and Perry, J., Situations and Attitudes, Cambridge, MA and London, MIT Press, 1983.

[2] Niwa, Y., Iwayama, M., Hisamitsu, T., Nishioka, S., Takano, A., Sakurai, H. and Imaichi, O., Interactive Document Search with DualNAVI, Proceedings of NTCIR'99, pp. 123–130, 1999.

[3] Shoji, H., Mori, M. and Hori, K., S-Conart: Concept Articulator for Shoppers, Proc. AAAI Fall Symposium Series, pp. 41–47, 2002.

Webページ作成者の主観的評価推定のための特徴量に関する考察

Consideration on Features for Estimating Subjective Evaluation from Web Pages

高間 康史*,**　　田村 美由紀*
Yasufumi Takama*,**　　Miyuki Tamura*
*東京都立科学技術大学
*Tokyo Metropolitan Institute of Technology
**科学技術振興事業団
**PRESTO, Japan Science and Technology Corporation

Abstract　A method for estimating subjective evaluation from web pages is proposed. The method employs adjectives, adverbs as the features of pages, and experimental results show those features are more suitable for estimating subjective evaluation than conventional, noun-based features.

1　はじめに

Webにおける情報発信者の主観的評価を，ページ内容を解析することにより推定することを目的として，適切な特徴量について考察する．Web上では様々な情報が公開されているが，誰もが情報発信者になれるという特徴を持っているために，同一の話題についても情報発信者毎に異なる解釈・評価の元に多数のページで言及される事が多い．従来の文献検索やデータベースシステム的観点からWebを扱おうとする場合には，この様な情報の冗長性はWebの利用を困難にする要因であるが，特に近年では，blogの様な情報発信者の主観・意見がメインであるサイトに注目が集まるなど，情報発信者の主観的評価に関する情報は，Web上の重要なリソースになりつつある．具体的な応用としては，商品購入時の意思決定における判断材料，自社製品の評判の調査，自分と興味を同じくする他者・コミュニティの発見，などが考えられる．

一般に，主観的評価は形容詞句・副詞句などによって記述されると考えられ，発話意図の解析などに応用した研究が存在するが[1]，本稿ではこれらを文書の特徴量として用い，情報発信者の主観的評価を推定する手法を提案する．実際のWebサイトで公開されている情報を用いた実験結果により，従来Web情報検索システムなどで主に扱われてきた名詞句中心の特徴量を用いるよりも有効であることを示す．

2　主観的評価推定アルゴリズム

本稿では，以下の手順により情報発信者の主観的評価の推定を行う．

学習フェーズ

1. 訓練例として，N 段階 $(1 \ldots N)$ にランク付けされたWebページを各ランク毎に M 文書ずつ用意する．

2. 各訓練例のテキスト部分から，茶筌[1] を用いて形態素解析を行い，固有名詞，代名詞などを取り除いたものを索引語とし，そのTFを各ランク毎に求める．以降，索引語 i のランク n におけるTFを TF_i^n とする．

3. ステップ2で求めた訓練文書の特徴量を元に，索引語 i の重み W_i を式1により計算する．

$$W_i = \sum_{n=1}^{N} \frac{n - N_M}{2} \cdot \frac{TF_i^n}{TF_{all}} \qquad (1)$$

ここで，TF_{all} は全訓練例中の単語総数，N_M は真ん中のランクである．

[1] http://cl.aist-nara.ac.jp/

評価推定フェーズ

1. 評価対象 Web ページより，学習フェーズステップ 2 と同様に索引語とその TF を求める．以降，索引語 i の Web ページ j における TF を TF_i^j とする．

2. 学習フェーズで求めた W_i を用い，ページ j の評価推定値 S_j を式 2 により求める．S_j が大きいほど，高ランクと推定したことになる．

$$S_j = \sum_{index_i} TF_i^j \times W_i \qquad (2)$$

3 評価実験結果

評価実験には，同一人物による評価記事がある程度多数入手可能であり，かつランク付けされている事を条件として，ある個人の映画批評サイトを利用した．このサイトでは各映画について，その感想を文章で記述してある他に，1 つ星 (☆) から 5 つ星 (☆☆☆☆☆) によるランク付けも行われている．訓練例として各ランク毎に 5 記事ずつ計 25 記事を用いて索引語の重みを計算し，これを用いて残りのページの評価値を推定した結果を，各ページに実際に付与されたランキングと比較することにより提案手法の有効性を評価する．

図 3 は，49 評価記事について，横軸を情報発信者によるランク，縦軸を提案手法による評価推定値とした散布図である．ここで，“Proposed” は提案手法，“Nouns” は従来情報検索システムと同様に，名詞句について前節と同様のアルゴリズムを適用した結果，“Proposed+Nouns” は提案手法の索引語に，以下に示す名詞句も追加した結果である．これらの単語は，記事を分析することにより人手で追加したものである．

音楽，ダンス，歌，サントラ，ロック，ヒット，
曲，アクション，感動，友情，涙，原作

また，表 1 は，各手法のランク毎の評価推定値の平均，標準偏差を求めた結果である．これらより，提案手法に名詞句を追加した場合がもっとも良い結果となっているが，提案手法のみでも十分良好な結果が得られていることがわかる．

4 おわりに

本研究では，形容詞句・副詞句が情報発信者の主観的評価を推定する際の特徴量として名詞句よりも優れていることを示した．また，語義や表記のゆらぎが名詞句よりも少ないため，索引語抽出時のノイズが少ないという利点も確認できた．本研究では単純な重み付けを用いたが，高精度なモデルの導入や，訓練例の量と精度の関係の考察などを行う予定である．また，名詞句の中にも主観的評価の推定に有効なものが存在するが，これらを訓練例などから自動的に判別する手法についても今後の課題である．

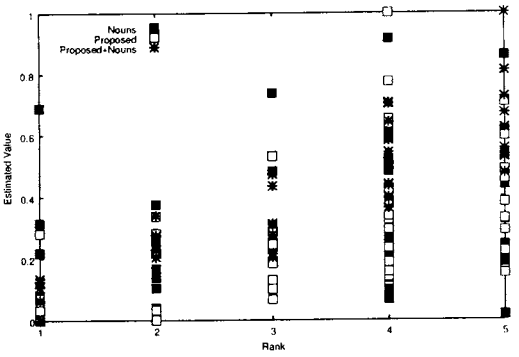


図 1: 評価推定値とランクの関係

表 1: 評価推定値の平均と標準偏差

Rank	Nouns	Proposed	Prof+N
5	0.33	0.38	0.65
	(0.24)	(0.19)	(0.16)
4	0.31	0.38	0.53
	(0.27)	(0.24)	(0.1)
3	0.32	0.23	0.33
	(0.24)	(0.15)	(0.1)
2	0.18	0.15	0.25
	(0.12)	(0.15)	(0.05)
1	0.23	0.07	0.11
	(0.25)	(0.1)	(0.07)

参考文献

[1] 吉江他，肯定／否定意図を検出するチャットシステムのための肯定値計算手法の改良，第 17 回ファジィシステムシンポジウム，pp. 513-516, 2001.

[問い合わせ先]
〒 191-0065 東京都日野市旭が丘 6–6
都立科学技術大学 高間 康史
Tel/Fax: 042-585-8629
E-mail: ytakama@cc.tmit.ac.jp

ユーザによる情報投稿／評価実績を利用した情報信用度評価方式

Scoring the Credibility of Information on BBS

井口 誠 Makoto Iguchi　寺田 雅之 Masayuki Terada　藤村 考 Ko Fujimura

NTT 情報流通プラットフォーム研究所
NTT Information Sharing Platform Laboratories

Abstract: This paper proposes a reputation-based method for scoring the credibility of information on BBS. The proposed method defines two types of scores, one for scoring user's trustworthiness regarding to her provision of information and another for scoring user's reliability regarding to her evaluation of information, to represent user's past behavior accurately. Utilizing these scores in information credibility calculation allows our method to be robust such that the method can be implemented in an environment where several known attacks exploiting "ambiguity of identity" exists.

1. はじめに

近年、ネットワーク利用者数の増加に伴い、電子掲示板や Weblog などに代表される Web 情報共有コミュニティの活性化が注目を集めている。また、物理的距離の制約を越えた「不特定多数の他人」との知識共有の場という Web コミュニティの特長を生かしたサービスとして、コミュニティ間で共有される情報をビジネスに生かすという試みも行われ始めている [6]。

このような Web コミュニティを有益な情報源として活用するサービスを実現する際、問題となるのが情報の信憑性である。ネットワーク上に共有される情報の質は玉石混淆であり、「玉」と「石」の見極めは必ずしも容易ではない。これは「不特定多数の他人」を相手にするという性質上、情報の信憑性を判定する上で重要な要因となる「情報源の信用性」が曖昧になってしまうことが大きな原因となっている。

本稿では、Web 上での情報共有の場の一つである電子掲示板を例に取り、「玉石混淆」な情報共有の場より信憑性の高い情報を抽出する手段を提案する。提案方式は、掲示板利用者毎の過去の情報提供実績および情報評価実績を加味した形で投稿情報の信用度をスコアリングしており、このスコアを参考情報に「玉」情報の抽出する手段を利用者に提供する。

2. 関連研究

「不特定多数の他人」を相手とする際に問題となる信用性の曖昧さに関しては、電子商取引や P2P ネットワークの分野において活発な検討が進められており、近年この問題への解決策として reputation 技術が注目を集めている [5]。ここで reputation 技術とは、利用者によるオブジェクト (i.e. 他の利用者や情報) に対する評価を集計した結果に基づいてオブジェクトの「評判」を算出し、この「評判」の高いオブジェクトが信用できると見なす技術を指す。

このような方式の一例が、eBay [3] において採用されている feedback rating システムである。このシステムでは、利用者の過去の取引実績を表す feedback rating と呼ばれる数値を定義し、この数値を用いて利用者の信用性 (オークション取引に関する信用性や、この利用者により投入された他利用者への評価に関する信用性) を計っている。しかし「評価荒らし (意図的に他人の rating を下げるような評価を投入する行為)」等の攻撃に対して脆弱であるという指摘 [2] があり、電子掲示板という「荒らし」等の攻撃がはびこる場に直接適用可能な方式とは言い難い。

また、評価の集計方法を工夫することにより、このような攻撃への対応を施した reputation システム [1] も提案されているが、匿名掲示板[1]という「identity の曖昧性 (システム上の ID と実際の人との間のリンケージの曖昧さ)」が存在する状況下においては、複数 ID を利用した reputation の意図的な操作や ID 乗り換えによる reputation の無効化などの攻撃が存在することが指摘されている [2][4]。特に自分の「評判」が下がった時点で利用している ID を捨て、新たな ID を登録することで自分の「評判」をリセットする攻撃への対応が課題として残っており、匿名掲示板における情報共有の場に既存の手法をそのまま適用することは難しい。そこで本研究では、匿名掲示板においても効果的に信憑性の高い情報を抽出可能とするために、「identity の曖昧性」が存在する環境下においても適用可能な reputation 管理手法を実現する。

3. 情報信用度評価の詳細

以下、本稿で提案する電子掲示板における情報信用度評価方式について説明する。

3.1. 電子掲示板における情報投稿の捉え方

電子掲示板に対する情報投稿は、多くの場合既に投稿されている情報に対するリプライ (返信) の形をとる (図 1)。この上で、情報投稿というアクションは、実際には「新規情報の提供」というアクションと「既存情報に対するコメント (評価投入)」という 2 つのアクションを同時に行なっていると見なすことができる。図 1 における「○○って…」という情報に対するリプライとして「そうかも…」という情報が投稿されたケースを例に取ると、この情報投稿というアクションによって「さらに△△を…」という新たな情報が電子掲示板上に共有されると共に、「○○って…」という情報に対して「そうかも」という評価が投入されていることになる[2]。

ここで、新規に共有された情報と既存情報に対して投入された評価は、情報投稿を行った利用者の能力に応じてそれぞれ個別にバイアスをかけた形で解釈を行なうべきである。すなわち、信用できる情報を提供しそうな利用者による情報投稿については、新規に共有された情報の信憑性を高く見積もり、妥当な評価を投入しそうな利用者による情報投稿については、投入された評価が評価先情報の信憑性に及ぼす影響をより強くするような機構を実現することが重要となる。

---

[1] 本稿における「匿名」とは pseudonym のことを指す。

[2] ただし返信の形をとらない情報提供 (i.e. スレッドのトップ記事投稿) については、新規情報の提供のみであると見なす。

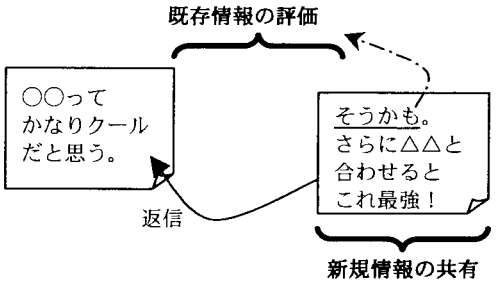


図 1: 電子掲示板に対する情報投稿の考え方

3.2. 情報・利用者のスコア

前節の考え方を元に、本方式では掲示板の各利用者について、以下の２つのスコアを定義する。

情報提供スコア TC_i ：利用者 i $(i=1,2,...,n)$ が、過去どの程度信用できる情報を提供してきたかを示す指標。このスコアが高ければ高いほど、この利用者は信用できる情報を提供してきたと見なす。

情報評価スコア TE_i ：利用者 i $(i=1,2,...,n)$ が、他の情報に対してどの程度妥当なコメント（評価）をしてきたかを示す指標。このスコアが高ければ高いほど、この利用者は妥当なコメントをしてきたと見なす。

利用者に情報提供スコアと情報評価スコアという２つのスコアを定義することで、利用者がどれだけ信用できる情報を電子掲示板に提供してきたかという実績と、利用者が既に電子掲示板にて共有されている情報に対してどれだけ妥当な評価を下してきたかという実績をそれぞれ個別にスコアリングする。

上記２つのスコアを利用して、本稿で提案する情報信用度評価方式は、掲示板に投稿された各情報について以下のスコアを算出する。

情報信用度スコア R_j ：情報 j $(j=1,2,...,n)$ がどの程度信用できるのかを示す指標。このスコアが高ければ高いほど、その情報は信用できると見なす。

また情報信用度スコアの算出のために、情報投稿に伴い投入される評価を以下のように数値化する。

評価 e_{ij} ：利用者 i により情報 j に対して投入された評価の強さを表す指標。この数値が高ければ高いほど、より強く情報に賛同していると見なす。またマイナス値は情報に対する反対の意思を表す。

3.3. 情報･利用者スコアの相互影響

利用者の情報提供/評価スコアと、情報の情報信用度スコアは、図２に示すように相互に影響を及ぼしあう。この相互影響の関係は、以下に示す４つの仮説に基づいて実現される。

仮説 1 :
(情報提供者として)信用できる利用者により投稿された情報は信用できる。

新規に投稿された情報の信用度を予測する上で、この情報を投稿した利用者の過去の情報投稿実績は重要な参考情報である。この仮説に基づき、情報 j が利用者 i により新規に投稿された場合、情報信用度スコア R_j を以下の式により算出する。

$$R_j = \kappa \cdot TC_i \qquad (1)$$

ここで κ は利用者の情報提供スコアが情報信用度スコアに及ぼす影響力を制御するパラメータである。

仮説 2 :
(情報評価者として)信用できる利用者によりプラス評価された情報は信用できる。

電子掲示板に投稿された情報が他の利用者より良い評価を受けた場合、この情報の信用度は増加する。この際、投入された評価が情報の信用度に及ぼす影響は、評価を投入した利用者の情報評価実績の影響を受ける。すなわち、情報評価実績の高い利用者により投入された評価は、情報評価実績の低い利用者により投入された評価と比較して、より大きな影響を情報信用度に及ぼす。この仮説に基づき、情報 j に対して利用者 i が評価 e_{ij} を投入した場合における情報信用度スコアの変動 ΔR_j を以下の式により算出する。

$$\Delta R_j = \varepsilon \cdot e_{ij} \cdot TE_i \qquad (2)$$

ここで ε は利用者による一回の評価投入が情報信用度スコアに及ぼす影響力を制御するパラメータである。

仮説 3 :
他の利用者よりプラス評価を受ける情報を投稿している利用者は（情報提供者として）信用できる。

電子掲示板に投稿した情報が他の利用者よりプラス評価を受けている（i.e. 情報の信用度がアップした）場合、この事実をもって該当情報を投稿した利用者の情報提供実績は上方修正される。この仮説に基づき、利用者 i により情報 j が提供された後、この情報信用度スコアが ΔR_j 変動した場合における、情報提供スコアの変動 ΔTC_i を以下の式により算出する。

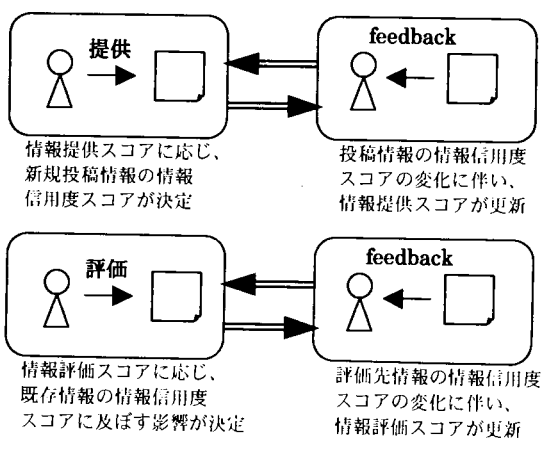


図 2: 情報･利用者スコアの相互影響

$$\Delta TC_i = \tau \cdot \Delta R_j \qquad (3)$$

ここでτは情報信用度スコアの変動が利用者の情報提供スコアに及ぼす影響力を制御するパラメータである。

仮説4：
大多数の利用者と同様の評価を投入している利用者は(情報評価者として)信用できる。

電子掲示板に対して投入した評価が妥当な評価であった場合、この事実をもって該当評価を投入した利用者の情報評価実績は上方修正される。ここで妥当な評価とは、大多数の利用者が下している評価と同方向の評価(大勢に従った評価)と定義する。この仮説に基づき、利用者iが情報jに対して評価e_{ij}を投入後、この情報の信用度スコアがΔR_j変動した場合における、情報評価スコアの変動ΔTE_iを以下の式により算出する。

$$\Delta TE_i = \lambda \cdot e_{ij} \cdot \Delta R_j \qquad (4)$$

ここでλは情報信用度スコアの変動が利用者の情報評価スコアに及ぼす影響力を制御するパラメータである。

3.4. 情報信用度評価の効果

本方式では仮説1と2に基づき、信憑性の高い情報に対して高い情報信用度スコアが割り振られるように設計されている。式(1)と(2)により、情報提供スコアの高い利用者によって投稿された情報に高い情報信用度スコアが初期値として割り振られ、さらにプラス評価を受けている情報の信用度スコアがアップするため、電子掲示板閲覧者は情報投稿者の実際の投稿履歴を直接知ることなく、情報信用度スコアのみを判断材料に情報の選定を行なうことができる。また式(3)により、利用者による情報評価の結果が利用者の情報提供スコアにフィードバックされるため、信憑性の高い情報を提供していると認められた利用者(i.e. 以後信憑性の高い情報を提供してくれる可能性が高い利用者)の情報提供スコアが増加する。この更新により、次にこの利用者が情報投稿を行なった際、該当情報はより高い情報信用度スコアの初期値を得ることになる。

さらに式(2)では、投入された評価を利用者毎の情報評価スコアで重み付けすることにより「質の良い」評価と「質の悪い」評価との差別化を行なっているため、精度の高い情報評価が実現されている。また式(4)によって、利用者の情報評価スコアへのフィードバックを行なっており、妥当な評価を投入している(i.e. 情報信用度がアップした情報に対してプラスの評価をしているか、情報信用度がダウンした情報に対してマイナスの評価をしている)利用者の情報評価スコアをアップしている。この更新により、次にこの利用者が評価を投入した際には、より大きな影響を情報信用度スコアに及ぼすことになる。

4. 情報信用度評価方式の定性的評価

電子掲示板においては「identityの曖昧性」が存在するため、この曖昧性を突いた攻撃に対する提案方式の耐性を検証する。ここでは、「identityの曖昧性」に対する攻撃であるスコアの無効化[4]とスコアの自演操作[2]についての検証を行なう。

スコアの無効化とは、でたらめな情報提供や評価投入を行なってきた攻撃者が、あるタイミングで自分のIDを捨て、新たなIDに乗り換える攻撃のことである。この攻撃により、攻撃者は自分の旧IDに付与された低い情報提供/評価スコアから、新IDに付与される初期情報提供/評価スコアへと「生まれ変わる」ことを狙う。

この攻撃に対する最も効果的な対応策は、ID乗り換えによるメリットをそもそもなくしてしまうことである。本研究の情報信用度評価方式では、情報提供/評価スコアに下限値を設けた上で、新規IDに割り当てる初期情報提供/評価スコアをこの下限値より低い値に設定することにより、ID乗り換えに伴うスコアのリセットの意味をなくすことができる。この際、(悪意のない)新規参加者の初期スコアも下限値より低く設定されてしまうが、式(3), (4)で示されているように情報提供/評価スコアに対するフィードバックの度合いは、情報提供/評価スコアの数値自体には依存しない(情報提供/提供スコアへのフィードバックは、それぞれ利用者が投稿した情報がどれだけ支持を集められたか、利用者が投入した評価がどれだけ他の利用者の評価に沿っているかにのみ依存する)ため、新規参入者が理不尽な不利益を被ることはない仕組みとなっている。

スコアの自演操作とは、攻撃者が複数のIDを登録した上で、あるID(例えば「smith」)で投稿した情報に対して、自分が持つ別のID(例えば「neo」)でプラス評価を投入する攻撃を指す。この攻撃により、攻撃者は自分の投稿した情報の情報信用度スコアを故意に上げると共に、自分が所有するIDに付与される情報提供/評価スコアも故意に上げることを狙う。また同様な攻撃として、複数の利用者が結託し、あるIDの情報提供/評価スコアの操作を狙う攻撃も想定される。

このタイプの攻撃に対する有効な対応策は、攻撃者により投入された評価が情報信用度スコアに及ぼす影響を小さくすることである。提案方式では、利用者の情報評価スコアを用いることで、スコアが自演操作攻撃により受ける影響の極小化を試みている。式(2)で示されているように情報信用度スコアの変動は評価投入者の情報評価スコアの影響を受けるため、評価投入用IDに付与された情報評価スコアが低い場合、効果的なスコアの自演操作は不可能である。さらに式(2)のεを大きな値に設定して情報評価スコアの高低による情報信用度スコアへの影響の幅を大きくすることで、情報評価スコアの低い攻撃者による情報信用度スコアへの影響を相対的に低く抑えることができる。ただしこの場合、εの値を大きくすることによる副作用として(悪意のない利用者による)一回の評価投入が情報信用度スコアに及ぼす影響が大きくなりすぎるという危険性も併せ持つため、妥当なεの設定についてさらなる検討が必要である。

また攻撃者が自演操作をする前段として妥当な評価を継続して投入することで高い情報評価スコアを築き上げた場合、攻撃への対応は難しくなる。攻撃者による情報評価実績の急激な構築を抑制する方策として式(4)のλを小さな値に設定する対応が考えられるが、この場合悪意のない利用者についても情報評価実績蓄積のスピードが遅くなるという副作用が発生する。ε同様、妥当なλの設定についてもさらなる検討が必要である。

5. まとめ

本研究では、電子掲示板という「identityの曖昧性」が存在する情報共有の場より、信憑性の高い情報を抽出するための手段を検討した。利用者の情報発信実績と評価実績を反映した信用度スコアを図3のプロトタイプ実装のように情報に付与することにより、信憑性の高い情報を掲示

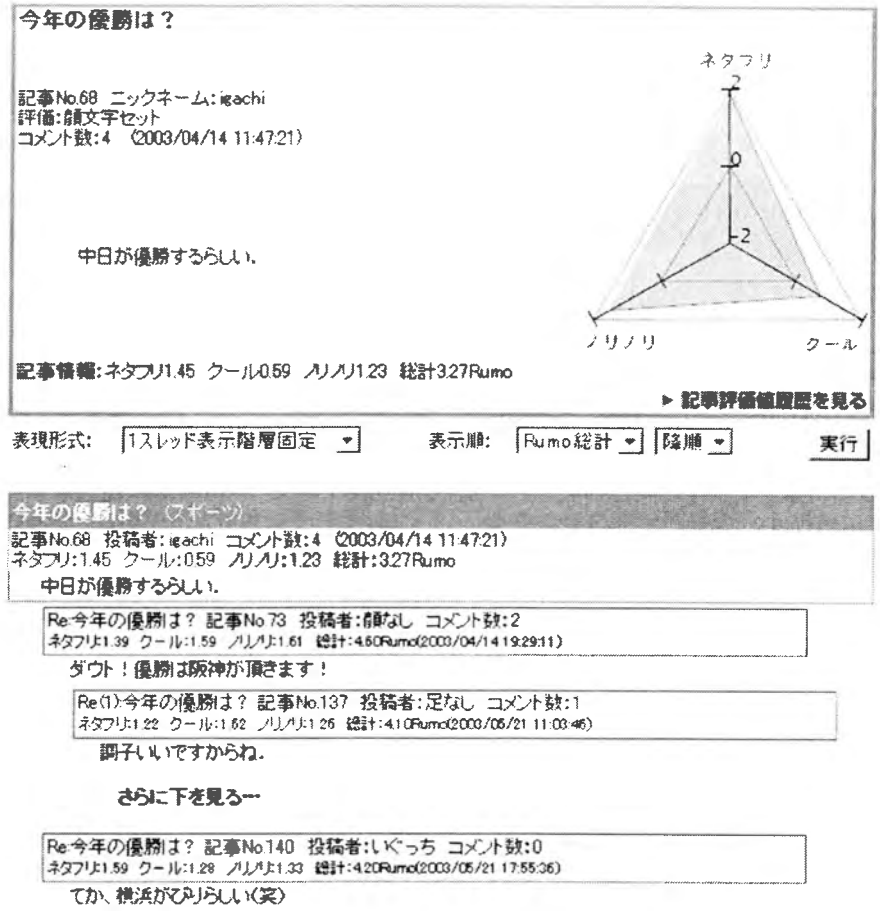


図 3: プロトタイプ実装からのスクリーンショット

板利用者が選択することが可能となった。(なお図 3 において「ネタフリ・クール・ノリノリ」という 3 つのスコアが提示されているが、これは「話題性・理性的観点・感情的観点」という軸に基づき利用者に情報に対する評価を投入させた上で、各々の軸毎に本稿にて提案した方式に基づく情報信用度スコアを算出した結果である)

本稿ではまた、スコアの無効化や自演操作といった悪意をもった利用者による攻撃について考察を行ない、提案する情報信用度評価方式がこれらの攻撃にある程度のレベルで対応可能であることを検証した。ただし 4 章で述べたようにさらなる検討が必要な課題が存在するため、今後提案方式の定量的な評価を行なう予定である。具体的には、各種攻撃パターンに基づく情報投稿を擬似的にシミュレートした上で、提案方式による情報抽出の精度を検証すると共に、攻撃に対する耐性実現へ向けた理想的なパラメータ設定の検討を行なう予定である。

さらに、掲示板に既に投稿されている情報を提案方式を用いて自動解析することを視野に入れた、情報投稿に伴う評価 e_{ij} の自動抽出手段についても検討を行なう予定である。

参考文献

[1] K. Aberer and Z. Despotovic: Managing Trust in a Peer-2-Peer Information Systems, Proc. of 10th International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM2001), 2001.

[2] C. Dellarocas: Immunizing Online Reputation Reporting System Against Unfair Rating and Discriminatory Behavior, Proc. of 2nd ACM Conference on Electronic Commerce, 2000.

[3] Ebay: http://www.ebay.com/

[4] E.J. Friedman and P. Resnick: The Social Cost of Cheap Pseudonyms, Journal of Economics and Management Strategy, Vol. 10, No. 2, 2001.

[5] P. Resnick, R. Zeckhauser, E. Friedman, and K. Kuwabara: Reputation Systems, Communications of the ACM, Vol. 43, No. 12, 2000.

[6] Julie Wakefield：インターネット上の雑談を分析するソフトウェアの可能性, 日経サイエンス, Vol. 32, No. 1, pp. 146-148, 2002.

連絡先：

〒239-0847
神奈川県横須賀市光の丘 1-1
NTT 情報流通プラットフォーム研究所
情報セキュリティプロジェクト
セキュリティ社会科学グループ
井口 誠
電話： 046-859-2663
FAX： 046-859-8329
Email： iguchi@isl.ntt.co.jp

統計グラフを用いたマルチモーダル質問応答システムの実現に向けて

Toward Multimodal Question-Answering System with Statistical Charts

松下 光範 †　　加藤 恒昭 ‡

Mitsunori Matsushita　　Tsuneaki Kato

† 日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所

Communication Science Labs., NTT Corp.

‡ 東京大学大学院 総合文化研究科

Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo

Abstract: The goal of the research presented in this paper is to develop a multimodal question-answering system that makes a reply to a user's request by using both texts and charts generated from a large amount of statistical data on the Internet. This paper discusses issues to be solved for developing the system such as a mode allocation strategy, question types to be handled, and visual prompts for a chart.

1　はじめに

ネットワーク環境の発達や Web サービスの普及等により、人は問題解決や意思決定のために大量の情報やデータを活用できるようになってきている。それに伴い、大量の情報の中から分析者 (ユーザ) の意図や関心に応じて必要な情報を効率的に取り出す技術の必要性が高まっている。このような背景の下で、ユーザの様々な質問に直接答える形で必要十分な情報だけを返す質問応答技術が現在盛んに研究されている [1]。

質問応答技術は、文書検索が中心である情報検索とテキスト処理技術のひとつである情報抽出とを組み合わせた技術と考えられる。情報抽出と質問応答との違いは、情報抽出では抜き出すべき情報に関するテンプレートが事前に与えられることを前提とするのに対して、質問応答ではテンプレートを事前に用意する必要が無く、ユーザが自然言語で表現する質問に対して、情報源として蓄積されている大量の文書集合からその回答となる語句 (主として固有表現や数値表現) を見つけ出す点にある。例えば、質問応答では「眼鏡を日本に伝えたのは誰ですか？」や「富士山の高さは？」等の質問を受け付けそれらに「フランシスコ・ザビエルです」や「3776 メートルです」と回答する。情報検索が一般に文書全体を結果として返すのに対して、質問応答は与えられた質問の回答として必要かつ十分で簡潔な言語表現を返すことが特徴である。また情報検索と同様に、特定の分野に関する質問だけでなく広範囲にわたる質問への対応を目指している点も質問応答の重要な特徴である。

質問応答はユーザの質問が情報源であるテキスト集合中に存在するような場合には有効な技術である。しかしながら、統計データのように様々な観点で利用されるような数値情報を対象とする場合には適切な回答を見つけ出すことができない。それは、一般に統計データに対するユーザ質問に回答するためには、ユーザの関心に応じてデータ範囲の選択や適切な粒度への集約といった処理が必要になるためである。更に統計データに対する質問には、テキストで回答するよりも表やグラフで回答するほうが直観的である場合も多いため、回答する内容に応じて適切なモードを選択して回答表現を生成することも必要になる。

この問題を解決するには、テキスト情報における質問応答に相当することを数値情報で行えるようにする新しい技術、すなわち大量の統計データからユーザの様々な関心の下で発せられる質問に応じてそのデータを集約し、適切な表現形式を選択して回答するマルチモーダル質問応答技術が必要となる。本稿ではその実現の足掛かりとして統計グラフを利用して回答する質問応答技術の枠組について提案する。

2 新聞記事におけるモード間協調

本研究で対象とするのは自然言語文を入力とし、棒グラフや円グラフ等の統計グラフと説明テキストを回答として出力するマルチモーダル質問応答システムである。ここで対象とする二つのモード (テキストとグラフ) は、容易かつ正確に伝達できる情報に違いがある。

テキストは特定の要素の名前や値を伝えるのに優れるが、「下落傾向にある」や「安定している」といった概況を伝えるために用いるのは、直観的ではあるものの主観的な判断を計算機が行わなくてはならないために、ユーザの直観に必ずしも合致する保証がなくそれだけでは不十分である。また、特定の要素の名前や値を回答する場合でも、回答する要素が多い場合には分かりにくくなる。それに対してグラフはその解釈をユーザに委ねることが出来るために、全体の傾向や比較を伝達する手段としてはテキストより優れていると言える。その半面、特定の値を伝える場合はユーザ自身が値を読み取る必要があるのでテキストに比べて直観性に劣る。

このような特徴を持つ二つのモードを活用して情報を伝達している媒体の一つとして、新聞記事が挙げられる。我々は一般全国紙 3 紙 (朝日新聞、読売新聞、毎日新聞) の朝夕刊各 3 ヵ月分を対象として、グラフと見出し文 (テキスト) の役割分担についての調査を行った [2]。その結果、見出し文とグラフは必ずしも同じ情報を伝えているのではなく、協調して情報を伝達している事が明らかになった。この分析によれば、新聞記事中には見出し文に対してグラフが (1) 見出し文で言及されている統計量に重ね合わせて別の統計量も描画している、(2) 対象を見出し文の言及よりも詳細な粒度で描画している、(3) 独立変数の範囲を必要以上に広くとって描画している、(4) ある統計量について見出し文で言及されていない対象まで描画している、等の事例が観察される。これは、見出し文が伝える情報に対して、グラフが補足関連情報や詳細情報、背景情報等を伝える役割を果たしているためだと考えられる。また、グラフが伝達する情報に対して見出し文が「株価は下落傾向にある」といった概況を伝える役割を果たしている事例もある。

このように、ユーザの質問に対する回答としてはグラフから読みとれる情報をテキスト化して提示するだけでは不十分で、ユーザに伝達する内容に応じて分担しなくてはならないことが分かる。従って、質問応答における回答生成の方針として、まず質問に応じてグラフを作成した後に、文献 [8] や文献 [3] 等で用いられている手法で説明文を生成するという方法では不十分であり、まず何を回答するかを決定した上で、二つのモードに割り当てるといった枠組が必要になる。

3 システムが取り扱う質問

上述したようなテキストとグラフの役割分担を決定するには、取り扱う質問のタイプを分類しそれに応じた回答方針を決定することで実現できると考えている。本章では、提案するマルチモーダル質問応答システムで取り扱う質問について述べる。

3.1 質問の分類

本研究では、ユーザからの質問として以下のような 3 種類の質問タイプを想定する。

1. 慨然的な質問
   例: 「2003 年の四国の売上高はどうなっていますか？」

2. wh- 質問
   例: 「2003 年に四国地方で最も売上高が多かった県はどこですか？」

3. yes-no 質問
   例: 「2003 年に四国地方で最も売上高が多かった県は愛媛県ですか？」

更に、これらの質問を前提として

4. 追加質問
   例: 「2002 年も見たい」「九州はどうですか」

という質問を許す。この質問は前の文脈を受けて行われる質問であり、それ自体では完全な質問の形式をとらない発話断片として与えられる。これは質問応答における枝問に相当する。

3.2 質問の表現

本研究では wh- 質問や yes-no 質問に含まれる述語として、以下に示す述語を想定している。

1. 個別の値同士の比較
   例: ～より 大きい、～より 低い、～と 等しい

2. 集団の中での比較 (順位)
   例: 最も 大きい、2 番目に 低い

3. ある瞬間の変化の記述
   例: ～に 達した、～を 下回った

4. ある期間の変化の記述
   例: 増え続けている、～と 変わらない

ここで、「大きい」や「低い」といった述語はその用いられ方の違いにより、個別の値同士の比較と集団の中での比較というように分けて考えている。

更に、この述語を修飾するものとして、以下のような修飾表現が考えられる。なお、修飾表現の意味は述語によって異なる。

1-1 個別の値同士の比較 (大小) に用いる修飾表現

(a) 倍率の表現
例: 2 倍以上 多い、 1 割ほど 少ない

(b) 差の表現
例: 100 万円 少ない、 20 万円くらい 少ない

(c) 程度の表現
例: とても 多い、 やや 少ない

1-2 個別の値同士の比較 (等しい) に用いる修飾表現

(a) 正確さの表現:
例: だいたい 等しい、 ちょうど 同じ

2 集団の中で比較 (順位) に用いる修飾表現

(a) 順位の表現
最も 大きい、 2 番目に 低い

3 ある瞬間の変化の記述に用いる修飾表現

(a) 程度の表現
例: ほぼ ～に達した、 大きく 越えた

4 ある期間の変化の記述に用いる修飾表現

(a) 程度の表現
例: 大きく 減った、 殆ど 変わらない

質問応答システムは述語と修飾表現の組み合わせで表現される制約条件を解釈し、wh- 質問の場合はそれを満たす要素の名前や値を、yes-no 質問の場合はその真偽を回答する。

4 回答の提示

本研究では、質問のタイプに応じてテキストとグラフの主導権を切り替える方法で、役割分担することを考えている。すなわち、慨然的な質問は、傾向や対象範囲に関する状況が回答として期待される質問であるため、テキストよりもグラフが回答に適していると考えられる。従って、この質問に対する回答ではグラフを主たる回答とし、テキストは副次的な回答という役割分担にする。一方、wh- 質問は、質問条件を満たす要素の名前や値が回答として期待される質問であるため、それらを簡潔に伝達できるテキストが回答に適していると考えられる。従って、この質問に対しする回答ではテキストを主たる回答とし、グラフが副次的な回答という役割分担にする。同様に、yes-no 質問はその問いが真か偽かを回答すべき質問であるため、この質問に対してもテキストを主たる回答とし、グラフが副次的な回答という役割分担とする。

このような役割分担をする場合、グラフとテキストの伝達する情報の関連性を高めるために、グラフの視覚効果 (visual prompt) を適切に調整する必要がある。グラフは、ユーザにそのグラフが伝達する情報のうち定の意図を読みとらせるために強調・加工することが可能である。統計データを単一のグラフを用いて表現する場合[1]、ユーザの注意を喚起する視覚効果 (visual prompt) は 2 つに大別できる [7]。一方はグラフ種や軸のスケール、原点の位置などグラフ生成時のデザインに関するもので、もう一方は矢印や補助線、アノテーションの付与などグラフ上に付加的に表現されるものである。

例えば、慨然的な質問の場合、同じ数値データを表現する場合でもテキストが「安定している」様子を伝える場合には、y 軸の描画範囲を広く取って値の変動が小さくなるように見せ、逆に「乱高下している」や「上昇している」などの変化の様子を伝える場合には、y 軸の描画範囲を狭くして値の変動が大きく見やすくなるように調整する。これにより、テキストの伝達する内容とグラフの伝達する内容が整合する。

また、wh- 質問や yes-no 質問の場合は、ユーザの関心はある要素にあるので、その要素の名前や値をアノテーションとして表示したり、基準となる値に基準線を表示する、等によりテキストとの連携を図る。

5 マルチモーダル質問応答におけるファジィ処理の可能性

マルチモーダル質問応答において利用可能なファジィ処理は大別して 3 つあると考えている。

一つ目はユーザの質問に曖昧さが含まれる場合の解釈である。3.2 節からも分かるように、ユーザから与えられる質問にはファジィ述語 (fuzzy predicates) やファジィ修飾語 (fuzzy modifier) [9] が多く含まれている。従って、このような表現を含む質問を処理するには、質問をファジィ命題と捉えて評価する必要がある。この処

[1] アジア各国の経済成長率と欧州各国の経済成長率を別々のグラフに描いて対比させるような、複数のグラフを用いた表現方法も存在するが、本稿では取り扱わないこととする。

理にはテスト・スコア意味論 [10] の考え方が利用可能であると考えている。

二つ目はユーザに回答するテキストの生成である。例えば、ユーザにテキストで概況を伝える場合には、詳細な値を示すよりもファジィ述語やファジィ修飾語を用いて示すことで直観的な理解を促すことができると考えられる。また、ユーザの質問にファジィ表現が含まれる場合には回答すべき内容が必ずしも真とは言えない状況が生じうる。このような場合にはムード表現を伴った回答を生成することでその確からしさをユーザに伝達する事ができる [5]。このようなムード表現の生成のために文献 [6] の方法等が利用可能であると考えている。

三つ目はユーザに回答するグラフの適切さの度合の評価である。前述したように、wh- 質問や yes-no 質問に回答する際に描画する要素を詳細化して提示したり独立変数の範囲を広くして提示したりすることで、テキストが伝える内容の補足や背景を説明することができる。これはユーザにとって有益であると考えられるが、グラフが詳細すぎたり範囲を広く取りすぎたりした場合、かえって理解を損なう可能性がある。そのためグラフの適切性を判断する必要があるが、これは APT [4] で用いられている表現基準 (expressive criteria) と効果基準 (effectiveness criteria) のようにヒューリスティックスを用いた評価となるため、ファジィ的側面を強く持つと考えられる。

6 おわりに

本稿では、ネットワーク上に存在する豊富な数値・統計データを利用して、ユーザの興味や質問に図表や自然言語表現を活用して回答するマルチモーダル質問応答システムが取り扱うべき質問のタイプやユーザへの回答提示方針について検討し、その実現のために必要となる技術を考察した。

参考文献

[1] 加藤恒昭: 自然言語による情報検索と類似性, 日本ファジィ学会誌, Vol. 13, No. 5, pp. 436–444 (2001).

[2] 加藤恒昭, 松下光範: 新聞記事におけるテキストとグラフの協調に関する分析, 言語処理学会第 9 回年次大会, pp. 47–50 (2003).

[3] 小林一郎: グラフ情報からのテキスト生成への一考察, 言語処理学会第 5 回年次大会, pp. 149–152 (1999).

[4] Mackinlay, J.: Automating the Design of Graphical Presentations of Relational Information, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 5, No. 2, pp. 110–141 (1986).

[5] 益岡隆志, 田窪行則: 基礎日本語文法 — 改訂版 —, くろしお出版 (1992).

[6] 松下光範, 佐藤浩史, 加藤恒昭: 言語表現による情報提供のための情報統合, 日本ファジィ学会誌, Vol. 14, No. 5, pp. 461–471 (2002).

[7] Mittal, V. O.: Visual Prompts and Graphical Design: A Framework for Exploring the Design Space of 2-D Charts and Graphs, *Proc. 14th National Conference on Artificial Intelligence*, pp. 57–63 (1998).

[8] 中嶋秀治, 大内幸雄: 数値データ説明文生成に関する一考察, 1993 年電子情報通信学会春季大会, Vol. 6, p. 110 (1993).

[9] Zadeh, L. A.: A Fuzzy-Set-Theoretic Interpretation of Linguistic Hedges, *Journal of Cybernetics*, Vol. 2, No. 2, pp. 4–34 (1972).

[10] Zadeh, L. A.: Test-Score Semantics as a Basis for a Computational Approach to the Representation of Meaning, *Literacy and Linguistic Computing*, Vol. 1, pp. 24–35 (1986).

[問い合わせ先]

〒619–0237 京都府相楽群精華町光台 2–4
NTT コミュニケーション科学基礎研究所
松下 光範
TEL: 0774-93-5232. FAX: 0774-93-5245
E-mail: mat@cslab.kecl.ntt.co.jp

ネットオークション上の商品紹介文のテキストマイニング

Text Mining on Item Descriptions in Net Auction

土方嘉徳　楠村幸貴　西田正吾
Yoshinori Hijikata　Yukitaka Kusumura　Shogo Nishida
大阪大学大学院基礎工学研究科
Graduate School of Engineering Science , Osaka University

Abstract Net auctions have been widely utilized with the recent development of the Internet. However, it has a problem that there are too many items for bidders to select the most suitable one. We aim at supporting bidders on net auctions by automatically generating a table containing the features of some items for comparison. We constructed a system called NTM-Agent(Net auction Text Mining Agent). The system collects the information of items, filters the items which is different from the item of the user's target, and extracts their features from their text information by text mining methods. After that it generates the table containing extracted features.

1. はじめに

近年，ネットオークションが盛んであり，非常に大量の商品が毎日出品されている．通常ネットオークションでは，ユーザはキーワードなどで商品を検索し，得られた複数の商品について出品者によって記述された商品の紹介文を読み，それらの商品を比較して入札する商品を決定する．しかし，商品の数が多くなってくるとこの作業は大変なものになる．

本研究ではこの問題に対し，商品の比較表を自動生成するエージェント（NTM-Agent:Net auction TextMing Agent）を提案した [1]．NTM-Agent はユーザの検索要求に適合する商品の紹介ページを収集し，商品の特徴について説明している文章 (以下，商品紹介文) からその特徴に関する情報を抽出し，それらを用いて商品の比較表を生成する．

本研究では実用性の高い支援システムを目指すこととし，商品ごとに目的の情報を精度良く抽出できるようにするため，商品に関するドメイン知識[1]を用いる．具体的には，商品の特徴の属性を示すキーワード (以下，属性名) [2]をドメイン知識として用い，対応する値 (以下，属性値) の抽出を行う．

このようにしてネットオークション上で商品の情報を収集し，紹介文から情報を抽出するには次の問題がある．

問題 1　出品商品の分類が不均一である

出品者が自由にタイトル[3]を付けて分類を行うため，目的の商品と異なる商品 (以下，ノイズ商品) [4]が検索結果に混じる．

問題 2　紹介文の記述が不均一である

出品者によっては記述内容に属性名の省略がある (日本語の特性として主語が省略されがちであることがこの一因となっている)．また，出品者が自由に紹介文を記述するため，レイアウトに表，箇条書き，文章といった複数の記述パターンが混在する．

これらの問題に対して，次の解決方法を用いる．

解決策 1　タイトルと商品紹介文中のキーワードについての相関ルールでフィルタリングを行う．本研究ではマーケットバスケット分析を用いて相関ルールを生成する支援ツールを作成する．

解決策 2　属性名の抜けに対しては，属性名とその値の記述に関してその対応の簡単な記述例から学習を行う．学習後，属性名が書かれておらず，学習された属性値のみ書かれているテキストを発見すれば，その属性値を抽出する．不均一なレイアウトに対しては，表か箇条書きか文章かを判断して，その記述形態に最も適した方法で情報抽出を行う．

本稿では??章で関連研究について述べ，本研究との違いを明確にする．3. 章では NTM-Agent の大まかな処理の流れと，NTM-Agent で使用するドメイン知識について述べる．4. 章では問題 1 に対処する方法としてノイズ商品のフィルタリングについて述べる．5. 章では問題 2 に対処する方法として紹介文からの

[1]システムに事前に与えられる，特定の分野と問題などに関する知識

[2]パソコンの場合，「CPU」や「メモリ」などのキーワード

[3]ネットオークションでは出品者が商品に名前を付ける．その名前はその商品の紹介ページでタイトルとして表示される．

[4]パソコンを検索した場合に検索結果に含まれるメモリ，キーボードなどの商品

情報抽出について述べる．6. 章では実装したシステムの構成と実行例について述べる．最後にまとめを?? 章で行う．

2. 関連研究

大量の商品に関する情報を整理して提供する支援サイトには価格.com[2]，Libra[3]，Bestlot.com[4] が，研究例には Biddingbot[5] と shopbot[6] がある．価格.com と Libra はサイト内 (価格.com，Libra) のデータベースから商品を検索し，そのリストをユーザに提示する．出店者は定期的に商品とその特徴を検索サイトに提供しなければならない．Bestlot.com と Biddingbot はユーザの検索要求を複数のオークションサイトに送信し，検索結果をまとめて表示してくれる．ただし，抽出する情報は商品名と価格のみである．shopbot はオンラインショップ上の商品を Web 上から検索し，商品の概要を提供する．オンラインショップの商品ページは一定の記述とレイアウトであることが多いため，shopbot は商品ページは一定の記述とレイアウトをドメイン知識を用いてページ中の商品の特徴が記述される位置を学習し，抽出に利用している．ただし，この手法はオンラインショップのように一定の記述とレイアウト持つサイトにしか適応できない．

NTM-Agent は価格.com，Libra と異なり，自動的に Web 上から情報収集を行う．さらに，Bestlot.com，Biddingbot と異なり，価格のみでなく，製品の性能や状態に関する情報までを収集する．Shopbot は決まった記述とレイアウトを持つサイトからしか情報抽出できないが，NTM-Agent は記述とレイアウトが不均一な商品の紹介文に対して文章の解析を行う．

3. NTM-Agent システムの概要

ユーザ側から見た NTM-Agent システムの大まかな処理の流れについて 3.1. 節で述べる．また，NTM-Agent は処理を行う際にドメイン知識を用いている．このドメイン知識については 3.2. 節で述べる．

3.1. 処理の流れ

NTM-Agent の処理の流れを以下に示す (図 1 参照)．

1. ユーザがシステムに検索キーワードまたはネットオークション内の検索結果のページ (以下，検索結果ページ) の URL を入力する．また，これと共に目的の商品のカテゴリ（「ノートパソコン」や「自動車」などのことで，3 のノイズの除去と 4 の情報抽出の際に用いる.）を入力する．
2. キーワードまたは検索結果ページの URL をオークションのサイトに送信し，出品商品の検索結果を得る．
3. 検索結果の中から，ノイズとなる商品を除く．

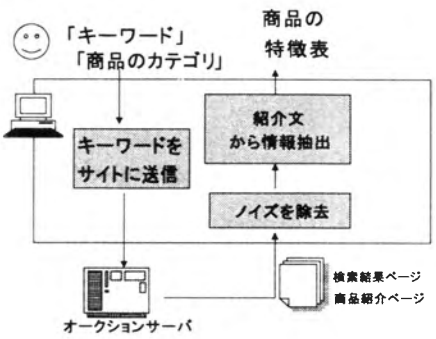


図 1: NTM-Agent の処理の流れ

4. 残った商品の紹介文から情報抽出を行い，比較表を作成する．

3.2. ドメイン知識

NTM-Agent は次のドメイン知識を用いて処理を行う．

探索用ドメイン知識　オークションサイトのリンク構造，オークションサイトの検索クエリーのテンプレート，検索結果ページと商品紹介ページのテンプレート

抽出用ドメイン知識　商品の特徴を示すキーワード (属性名)

探索用ドメイン知識はオークションサイトごとに作成され，NTM-Agent がオークションのサイト内を探索して必要な商品ページを取得し，その中から商品紹介文部分，タイトル部分，価格部分，入札期限部分を抽出するために用いられる．

抽出用ドメイン知識は商品のカテゴリごとに作成され，NTM-Agent がそれらのキーワードを検索し，属性値がどこに記述されているかを探すための手がかりとして用られる．抽出用ドメイン知識には抽出したい属性の属性名の類義語を記述しておき，抽出の際記述されたキーワードを検索して，対応する属性値が記述されている文や行を取得する．

4. ノイズ商品のフィルタリング

本研究では正解商品と相関の強いキーワード (A) とノイズ商品と相関の強いキーワード (B) をそれぞれ事前に登録しておき，商品のタイトルと商品紹介文に対して次のような 2 種類のルールを用いる．

正解商品用のフィルタリングルール　「A が含まれているならば，正解商品」

ノイズ商品用のフィルタリングルール　「B が含まれているならば，ノイズ商品」

これらのルールにより，商品の集合に対して次の 2 種類のフィルタリング方法を切り替えながら用いる．

正解商品用のフィルタリング　正解商品用のフィルタリングルールのみを用いて，正解商品を取り出し

それ以外の商品をすべて削除する．この方法は判定できない商品をすべて削除するので，ノイズ商品を多く削除できるが正解商品を誤って削除してしまう可能性が高い．

ノイズ商品用のフィルタリング　ノイズ商品用のフィルタリングルールのみを用いて，ノイズ商品と判定された商品のみを削除する．この方法は判定できない商品を残すため，削除できるノイズ商品は少ないが誤って正解商品を削除してしまう可能性は低い．

この2種類のフィルタリング方法の切り替えは検索結果の商品の数によって行う．つまり，検索結果の商品の数が閾値（100件）以上存在する場合正解商品用のフィルタリングを行い，商品の数が閾値未満の場合はノイズ商品用のフィルタリングを行う．

商品のタイトルと商品紹介文のキーワードチェックで用いるルールは予め相関ルールの生成ツール[5]によって生成される．このツールはユーザに教師信号を入力させ，マーケットバスケット分析により商品と相関の高いキーワードを出力するものである．

5. 紹介文からの情報抽出

本研究では記述形式が異なる紹介文に対し，記述形式を判別してそれぞれに適した抽出を行う．また属性名の記述が無い紹介文については，属性名の記述のある紹介文からの抽出の際に属性値のキーワードについて学習を行い，学習したキーワードを用いて抽出を行う．記述形式ごとの抽出ついては5.1.節で詳しく述べる．属性名の記述抜けのための学習については5.2.節で詳しく述べる．

5.1. 記述形式ごとの抽出

商品紹介文はタグによって表，箇条書き，文章に判別される．判別された後，表は<TR>タグと<TD>タグごと，箇条書きは
タグとHTML中の改行ごと，文章は「,」「.」「/」などの区切り記号ごとにテキストを区切る．区切られた文の中から抽出用ドメイン知識を用いて属性値が含まれる文を特定し，形態素解析を行い，数値や固有名詞を[6]を優先して名詞を抽出する．ただし，文章に対して名詞が存在しない場合，「ありません。」や「きれいです。」などの述語の記述を抽出するために文末の用言を優先して抽出する．

5.2. 属性名の記述抜けのための学習

属性名の記述が抜けていると，抽出する属性値が記述されている部分を属性名のキーワードを用いて検索できない．そこで，属性名と属性値の組み合わせについて学習しておき，抽出の際に学習した属性値を検索してそれを抽出する．

属性名が記述されている場合，5.1.節で述べた方法で属性値を抽出する．この際，抽出した属性値を属性名と組み合わせて，システム内のデータベース（抽出属性データベース）に保存しておく．このとき，数字部分については記号「*」に変換しておき，どのような数値でも対応できるようにしておく．商品紹介文中に属性名が記述されていない場合，抽出属性データベースを参照し，そこに保存してあるキーワードと商品紹介文中のキーワードのマッチングを行い，抽出する属性値を特定する．

6. 実装したシステム

本研究ではシステムをNTM-ClientとNTM-Serverに分け，サーバクライアント方式で実装した．図2にシステムの構成を示し，以下に処理の流れを示す．

①: ユーザがNTM-AgentのWebページ中のアプレットに欲しい商品に関する検索キーワード（または検索結果のページのURL）と商品のカテゴリを入力する．NTM-Clientは受け取ったキーワードまたはURLをNTM-ServerにHTTPで送信する．

②: NTM-ServerはNTM-Clientからのリクエストを受け付け，探索モジュールへ送る．

③: 探索モジュールはオークションサイトのリンク構造，HTMLの構造を記述したサイト探索用ドメイン知識を参照してオークションサイトにアクセスし，検索結果のページを得る．

④: フィルタリング用のキーワードを用いて検索結果のページ中の各商品のタイトルについてチェックを行い，ノイズ商品を省く．その後，残った商品について，それぞれの商品紹介ページをサイトから収集する．

⑤: 集めた商品紹介ページからテンプレート(サイト探索用のドメイン知識に記述されている)を用いて商品紹介文を取り出し，フィルタリング用のキーワードを用いてチェックを行い，ノイズ商品を除く．その後，商品紹介文を抽出モジュールに送る．

⑥: 商品に対する抽出用ドメイン知識を参照し，商品の特徴値を抽出する．

⑦: 抽出した商品の特徴値を元に商品の特徴表をHTMLファイルとして作成する．

⑧: システムの処理が終了したことをリクエスト受付モジュールに伝える．

⑨: 処理の終了をユーザマシン上のアプレットに送信する．

---

[5]本ツールは，商品の特徴表を提供するサービスプロバイダや，ディフォルトのルールをカスタマイズするユーザ向けのものである．

[6]形態素解析システムの辞書から判別する

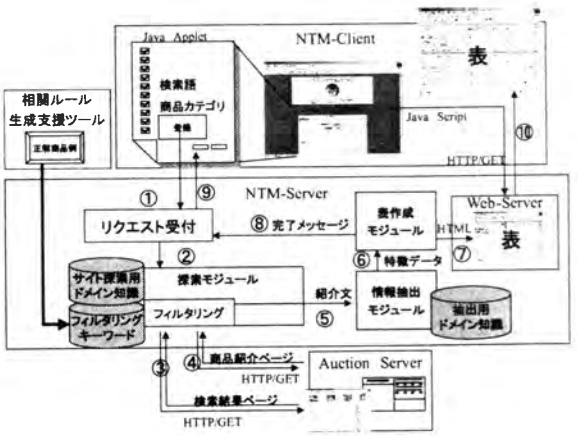


図 2: システムの構成

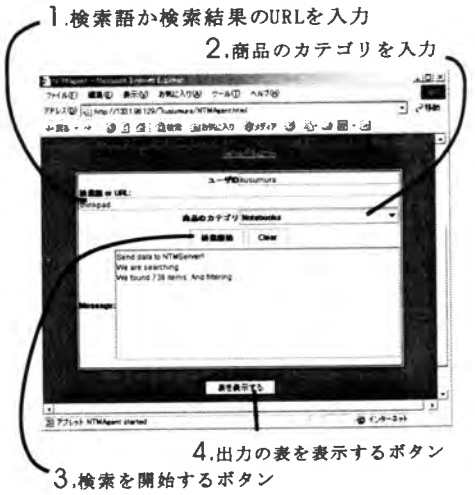


図 3: 入力インターフェース

⑩: ユーザが NTM-Agent の Web ページ上のボタンをクリックすると出力の Web ページが表示される.

6.1. システム実行例

NTM-Agent の入力ウインドウを図 3 に示す. NTM-Agent の使用方法は次の通りである.

1. 目的の商品に関する検索語もしくは, オークションサイトの検索結果ページへの URL を 1 に入力する.
2. 目的の商品のカテゴリを 2 のコンボボックスから選択する.
3. 3 の検索ボタンをクリックする.
4. 「検索が終了しました」というメッセージを確認したら、4 のボタンをクリックして出力ページ (図 4) を表示する.

7. まとめ

本論文では, 現実のネットオークション上で商品紹介文から必要な情報を抽出し, それらを分かりやすく表形式で表示するエージェントを提案した. 本システムにおいてノイズ商品の問題に対して, タイトルと商品紹介文中のキーワードを用いて相関ルールによりフィルタリングを行う手法とその際に用いる相関ルール作成をマーケットバスケット分析により支援するツールを用いた. また, 複数の記述形式の問題に対して, 記述形式を判別してそれらに最も適した方式で抽出を行った. さらに属性名の記述抜けの問題に対して, 属性データベースに抽出した属性値の記述を学習させ, 属性名の記述が無い属性値からの抽出方法を提案した. 今後はこれらの手法を実装した NTM-Agent システムを評価していく.

図 4: 出力インターフェース

参考文献

[1] 楠村幸貴, 土方嘉徳, 西田正吾 : "NTM-Agent:ネットオークションを対象としたテキストマイニングエージェント", データベースとＷｅｂ情報システムに関するシンポジウム (DBWeb2002), pp. 375-382, 2002.

[2] 価格.com , http://www.kakaku.com/

[3] Libra, http://www.libra.ne.jp/

[4] bestlot.com, http://www.bestlot.com/

[5] 伊藤孝行, 福田直樹, 新谷虎松:"マルチエージェント入札支援システム BiddingBot におけるエージェント間の協調的入札機構について", 第 8 回マルチエージェントと協調計算ワークショップ (MACC-99), 1999

[6] Doorenbos, R. B. , Etzioni, O. , and Weld, D. S. : "A Scalable Comparison-Shopping Agent for the World Wide Web", in Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents, pp. 39-48, 1997

連絡先

〒 560-8531
大阪府豊中市待兼山町 1-3
大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻
西田研究室
TEL: 06-6850-6383
FAX: 06-6850-6341
E-mail: hijikata@sys.es.osaka-u.ac.jp

Webサービスに存在する「あいまいさ」

Problems of vagueness in Web Service features

藤崎 恵美子 Emiko Fujisaki　由良 俊介 Shunsuke Yura　村山 隆彦 Takahiko Murayama　花木 三良 Miyoshi Hanaki

NTT情報流通プラットフォーム研究所
NTT Information Sharing Platform Laboratories

Web Services are seen as technology that can dynamically connects applications on network. While they are expected to bring many benefits, companies are reluctant to introduce them because they are worried about new technologies and problems. In this study, we clarify the problems of Web Services through the development and operation of fan club service sites, and consider solutions. We think that "the boundary line between linked applications that various firms supply is vague" is the most important problem for Web Services. Firms that supply applications need to have a clear policy, and link not only in technology but also in business roles.

1. はじめに

Web 上でのアプリケーションの動的な連携を実現する技術として，Web サービスが注目されている．しかし，その効果が期待される一方で，新技術や新たなビジネススキームが内包する問題に対する不安から，導入がためらわれているのが現状である．

本稿では，複数企業を連携した Web サービスとして，アーティストのファンクラブサービスを運営した実証実験をもとに，Web サービスの持つ特徴から生じる問題とその解決法について考察する．

2. Webサービス

2.1 定義と特徴

電子商取引推進協議会(ECOM)によると，Web サービスは，一般に「SOAP*1，WSDL*2 および UDDI*3 を使用して，インターネット Web 上に公開されて利用可能なソフトウェア構成要素およびその提供サービス」を指す[1]．

本稿では，Web サービス技術を使って複数の企業のもつ機能を連携し付加価値をつけて提供する Web サービスのビジネスのひとつの形態を Web サービス統合モデルと呼ぶ．このモデルは主に Web 上において以下の特徴を持つものとする．

(1)疎結合な統合モデル
(2)機能のコンポーネント化
(3)動的な検索・接続・連携

本稿で想定している Web サービス統合モデルの構成を図 1 に示す．ファンクションプロバイダ(以下 FP)は自社の持つ機能を提供する．UDDI は，WSDL を用いて FP の持つ機能の情報を登録・公開するレジストリで，サービスインテグレータ(以下 SvI)は自サービスに必要な機能を UDDI で検索し，そこで得た情報をもとに FP に接続する．このようにして SvI は FP の持つ機能を連携・統合して付加価値をつけ，ユーザに提供する．ユーザは様々な端末を用いて SvI の提供するサービスを利用する．

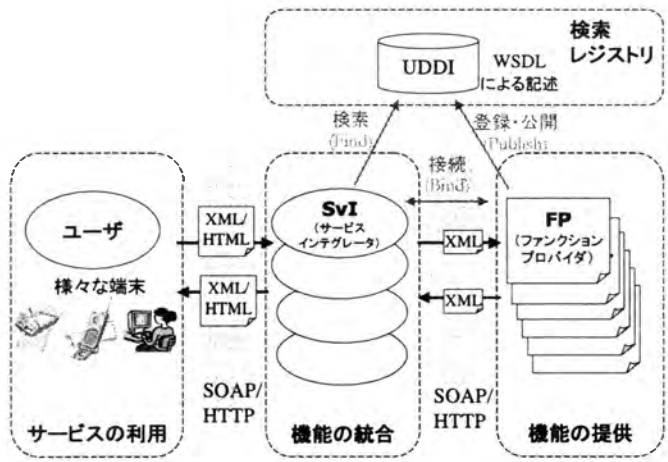


図 1:Web サービス統合モデル

2.2 現状

Web サービスへの関心はこの数年で大きく高まり，各ベンダや団体が技術の標準化や普及に向けて精力的に活動を行っている．実際に Web サービス技術を用いたサービスも公開され始め，将来的にその普及は疑いのないものと考えられている．しかし，現時点の状況としては，技術面では整備されつつあるが，ビジネス化に関してはようやく一部限られたベンダや団体が実際に着手しているという状況であり，サービス例も少ない．企業が Web サービスの導入をためらう理由として，技術的な点では標準化の未整備，新技術導入への不安などが挙げられている[2]．これらの問題により導入に至らないため事例が少なく，実際のビジネス的な問題や費用対効果が見えていない．

3. Webサービス実証実験

Web サービスを実際に構築・運用した際の問題を明らかにすることを目的に，我々は複数の参加社と共同で，以下の特徴をもつ実証実験を行った[3][4]．

・日本で初めての，複数企業を連携した商用 Web サービス
・ファンクラブサービスを題材とした BtoBtoC 型サービス

*1: Simple Object Access Protocol
*2: Web Services Description Language
*3: Universal Description, Discovery, and Integration

・Public UDDI を用いた本格的な Web サービスの構築・運用

商品販売や決済[5]などの個別機能を提供する FP を，ファンクラブである SvI がサービス連携技術 eCo-Flow[6]を利用して統合し，付加価値をつけてユーザに提供する．ユーザのリクエストを受けた SvI は，UDDI で対象となる個別機能を検索し，当該 FP に接続し，機能を連携してサービスを提供する．

4. 現状の Web サービスが抱える問題

実証実験終了後，参加社からのヒアリングで得られた，現状の Web サービスが包含する問題を，表 1 に示す．表に示すように，Web サービスの問題は他技術にも共通の問題と，Web サービスに特有の問題に分けられる．

表 1:現状の Web サービスが抱える問題

		特徴	問題	内容
Webサービスの問題	他技術にも共通の問題	企業間連携	一貫性	セキュリティ(ポリシーの統一、信頼性確保)
				課金システム(扱っている課金システムや対応の違い)
			コストがかかる	契約コスト
		新技術導入		構築コスト
				学習コスト
	Webサービスに特有の問題	疎結合な統合モデル	役割分担	プレイヤの境界線があいまいになり，責任(提供・構築)範囲が不明確化
		機能のコンポーネント化	機能の粒度	提供する機能の大きさ(単機能/複合機能)が各FPで異なる
		動的検索・発見	信用性	UDDIで見つけた相手やユーザへの信用性
			個人情報の取り扱い	個人情報の取り扱い、情報開示ポリシー
			UDDI	・FPによって登録したい情報は異なる ・UDDIに登録すべき必要十分な情報が決まらない
		WS技術		
			標準化	データ構造や型、インタフェース仕様の統一、相互接続性

4.1 他技術にも共通の問題

実験サービスの構築・運用過程で生じた問題のうち，他技術にも共通する問題は，以下の通りである．

複数の企業を連携することによる問題

・ 一貫性

－セキュリティポリシーの一貫性と信頼性の確保

－課金システム，支払い方法の違いの統合

これらの問題は，企業間の取り決めや話し合いによる統一や対応で解決が可能であるが，技術的に効率よく統一する仕組みがあれば Web サービスの導入はさらに敷居の低いものとなる．

新技術導入による問題

・ コストがかかる

－契約コスト:対処策として契約の体制化，電子化など．

－構築コスト:対処策としてホスティング等の ASP 化．

－学習コスト:初期学習コストを削減することは難しいが，二回目以降は経験の積み重ね，マニュアル化等の対処で削減可能．

4.2 Web サービスに特有の問題

2.1 で述べた Web サービスの特徴と，Web サービス技術そのものが原因と考えられる，Web サービスに特有の問題は以下の通りである．

「疎結合な統合モデル」に起因する問題

・ 役割分担

連携するプレイヤの境界線があいまいになり，それぞれのプレイヤの役割分担が問題となる．この問題については 5 章で詳細に述べる．

「機能のコンポーネント化」に起因する問題

・ 機能の粒度

提供する機能の大きさ(単機能/複合機能など)が各 FP で異なる．機能の粒度の統一化や，粒度を揃えるために単機能を補完する別の機能を連携するなどの解決法が考えられる．

「動的な検索・発見・連携」に起因する問題

・ 信用性

インターネット上の取引ではその匿名性から犯罪やトラブルが多い．現在の仕組みでは UDDI で検索し，動的に発見した相手が信用できる，という保証がない．実証実験では，Public UDDI であったが接続先は実験参加社のみと決められていたため，このような危険はなかったが，実際に自由に検索・接続する場合には与信を行うプレイヤが必要である．

・ 個人情報の取り扱い

ユーザの個人情報の取り扱いの問題や，情報開示ポリシーを誰が決定するか，という問題は，Web サービスが一般に利用されるための利便性の向上として Microsoft の .NET Passport[7]や Sun 他が推進している Liberty Alliance Project[8]で検討されている．各 FP，SvI，UDDI のポリシーによって定めるとプライバシーの漏洩の危険性があり，ユーザが逐一情報を入力したり情報の開示を判断したりすると，負荷がかかり利便性が下がる．

・ UDDI

UDDI を広告的に使いたい FP や，Web 上に置いたアプリケーションを自由に使ってもよい FP など，FP によって登録・公開したい情報は異なる．また，現状では UDDI に登録すべき，サービスの連携に必要十分な情報が決まっていない．先に述べた信用性と合わせて，UDDI にはそのビジネス利用において多くの問題が残っている．これらの問題について，UDDI ごとや業界ごとに登録する情報を規定するなど標準化により定める，検索する SvI により呈示する登録情報のフィルタリングをする，などで解決する必要がある．

Web サービス技術の問題

・ 技術の仕様・標準化

データをやりとりする企業間でのデータ構造や型，インタフェース仕様がいくつも存在し，また標準化途中のためバージョンアップが早く，公開されているどの仕様に準拠すべきかがわかりにくい．また，接続する FP 同士の仕様やバージョンの整合性・相互接続性が問題となる[9]．

XML や SOAP，UDDI などの Web サービス技術は，ディレクトリやファイル形式のプロトコルを決めるもので，その中でやりとりするデータ構造や型の詳細な形式までは定義していない．これは WSDL で定義が可能だが，あるサービスにおいて定義されたデータ構造や型が，他のサービスで利用できるとは限らない．また，どの程度まで詳細

化して WSDL で定義するべきかを決めるのも難しい. このような Web サービス技術の利点でもある柔軟性が, 実証実験で実際にデータをやりとりする際に問題となった.

実際に Web サービスをビジネスとして展開する際には, ebXML[10]で進められているように, 技術の標準化の確立・仕様の公開, 企業間での統一など, 詳細を規定することが重要である.

5. Web サービスに存在する「あいまい」な事柄

Web サービスは未だビジネスモデルや技術の標準化が確立されていない概念のため, あいまいな事柄を含み, 実際にサービスを構築する際に問題となった.

先に述べた問題点から, Web サービスに存在するあいまいな事柄を挙げる.

- 技術的にあいまいな事柄
  利用する技術, サービスの公開に必要な情報
- ビジネス的にあいまいな事柄
  サービスの粒度, 接続先と公開されている情報の信用性, 連携の際のプレイヤの役割の境界線

4.2 で述べたように, Web サービスの持つ利点と考えられている特徴が, あいまいな要素を生んでいるのである.

5.1 プレイヤの境界線

Web サービスにおいてあいまいになってしまう, 最も重要なものは, 「プレイヤの境界線」と考える. その理由を以下に示す.

- 実証実験において, 明確に定めておかなかったため SvI にほとんどの責任が集中してしまい, 負担が大きくなり大きな問題となった.
- 解決しないまま構築すると実際にビジネスとして運用する際に問題が起きるため, あらかじめ明らかにしておく必要がある.

Web サービス統合モデルでは, サービスの処理フローの中で「ここからは誰が提供し, 誰の責任で行うか」という販売・構築に関する責任の所在(区切り)やユーザに対する窓口があいまいになる. この, プレイヤの境界線があいまいになってしまうことで発生する問題を, 以下より述べる.

5.2 構築上の問題

データの管理主体

(1)問題

会員データなどの共通データを誰が管理するかを決めるのが難しい[11]. 具体的には, (i)分散管理か集中管理のどちらにするか, (ii)自社管理かアウトソースか, などである.

(2)原因

(i)の原因:(a)分散管理にするとコストがかかる. (b)集中管理にするとその管理主体のセキュリティに対する不安がある.

(ii)の原因:(c)自社で管理する場合, 少数のデータのためにデータ管理の仕組みを構築すると管理コストが大きくなる. (d)多数のデータならば通信が増大し, 負荷がかかる. アウトソースする場合, (e)ユーザのプライバシー保護や自社の財産的情報の管理を外部に預けることへの不安, などがある.

これらの要因がデータ管理の問題を難しくしている.

(3)解決の方法案

- データの量に対するセキュリティやコストなどの構築指針を示す((a),(b),(c)の解決案).
- OS に組み込んだ認証方式((a),(c)の解決案)
  .NET Passport のように, OS を提供するベンダがユーザのデータを集め, 管理して認証サービスを提供する.
- 中立的な機関による専門管理((a),(b),(e)の解決案)
  Liberty Alliance Project のように複数のベンダによる専門機関がデータを管理する.

構築分担

(1)問題

画面や処理の構築分担が, 実際に構築の際に難しい問題となった. 例えば, サービスの画面は誰が作成するかである. FP が画面を作成し SvI が呼び出す場合, 連携の際にイメージがばらばらになり, 統一しなくてはならない. 連携するプレイヤ間で統一したイメージを持つよう, 背景の色やテンプレートなどを構築時に徹底する必要が生じる.

FP が機能のみを提供し SvI が全ての画面を作成する場合, エラー画面については, それぞれの機能を提供している FP 以外のプレイヤが構築することは, システムの内部にどういったエラーが発生しているかや対処法がわからないため非常に難しい.

(2)原因

(a)SvI が連携する FP の機能の処理内容を全て把握できないこと, (b)複数の FP の連携サービスのためイメージの統一化が難しいこと, 等が原因として挙げられる.

(3)解決の方法案

- WSDL のインタフェース定義でエラー情報を共通化・統一化する((a)の解決案).
- サービスのイメージを SvI が決め, イメージに沿ったエラー画面を FP が作成する((b)の解決案).
- SvI が機能の呼び出し時に, あらかじめ用意したテンプレートにエラー情報を当てはめて自動的にエラー画面を生成することで, 画面構築の負荷を軽減する((a),(b)の解決案)

5.3 運用上の問題

障害の切り分け

(1)問題

サービスを複数の FP の機能連携で実現する Web サービスにおいては, 障害の切り分けが難しい, という問題が生じる.

例えば, 商品購入時にクレジットカードエラーとなった際, ファンクラブ, 会員管理サービス, 商品管理サービス, 決済サービス, 決済サービスが提携しているカード会社のどこがエラーを出しているのか切り分けがしづらい.

(2)原因

(a)複数の FP の機能を連携して 1 つのサービスを実現していることにより, 個々の FP の機能の詳細や背後で連携されている機能が把握できないため, あるいは(b)エラー情報の定義やエラー処理が FP ごとに異なるため, 等が考えられる.

(3)解決の方法案

- エラー発生時のロールバック処理の際に, エラー発生情報を付加し SvI に通知する((a)の解決案)
- 処理が現在サービスのどの段階でどの機能を利用しているか, というロードマップ表示などの画面インタフェースで, サービスの処理状態が判るようにすることで, エラーの切り分けをしやすくする((a)の解決案).
- エラー情報の共通化・統一化((b)の解決案)
  先に述べたように, WSDL でエラー情報を定義しておく.
- 個々の FP が出すエラー情報を SvI が切り分けしやすいような情報に変換する仕組みを持つ((b)の解決案).

障害への対処

(1)問題

ユーザに対する販売責任範囲が不明確になる. 例えば, ユーザに物が届かなかった場合, エラー特定, 対処の指示, 対処・弁償, それぞれを行うプレイヤが不明確である. また, 対処にかかった料金の分担やユーザが代金を支払わなかった場合のリスク負担も明確にしておく必要がある.

(2)原因

新たな枠組みのサービスのため, (a)法律が整っていない, (b)プレイヤ側の認識不足, などが原因として考えられる.

(3)解決の方法案

- サービスを統合する SvI が販売責任を持つ, 個々のサービスの内容に応じてリスク負担を規定する, などの法律で定める((a)の解決案)
- 課金システムにエラー対処の仕組みを組み込む
- FP に対し, サービスの処理状態とともに責任範囲を通知する((b)の解決案)

5.4 問題の本質と解決に向けて

このような構築・運用上の責任問題は, 実際のビジネスでは契約の際に契約書などで明確に規定しておくが, 相手と直接交渉することなく接続する Web サービスにおいては大きな問題となる. また従来の, リンクで繋いだ連携サービスの場合では, URL や画面表示などから「ここまではこの会社のこのサイトが提供している」「ここからは別の会社の別のサイトで提供している」ということが明確であったので, 責任範囲の問題は起こりにくかったし, 画面イメージが変わったとしても受け入れられてきた.

Web サービスは, 従来の完全に独立した企業どうしのリンクによる疎な連携より一歩進み, かつ機能の組み込みによる完全な密結合よりも柔軟性を持たせることで, この従来の 2 つの連携方法の中間である, 「機能の緩やかな疎結合」を目指している. このあいまいな概念と前例の少なさが, 連携するプレイヤの境界線をあいまいにしている要因である.

5.2 や 5.3 で述べた問題の中で, データの管理や構築の分担については, 提供するサービスや SvI のポリシーに応じて決めることが可能であるが, 販売・提供主体については, ビジネスの形態により変わりうることや, 技術的な解決が難しいことから, 決めることが非常に難しい. Web サービス統合モデルを実現するには, 構築の際だけでなく運用の際の役割分担と責任範囲を明確にする仕組みが大きな課題である.

6. まとめ

Web サービスは, Web 上の疎結合で動的な機能連携を実現することを特徴とする. そしてこの特徴により, 従来の仕組みとは異なる様々な問題を含む. その中で最も大きな問題が, プレイヤの関係や境界があいまいになることである. このため, Web サービスにおいては, セキュリティ, UDDI への登録, 個人情報の取り扱い, などについての企業ポリシーを明確に定め, 役割を分担した上で, 技術だけでなくビジネス的にもうまく連携することが必要である.

参考文献

[1] 電子商取引推進協議会(ECOM), 第 2 回東京 XML/EDI 普及説明会資料:Web サービスと XML 標準フレームワークの概要,2002. http://www.ecom.jp/ecit/semi/xmledi_semi/20020215/saitou.pdf

[2] CIO Magazine オンライン版, Emerging Technology : Web サービスの今をつかむ, http://www.idg.co.jp/CIO/contents/emerging/emerging28.html

[3] 簗他, Web サービス技術によるファンクラブサービス構築の試み, ソフトウェア工学研究会 Winter Workshop in Kobe, 情報処理学会, 2003.1.

[4] 村山他,Web サービス技術によるファンクラブサービス構築の試み, 電子情報通信学会総合大会, D-17-7, 2003.

[5] 上野他, 課金機能 API の SOAP 化の実装と考察,情報処理学会第 65 回全国大会公演論文集(4), No.1L-4, pp287-288, 情報処理学会,2003.3.

[6] Hatashima, et al, WebServices Processing Platform eCo-Flow, SAINT-2002, IPSF and IEEE-CS, 2002.

[7] Microsoft .NET Passport, http://www.passport.com/

[8] Liberty Alliance Project, http://www.projectliberty.org/

[9] 由良他, ファンクラブサービス構築による Web サービスの技術的課題の検証, ソフトウェア工学研究会 Winter Workshop in Kobe, 情報処理学会, 2003.1.

[10] ebXML, http://www.ebxml.org/

[11] 藤崎他, ユーザ管理からみた Web サービスの現状と実現可能性,第 17 回人工知能学会全国大会,1D4-02,2003.

連絡先

〒180-8585 東京都武蔵野市緑町 3-9-11 NTT 情報流通プラットフォーム研究所

藤崎 恵美子

電話:0422-59-3928

FAX:0422-59-2699

E-mail:fujisaki.emiko@lab.ntt.co.jp

時間と共に変化するWeb上の主観情報を扱う多属性意思決定モデル

A Model for Multiple Attribute Decision Making Using Subjective and Changeable Information on the Web

藤本 和則 *1　　山本 裕*2
Kazunori FUJIMOTO　Yutaka YAMAMOTO

*1有限会社フジモト・リサーチパーク 人工知能研究所
Artificial Intelligence Laboratory, Fujimoto Research Park Co., LTD.

*2京都大学大学院 情報学研究科 複雑系科学専攻
Department of Applied Analysis and Complex Dynamical Systems, Graduate School of Informatics, Kyoto University.

Abstract: We research a mathematical model for decision making processes where the knowledge for the decision is constructed automatically from information on the Web. This model contains not only decision processes but also knowledge acquisition processes. This paper focuses on subjective and changeable knowledge on the Web and presents a basic model of the decision making processes.

1. はじめに

近年，インターネットの普及により，人間は世界各国に散在する最新の情報を瞬時に取得できるようになった．これにあわせて，ネットから有効な情報を集めて人間の活動に役立てる様々な研究が始められている [武田 02, 和泉 02]．我々は，特に，人間がネット上の情報を使って意思決定する過程に着目し，これを支援するシステムの実現を目指す "DSIU" という研究分野を提案した．そして，これまで継続的に研究を行ってきた [藤本 03b]．DSIU とは，ネット情報からの知識の自動獲得，および，獲得された知識を使った自動推論の 2 つの技術により，ネットユーザの意思決定支援を試みる研究分野である．DSIU は "デシュウ" と読み，*Decision Support for Internet Users* の略である．

我々は，これまでに行った実践的研究の結果を踏まえ，近年は，より理論的な側面に着目し，意思決定支援に必要な知識獲得の正確さを導くための数理モデルの構築を進めている．この数理モデルの研究では，これまでに，ネット上の情報から自動獲得された知識を使って意思決定する過程をモデル化し，これを意思決定系のモデルと呼んだ [藤本 03a]．しかしながら，この意思決定系のモデルは，ネット上の静的な知識を前提にするので，時間と共に変化する知識を扱うことができない．実際のネット上の情報は，しばしば更新され，それ自体時間と共に変化することが多い．したがって，より多くのネット情報を扱うには，意思決定系のモデルに知識変化のダイナミクスを導入する必要がある．

本稿では，ネット上の主観情報に基づく多属性意思決定を対象に，時間と共に変化する主観情報を扱う意思決定系について述べる．まず，2 章で，時間と共に変化する主観情報を扱う多属性意思決定のモデルを示す．3 章では，インターネットを介して主観情報が知識提供者から意思決定者に伝わる過程を含めた意思決定系のモデルを示す．そして，適切な意思決定を行うために必要な意思決定系の性質として，可決定性と可獲得性の 2 つについて述べる．

2. 多属性意思決定のモデル

本章では，知識提供者が代替案についてもつ主観の状態を代替案の属性として捉え，これに基づいて代替案の選択を行う多属性意思決定のモデルを示す．このモデルは，代替案のそれぞれについて，複数の知識提供者の主観の状態を集めた**知識源**と，知識源に基づいて代替案を選択する**意思決定ルール**からなる．以下では，代替案の集合を $\Omega = \{\omega_1, \ldots, \omega_m\}$，主観の種類の数を l，知識提供者の数を n として，知識源と意思決定ルールそれぞれの形式化を行う．

知識源の形式化にあたって，まず，ある代替案 ω について，知識提供者の主観状態を集めた知識源行列 $K^*_\omega(t)$ を次のように書く．

$$K^*_\omega(t) = \begin{pmatrix} \tau^{*\omega}_{11}(t) & \tau^{*\omega}_{12}(t) & \ldots & \tau^{*\omega}_{1l}(t) \\ \tau^{*\omega}_{21}(t) & \tau^{*\omega}_{22}(t) & \ldots & \tau^{*\omega}_{2l}(t) \\ \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots \\ \tau^{*\omega}_{n1}(t) & \tau^{*\omega}_{n2}(t) & \ldots & \tau^{*\omega}_{nl}(t) \end{pmatrix}$$

ここに，第 j 行 $(\tau^{*\omega}_{j1}(t), \tau^{*\omega}_{j2}(t), \cdots, \tau^{*\omega}_{jl}(t))$ は，第 j 番目の知識提供者の主観状態で，それぞれの値は，時刻 t において，代替案 ω についての主観 k を採用していれば 1，採用していなければ 0 をとる．例えば，あるデジタルカメラの機種 ω について，第 j 番目の知識提供者が時刻 t_0 から t_1 まで k ="画質が良い" という主観を採用し，それ以外の時刻では採用しない場合は次のようになる．

$$\tau^{*\omega}_{jk}(t) = \begin{cases} 1 & t_0 \le t \le t_1 \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

この知識源行列のもと，代替案集合 Ω のそれぞれについて知識源行列を集めた $\Sigma^* = \{K^*_\omega(t) \mid \omega \in \Omega,\ 0 \le t \le t^*\}$ を知識源と呼び，知識源としてありえる全体を $\mathcal{K}^*$ と書く．ここに，t^* は意思決定の行われる時刻である．

知識源 Σ^* に基づいて，代替案の集合 Ω からいくつかの代替案 ω を選定する規則が意思決定ルールである．こうしたルールは，知識源の全体集合 $\mathcal{K}^*$ から代替案集合 Ω の部分集合の全体 $\mathcal{S}$ への写像 $\delta : \mathcal{K}^* \to \mathcal{S}$ として捉えることができる (ここに $\mathcal{S}$ は空集合及び全体集合 Ω を含む)．ここで

は，意思決定ルールとしてありえる全体 $\mathcal{R}$ を，$\mathcal{K}^*$ から S への写像としてありえる全体とする．

以上のように，本研究では，主観に基づく多属性意思決定のモデルを，知識源 $\Sigma^* \in \mathcal{K}^*$ と意思決定ルール $\delta \in \mathcal{R}$ の組とした．

3. 意思決定系のモデル

3.1 主観伝達のモデル

知識提供者の主観がネットを介して意思決定者に伝わる主観伝達の過程には，情報の誤りと時間の遅延が存在する．情報の誤りについては文献 [藤本 03a] に述べたので，以下では，遅延のモデルについて述べる．我々は，遅延の種類を，次のようにアップロードとダウンロードの 2 つに分類した．

アップロード遅延 知識提供者の主観がネット上に反映されるまでの時間．この遅延は，以下の 2 つからなる．

- データ投入遅延: 知識提供者が主観をもってから，知識提供者がその主観をアップロードするまでの時間．この遅延時間を u_0 と書く．
- データ消去遅延: 一度アップロードされた主観について，知識提供者がその主観を失ってから，データが消去されるまでの時間．この遅延を u_1 と書く．

ダウンロード遅延 ネットへ掲載されてから，情報収集ロボットなどを使って，意思決定者の利用する知識ベースにダウンロードされるまで時間．この遅延時間を d と書く．

これらの遅延により，第 j 番目の知識提供者が時刻 t_0 から t_1 まで主観 k を採用し，それ以外の時刻では採用しない場合は，意思決定者に伝わる主観は次のようになる．

$$\tau^{\omega}_{jk}(t) = \begin{cases} 1 & t_0 + u_0 + d \le t \le t_1 + u_1 + d \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

以上のように，意思決定者に伝わる主観は，知識提供者のもつ主観の状態から遅れたものとなる．

3.2 意思決定系のモデル

本節では，知識ベースと主観伝達を形式化し，意思決定系を定義する．

知識ベースの形式化にあたって，まず，意思決定者に伝わる主観の状態を集めた行列を獲得知識行列と呼び，$K_\omega(t)$ と書く (この行列の構造は知識源行列と同様である)．この獲得知識行列のもと，代替案集合 Ω のそれぞれについて獲得知識行列を集めた $\Sigma = \{K_\omega(t) \mid \omega \in \Omega,\ 0 \le t \le t^*\}$ を知識ベースと呼び，知識ベースとしてありえる全体を $\mathcal{K}$ と書く．ここに，t^* は意思決定の行われる時刻である．

知識源と知識ベースのもと，主観伝達 ψ は，知識源の全体集合 $\mathcal{K}^*$ から知識ベースの全体集合 $\mathcal{K}$ への写像 $\psi : \mathcal{K}^* \to \mathcal{K}$ として捉えることができる．ここでは，主観伝達としてありえる全体 Ψ を，$\mathcal{K}^*$ から $\mathcal{K}$ への写像としてありえる全体とする．

以上のように，主観伝達に基づく意思決定系では，知識源 $\Sigma^* \in \mathcal{D}^*$ は，知識ベース $\psi(\Sigma^*)$ として意思決定者に伝達し，この知識ベースに意思決定ルール $\delta \in \mathcal{R}$ が適用されて代替案が選定される．本研究では，こうした意思決定系を，この 3 つの組 $< \Sigma^*, \psi, \delta >$ として表す．

3.3 可決定性と可獲得性

我々は，意思決定系で意思決定を適切に行えるかという問題を，(1) そもそも知識源のみを使って適切に意思決定できるか，(2) 知識ベースを使った意思決定により知識源をそのまま使った意思決定を再現できるか，という 2 つに分けて捉えた [藤本 03b]．前者を可決定性，後者を可獲得性と呼ぶ．以下では，意思決定できるかどうかを一つの代替案に決めれるかどうかと捉えて，それぞれの性質の形式化を行う．

定義 1 *(可決定性)* 知識源 $\Sigma^* \in \mathcal{D}^*$，主観伝達 $\psi \in \Psi$，意思決定ルール $\delta \in \mathcal{R}$ である意思決定系 $< \Sigma^*, \psi, \delta >$ について，意思決定時刻 t^* において，

$$|\delta(\Sigma^*)| = 1 \tag{1}$$

が成り立つとき，意思決定系 $< \Sigma^*, \psi, \delta >$ は可決定であるという． □

定義 2 *(可獲得性)* 知識源 $\Sigma^* \in \mathcal{D}^*$，主観伝達 $\psi \in \Psi$，意思決定ルール $\delta \in \mathcal{R}$ である可決定な意思決定系 $< \Sigma^*, \psi, \delta >$ について，意思決定時刻 t^* において，

$$\delta(\psi(\Sigma^*)) = \delta(\Sigma^*) \tag{2}$$

が成り立つとき，意思決定系 $< \Sigma^*, \psi, \delta >$ は可獲得であるという． □

可決定，可獲得という条件のもと，意思決定系のモデルを使って，適切な意思決定のために要求される知識源の性質，遅延の限界値，意思決定ルールの性質など，意思決定系を設計するにあたって重要な性質を調べることが可能となる．

4. おわりに

本稿では，時間と共に変化する主観情報を扱う意思決定系について述べた．今回は，意思決定系の抽象的な定義のみに留めたが，例えば，意思決定のルールについては，採用率 (ある時刻においてある主観を採用する知識提供者の割合) に基づくルールなどが研究されている [河根 00]．今後，こうした具体的な条件を導入し，意思決定系の性質の解析を進める予定である．

参考文献

[河根 00] 河根, 村重, 合原：2 次元しきい値分布を利用した流行現象の数理モデルとその解析, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J83-A, No. 3, pp. 284–293 (2000).

[藤本 03a] 藤本, 山本：インターネット上の情報／知識を扱う意思決定支援システム (DSIU), 人工知能学会第 17 回全国大会, 2B1-01 (2003).

[藤本 03b] 藤本, 島津, 山本：DSIU：ネットユーザのための意思決定支援–研究の進捗と数理モデル構築へ向けたチャレンジを中心に, 人工知能学会論文誌, Vol. 18, No. 1, pp. 36–44 (2003).

[武田 02] 武田英明：知性のネットワークとしての WWW–Web インテリジェンスに関する一考察–, 人工知能学会誌, Vol. 17, No. 3, pp. 346–351 (2002).

[和泉 02] 和泉, 武田, 山口：意味理解する Web を目指して–次世代 Web の方向性を探る–, 人工知能学会誌, Vol. 17, No. 4, pp. 384–391 (2002).

連絡先
〒 532-0004 大阪市淀川区西宮原 2-7-59-1204
有限会社フジモト・リサーチパーク 藤本 和則
TEL & FAX: 06-6397-3057
E-mail: frp@palette.plala.or.jp

局所的な独立成分を用いた画像のエッジ抽出
Edge detection using local independent components of images

中井 祐亮, 本多 克宏, 市橋 秀友
Yusuke NAKAI, Katsuhiro HONDA, Hidetomo ICHIHASHI
大阪府立大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract : This paper proposes to use local linear models for learning the basis functions of natural images. The basis functions estimated by local independent component analysis are used as the pattern templates for feature detections and edges are extracted by pattern matching.

1. はじめに

パターンマッチングを用いた画像からのエッジの抽出を目的として，線形モデルを用いてテンプレートを作成する研究がなされている．Chen ら [1, 2] はイメージパッチをデータ点とみなして主成分分析や独立成分分析 (Independent Component Analysis : ICA) によりエッジを強調したテンプレートを作成する方法を提案している．一方，主成分分析や独立成分分析にクラスタリングを融合することにより，データ集合の局所構造を考慮した線形モデルを推定する研究もなされている [3, 4]．そこで本論文では，局所的な線形モデルを用いてテンプレートを作成することにより，効率的にエッジを抽出することを提案する．

2. 線形モデルによるテンプレートの作成とエッジの抽出

画像の一部を表す m 次元のイメージパッチ $\boldsymbol{x}_i$ が n 個 $(i = 1, \cdots, n)$ 与えられた場合を考える．エッジ抽出用のテンプレートを作成する際には，これらのイメージパッチが p 個の基底ベクトルの線形和で表されるとみなして，

$$\boldsymbol{x}_i = s_{i1}\boldsymbol{a}_1 + s_{i2}\boldsymbol{a}_2 + \cdots + s_{ip}\boldsymbol{a}_p \tag{1}$$

なる関係を仮定する．ただし，s_{ij} は第 j 基底ベクトルの係数を表し，これらの係数を変化させることでおのおののイメージパッチが形成される．したがって，$(n \times m)$ データ行列 X は，$X = AS$ と表され，線形モデルの推定は，$Y = WX$ により復元される p 次元の潜在変量を与える W を求める問題となる．主成分分析では，$\boldsymbol{x}$ が持つ情報を p 次元の変量に縮約するために，$\boldsymbol{x}$ の変動を最もよく表す射影軸から順に基底ベクトルとして採用することにより，W を求めている．

一方，独立成分分析では，主成分分析で得られた p 本の基底ベクトルを回転させることにより，p 個の潜在変量が互いに独立となるように復元行列が推定される．

一旦線形モデルが推定されると，求められた基底ベクトルをテンプレートとし，パターンマッチングによりテンプレートがエッジであるか否かあらかじめ分類されているクラスへと認識を行うことで，エッジの抽出が行われる [1, 2].

3. ファジィクラスタリングによる局所的な線形モデルの推定

線形多様体をプロトタイプとして用いるファジィクラスタリング法である Fuzzy c-Varieties (FCV) 法 [3] は，プロトタイプを張るベクトルとして局所的な主成分ベクトルを与えることから，局所的な主成分分析法とみなすことができる手法である．FCV 法の目的関数は，クラスタリング基準 d_{ci} として第 i 標本データ点と第 c 線形多様体との距離の 2 乗，

$$d_{ci}^2 = ||\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{b}_c||^2 - \sum_{k=1}^{p} |\boldsymbol{a}_{ck}^{\top}(\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{b}_c)|^2 \tag{2}$$

を用いて，以下のように表される．

$$L_{fcv} = \sum_{c=1}^{C}\sum_{i=1}^{n}(u_{ci})^{\theta} d_{ci}^2 \tag{3}$$

ここで，u_{ci} は第 i 標本データの第 c クラスターへのメンバシップであり，互いに直交する p 本の単位ベクトル $\boldsymbol{a}_{ck}$ により張られる線形多様体が，中心 $\boldsymbol{b}_c$ を通る第 c クラスターのプロトタイプを表す．

また，本多ら [4] は FCV 法で得られるメンバシップと局所的な主成分ベクトルを利用して局所的な独立成分を抽出する方法として，Fuzzy Fast ICA アルゴリズムを提案している．クラスターごとにメンバシップを考慮した基準化を行うために，局所的な主成分ベ

クトルを用いて観測値 $\boldsymbol{x}_i$ が，

$$E\{\boldsymbol{v}_c\boldsymbol{v}_c^\top\} = I_c$$

を満たす p 次元データ $\boldsymbol{v}_{ci}$ に変換されたとすると，Fuzzy kurtosis を用いる Fuzzy Fast ICA の目的関数は以下のように表される．

$$J_c(\boldsymbol{w}_c) = E\{(\boldsymbol{w}_c^\top\boldsymbol{v}_c)^4\} - 3\|\boldsymbol{w}_c\|^4 + F(\|\boldsymbol{w}_c\|^2)$$
$$= \frac{\sum_{j=1}^{J} u_{cj}(\boldsymbol{w}_c^\top\boldsymbol{v}_{cj})^4}{\sum_{j=1}^{J} u_{cj}} - 3\|\boldsymbol{w}_c\|^4 + F(\|\boldsymbol{w}_c\|^2) \quad (4)$$

ただし，$\boldsymbol{w}_c$ が第 c クラスターにおける独立成分ベクトルである．右辺の第 2 項目までが Fuzzy kurtosis であり，Fuzzy kurtosis が 0 のとき，$\boldsymbol{w}_c^\top\boldsymbol{v}_c$ の分布は Gaussian となるので，この目的関数を最大化（最小化）することは $\boldsymbol{w}_c^\top\boldsymbol{v}_c$ が non-Gaussian 分布となるような $\boldsymbol{w}_c$ を求めることになる．また，第 3 項目は $\|\boldsymbol{w}_c\|^2 = 1$ となるように $\boldsymbol{w}_c$ の大きさを制限する項である．最適な独立成分ベクトルの推定には，不動点反復アルゴリズムが用いられる．

本論文では，Fuzzy Fast ICA アルゴリズムにより得られた基底ベクトルをテンプレートとして用いることにより，エッジを抽出する．

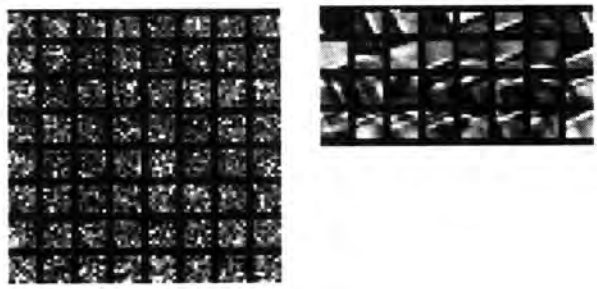
4. エッジの抽出実験

図 1 の 8bit(256 階調)160 × 160 ピクセルのグレースケール画像から，8 × 8 イメージパッチを抽出し，ICA および Fuzzy Fast ICA によりエッジ抽出用のテンプレートを作成する実験を行った．ただし，ICA では 64 個のテンプレートを作成したのに対して，クラスタリングを適用した場合には，$C = 2$ とし，クラスターごとに 16 個のテンプレートを作成した．作成されたテンプレートを図 2 に示す．元の画像を，テンプレートと同じ 8 × 8 ピクセルの大きさに分割し，それぞれの画像の小片がどのテンプレートに最も強く反応するのかをピアソン相関係数を用いて推定することにより，エッジクラスに属するピクセルを抽出した．ただし，テンプレートのクラス分けは分析者が行った．各手法で作成したテンプレートからエッジとみなされたピクセルを図 3 に示す．局所的な線形モデルを用いることで，より少ないテンプレートでも効率よくエッジが抽出できた．

5. おわりに

エッジの抽出のためのテンプレート作成に，局所的な線形モデルを利用する方法を提案した．テンプレートのクラス分けの自動化が今後の課題である．

図 1: エッジ検出に用いた画像



ICA　　Fuzzy Fast ICA

図 2: 各手法で作成されたテンプレート

ICA　　Fuzzy Fast ICA

図 3: 各手法で得られたエッジ

参考文献

[1] Y.-W.Chen , X.-Y.Zeng , Z.Nakao , H.Lu : Edge detection by learning the principal comonents of images; *Proc. of IEEE International Workshop on Intelligent Signal Processing* , pp. 69-72 (2001)

[2] Y.-W.Chen : Independent compornent analysis and its application to pattern recoginition ; *Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems & Allied Technologies, ed. by N. Baba, L. C. Jain and R. J. Howlett*, IOS Press , pp. 1243–1247 (2001)

[3] J. C. Bezdek: *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum Press (1981)

[4] 本多克宏，大上将之，北口勝志，市橋秀友: Fuzzy c-Varieties 法を用いた局所的な独立成分の抽出法; システム制御情報学会論文誌, Vol.14, No.5, pp.252-258 (2001)

連絡先

〒 599-8531 大阪府堺市学園町 1-1

大阪府立大学大学院工学研究科　　本多 克宏

TEL: 072-254-9355　FAX: 072-254-9915

E-mail: honda@ie.osakafu-u.ac.jp

画像処理による眼底写真の診断支援

Diagnosis Support of Eyeground Photograph by Image Processing

○真鍋敦[*] 佐藤秀昭[**] 井上直也[*]
Atusi Manabe Hideaki Satou Naoya Inoue
松田修三[*] 増井重弘[*]
Syuzo Matuda Shigehiro Masui
法政大学工学部[*] 立川病院[**]
Faculty of Engineer , Hosei University Tachikawa Hospital

Abstract

An eyeground image is the only one that can see direct the arteries and veins from the outline of the body. However the eyeground image difficult to extract the outline with the general way for almost tinged of red. So we suggest to apply fuzzy c-means method. At the result, we can extract the outline of papilla part and cave-in part .

1 はじめに

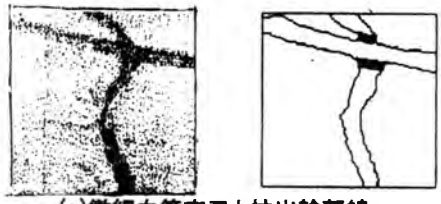
眼底写真は血管を体外から直接見ることのできる唯一のものであり、生活習慣病診断などに用いられている。しかし、生活習慣病診断の眼底写真は微細な変化と膨大な量の資料であり診断するのに、時間を要し、さらに生活習慣病診断の専門医も少ない為、医師に負担がかかっている。そこで医師が画像処理により自動化して数値表示する医師の診断支援を行う。眼底写真は非検査者の検査状態などの違いにより輝度値がすべて異なり、中には専門医でさえ認識が困難な写真もある。したがって、医師の診断同様に乳頭陥没部の形状面積について血管交叉と同じ手法のファジィクラスタリングを用いて診断支援の自動化を行うことを提案する。この乳頭部診断については、二次元画像の三次元化による方法など提案されているが、本研究では血管判定に用いたファジィクラスタリングを使った。

2 画像処理

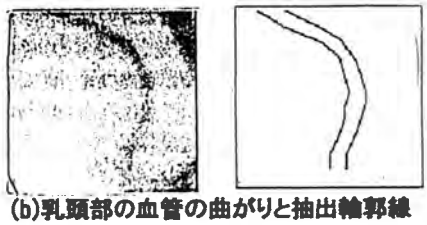
以前行った乳頭陥凹部の血管の曲がり度合いだけでは目的血管が乳頭部で複雑になりまた消えていたりするため正確な判断は出来ない。図１に眼底写真を載せる。

図1 眼底写真

図２にファジィクラスタリングにより、血管交叉と血管の曲がり角度を測定した写真を載せる。この程度の範囲の写真でも血管が抽出され、交叉部分の血管が分かった。



(a)微細血管交叉と抽出輪郭線



(b)乳頭部の血管の曲がりと抽出輪郭線

図2

そこで今回は領域分割に Bezdek, Dunn らのファジィクラスタリング手法を適用した。

ファジィクラスタリング手法は、データ集合

$$X = \{x_j\}_{j=1}^{n} \quad x_j \in R^S \qquad (1)$$

をC個のクラスタに分類して、各データが各クラスタに属する割合を分割行列Uで表すものである。目的関数型クラスタリング手法では、分割行列Uを目的関数最小化によって決定する。目的関数にはいくつかの型があるが、ここでは標準的な (2) 式を用いた。

$$f = \sum_{c=1}^{c}\sum_{j=1}^{n} g\{w(x_j), u_{ij}\} d(x_j, v) \qquad (2)$$

図3にFuzzy C-means法のアルゴリズムを示す。

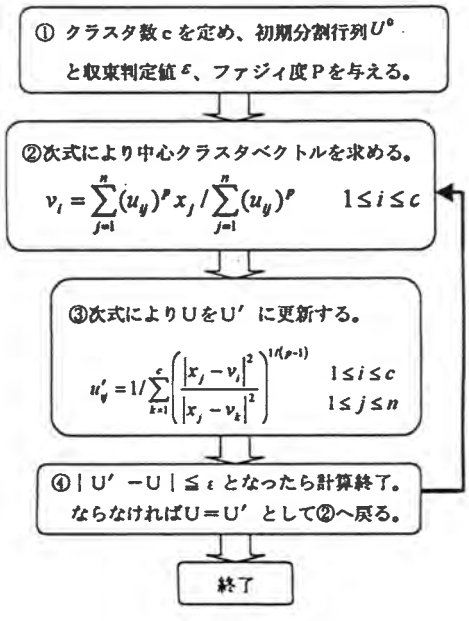


図3 Fuzzy C-means 法アルゴリズム

まず、図4に画像処理の流れを示す。

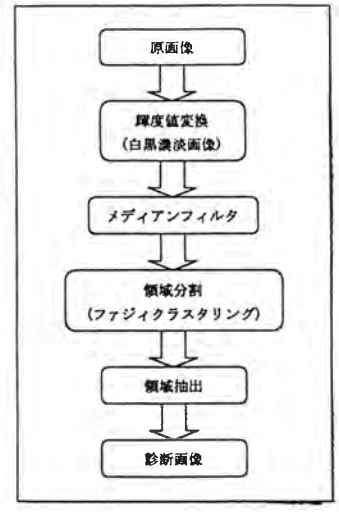


図4 画像処理の流れ

まず、入力画像を白黒濃淡画像に変換する。

白黒濃淡画像にメディアンフィルタをかけて画像に含まれている雑音を除去する。本研究ではメディアンフィルタを2回施した。

Fuzzy C-means 法による領域分割結果はファジィ度Pを変えていくと変化する。そこでPの値を買えて分割結果の画像を専門医に見て判断してもらった結果が良好であるとの見解に基づいて本研究では、P＝1.6の値を用いた。

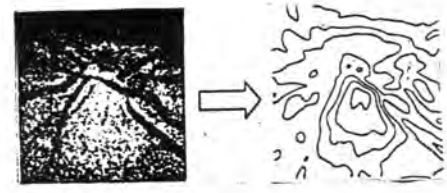


図5 ファジィ度による領域分割結果

クラスタ数 C=8、初期分割行列 U_0 は任意の数、収束判定値 ε =0.01、P=1.6として処理を行った。

4 領域抽出

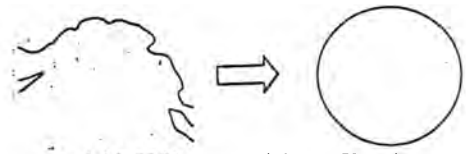
4-1 前処理

乳頭部分（2領域目）と乳頭陥凹部分（6領域目）とに分離する。これは図5の領域分割結果を専門医に見てもらい判断してもらった。

(a)乳頭部　　(b)乳頭陥凹部

図6 分離結果

乳頭陥凹部分は領域の血管が入り込んでいたりするため多少変形しているが目的の診断画像とした。しかし眼底写真は球状であるので光の影響により左側の入力画像のように眼底写真の隅の方が暗く写り図６の如く乳頭部分の領域は片方が閉じていない場合がある共に閉じていても円形にならない。そこで乳頭は一般的に円形なので分離した乳頭画像にした６項目のクラスタに操作を行い最初にぶつかった画素と全体画像の中心画素を中心とする円を描いたものを目的の乳頭画像とする。



(a)乳頭部　　(b)乳頭陥凹部

図7 乳頭部分の補正画像

4-2 前処理の補足

また出力した乳頭画像結果を原画像に重ね合わせた画像（a）と専門医に実際に乳頭と判断する部分に円を描いてもらった画像（b）を示す。

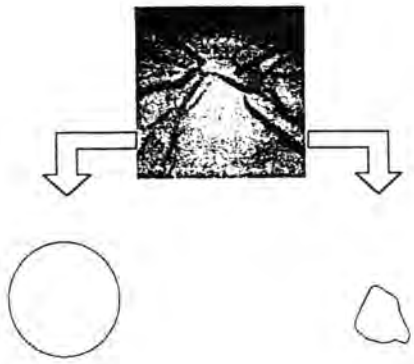
(a)　　(b)

図8 診断画像の比較

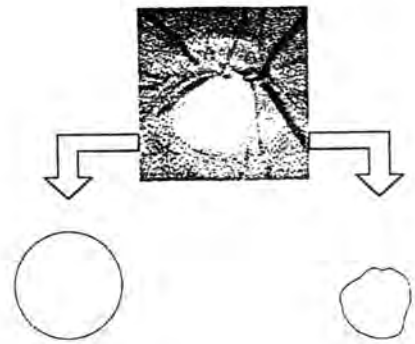
図８が示すように専門医が乳頭と判断する乳頭部分と本研究の処理結果はほぼ一致した。

4-3 領域抽出結果

以下に領域抽出結果を示す。



(a) 正常者



(b) 異常者

図9 抽出結果例

Fuzzy C-means 法を用いて領域分割することにより誤差が少なく乳頭部分を抽出することが出来た。

5 面積計測

以上のように処理をした診断画像から面積を測定する。本研究では画素数を面積とした。表１に図９の抽出結果例の面積計測による陥凹/乳頭径比（C/D 比）と異常診断比を示す。

表1 C/D 比と異常診断比

乳頭	49372	55246
乳頭陥凹	7895	21322
C/D 比	0.1599	0.3859
判断	正常	異常

異常診断箇所である乳頭部分と乳頭陥凹部分の径比は0.3以下であるので面積計測結果より陥凹/乳頭径比（C/D 比）を求め正常異常の判断をするとこのようになり、これは医師の所見と一致した。

6 診断

6-1 ファジィ推論

異常の程度を表すためにファジィ推論により異常度を求めることで診断を行った。ここでの異常度とは正常域内での異常度とした。内部知識として図１０に示すメンバシップ関数を設定した。ここでは専門医が異常と判断する面積比 0.3 をμ=1とし面積比 0.15 のときμ=0 とする。このメンバシップ関数は診断や検討などの目的によって変えることが出来る。図１０のメンバシップ関数は異常度をμ=1 とし異常度が異常値に近づくにつれて他の検査項目とどのような関係を示すかを検討するためにこのように設定した。入力である測定データは最大±３%の測定誤差を考慮に入れて三角型のメンバシップ関数とする。異常度の算出は内部知識Ａと眼底写真の測定結果Ｂとを式（３）による数値的逆真理値限定法によって求める。

$$\tau = \frac{1}{2}\{\sup(A \cap B) + \inf(A \cup \neg B)\} \Lambda \quad (3)$$

式（３）によって算出された値は０を含め１まで１１段階に分類して 0.1 ごとの異常度とする。

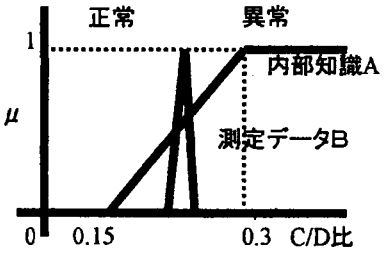


図10 メンバシップ関数

6-2 推論結果

３５０件（内異常者 12 名）のデータを取りファジィ推論により求めた異常度の例を表２に示す。

表2 ファジィ推論結果

乳頭	54111	49372	49296	55246
乳頭陥凹	7820	7895	13590	21322
C/D 比	0.1445	0.1599	0.276	0.3859
異常度	0	0.1	0.8	1
判断	正常	正常	異常	異常

7 結び

Fuzzy C-means 法による領域分割では画像処理の結果、乳頭部分と乳頭陥凹部分を抽出することができ、C/D比を求めファジィ推論により異常度を求めた結果専門医の診断と同様の結果が得られた。よって、数値的に表現できるため診断が容易になり専門医の負担を軽減することが出来る。

今回の異常診断箇所である視神経乳頭陥没は異常者が少ないので、今後はデータをより多く蓄積し、より専門医の支援を行えるようにしていくことがこれからの課題である。またより良い画像抽出を可能にするためファジィクラスタリングの検討をする。

[参考文献]

(1) 但馬文昭「視神経乳頭陥凹の診断のための眼底画像の解析」第 18 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集(2002)

(2) 横須賀拓也「画像処理による眼底写真の診断」 バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌 Vol.2, pp.19-27 (2000)

(3) J.C.Bezdek: Pattern Structure:A Tutorial, in Analysis of Fuzzys, pp. 81-107(1987).

[問合せ先]

〒184-8584

東京都小金井市梶野町 3-7-2

法政大学工学部 システム制御工学科 増井研究室 真鍋敦

増井重弘

Tel:042-387-6249

Fax:042-387-6123

階層的領域分割した画像テンプレートマッチングによるペットボトルラベルの欠陥検出

Fault Detection on a PET Bottle Label by Image Template Matching on Hierarchical Segmentation

○ 垣内 忍 Shinobu KAKIUCHI
佐藤 明樹 Yoshiki SATO
前田 博 Hiroshi MAEDA

九州工業大学 工学部
Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract: It, at present, is difficult for machine to automatically detect small faults on a label pasted on a PET bottle, so that many hands do that in a factory. In this paper, we develop a way of fault detection from a label by a simple image processing. It contains hierarchical segmentation and template matching.

1. まえがき

生産ラインにおいては，製品の外観検査の自動化が普及してきているが，微妙な欠陥や曲面に貼られたラベルなどは機械による検出が難しく未だ人間による目視検査等の人海戦術に頼っているのも現状である．目視による検査も不良品の混入が許されない全数検査等のように検査対象が多くなる長時間の検査は持続しにくい，判断基準がばらつく，検査能力に限界があるなどの問題があり自動化が推進されている．[1]

そこで本研究では，検査ラインの自動化を目指して簡単な画像処理によるペットボトルのラベル検査法を開発する．本稿では，検査対象がカメラに正対しているとの前提で，ラベル上に付着した髪の毛や小片，ラベルのめくれ等の微少な欠陥を画像テンプレートマッチングにより検出する方法について述べる．

2. ラベルの検査方法

ラベルの欠陥としては，ラベルの内側への毛髪などの微小異物の混入，ラベルの歪み，部分的めくれなどが存在する．このような欠陥を微小なものでも検出できるためには，ラベル全体を一つのテンプレートとしてマッチングするよりは，ラベルを幾つかの領域に分割して，領域毎にマッチングするほうが精度の上から望ましいと考えられる．このような考え方に基づいたラベル検査法を以下の流れで行う．

i. 被検査対象のラベル部分(ラベル領域)を抽出
ii. ラベル領域内を複数の小領域(ラベル小領域)へ分割
iii. ラベル小領域毎にマッチング処理し欠陥を判定
iv. 必要に応じ小領域を分割してマッチング処理し欠陥を判定

2.1. ラベル領域の抽出と小領域への分割処理

被検査対象の原画像(図1-a)から輝度値に関する度数分布を濃度ヒストグラムにより求め，2値化処理を行うことにより背景領域を取り除く．閾値は p-タイル法により決定する．

次に2値化された画像(図1-b)からラベル領域のみ抽出するため，濃度ヒストグラムによる垂直方向の軸に投影した座標値に対する度数分布を求め，度数分布の最高値から求めた閾値以上の度数の範囲をラベルの座標と縦幅とした．次にその縦幅内の領域で濃度ヒストグラムによる水平方向の軸に投影した度数分布を求め，垂直方向と同様に度数の範囲から座標と横幅求め，それらから囲まれた範囲をラベル領域として抽出する(図2-a)．

ラベル領域内の輝度値に関するヒストグラムを求め，2

a. 原画像 (256 階調)　　b. 2値画像

図 1 ペットボトル B の画像

a. 多値画像 (256 階調)　　b. 2 値画像

図 2 ラベル領域内の画像

値化処理によりラベル内の文字やロゴマーク等の特徴部分の抽出を行う．ここで得られた2値画像(図2-b)を用いて垂直軸に投影されたヒストグラムによる度数分布を求める．得られた分布は小さな凹凸があるので，1 次元ガウス関数を用いて平滑化する．元の分布と平滑化後の分布共に閾値以下の度数になる座標でラベル領域を分割する．ただし各領域の境界にも欠陥が生じる可能性があるので，隣接する領域が重なりを持つように分割する．

2.2. 画像テンプレートマッチング処理

2.2.1 テンプレートの作成

テンプレートマッチングを行うのに必要なラベル小領域毎のテンプレートを事前に正常な製品から用意する．この時各小領域の重心をテンプレート画像の中心として特徴部分を含むものとする．

2.2.2 テンプレートの画像変換

被検査対象の各小領域毎にテンプレートマッチングを行うが，テンプレートをそのまま使用して被検査対象の画像の重心同士を重ね合わせて平行移動による位置合わせを行うと，ラベルが少し斜めに貼られていた場合や撮影時にカメラと被検査対象の距離が少しずれることによるラベルサイズが異なった場合に，実際は正常となるべき物まで誤差が大きくなり欠陥であると判定されてしまうことがある．[2]

本稿では位置合わせや対象画像の微少な形状変形や回転の差異を同時に考慮したマッチングを行うため，画像の変換等によく使用されるアフィン変換によりテンプレート画像を変換し，変換されたテンプレートを用いて位置合わせを行うことによりマッチングを行う．

2.2.3 変換パラメータの最適化

アフィン変換において元座標を(x,y)，新しい座標を(X,Y)とし，回転角θは微少であるとの前提であれば変換の式は式1 の様に表される．

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & \theta \\ -\theta & \alpha_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} \qquad (1)$$

マッチング処理で行う位置合わせの最適化には，テンプレートと被検査対象画像との二乗誤差が最小となるアフィン変換のパラメータベクトル$\mathbf{p}_{\min} = (\alpha_x, \alpha_y, \theta, d_x, d_y)$を5 次元最小化問題に対するコンプレックス法[3]を用いて決定する．この方法は微分を用いないので，本問題には適している．

しかし，パラメータ要素$\alpha_x, \alpha_y, \theta$は実数値であるが，座標値を表す$x, y, X, Y$は整数値のため，このまま$\mathbf{p}$を探索して最適化しても，座標値に戻すときに小数点以下は丸められてしまい最適値が得られるとは限らない．そこで，重心から軸方向に一番離れた点での移動ピクセル数（整数値）によって表現したパラメータベクトル$\mathbf{m} = (m_1, m_2, m_3, m_4, m_5)$を考えこのパラメータをコンプレックス法で探索することにする．

拡大縮小で移動するピクセル数の水平軸方向成分をm_1，垂直軸方向成分をm_2，回転によるピクセル数をm_3，重心座標が移動するピクセル数の水平軸方向成分をm_4，垂直軸方向成分をm_5とする．

パラメータ数(n=5)の時のコンプレックス法の処理は大まかに以下の3つのステップになる．

Step1)10(2n)個のパラメータ点群を設定．Setp2)二乗誤差(評価関数)が最小となる最優点，最大となる最劣点を求め，最劣点を除く 9 個の点群の重心点を求める．Step3)最劣点と重心点を結ぶ直線上を最劣点より二乗誤差が小さい点を探索し，その点を最劣点と置き換えてStep2 へ．探索点が見つからない時は重心点の代わりに最優点と最劣点の直線上を探索する．

2.3. 欠陥の判定

2.3.1 平均誤差E_1による判定

各ラベルの小領域毎に被検査対象画像と同サイズの領域に上記のコンプレックス法により求められたパラメータでアフィン変換した画像を張り付けたものを新テンプレートとし，被検査対象画像と新テンプレートとの二乗誤差の平均値を求める．ただし，このままだと画像のエッジ周辺では欠陥ではないのに量子化誤差などによる影響で微少な誤差が生じてしまう．そこで，この誤差画像を膨張－収縮処理した画像，収縮－膨張処理した画像，元の誤差画像で論理積(AND)を取ることによりエッジ周辺の微少な誤差を取り除いた平均誤差E_1を求める．これにより欠陥部分を見つけやすくする．

そして，式(2)よりE_1が閾値E_{th}以下ならば$D_1 = OK$（欠陥無し）と判定する．

$$D_1 = \begin{cases} OK & E_1 \le E_{th} \\ NG & E_1 > E_{th} \end{cases} \qquad (2)$$

2.3.2 平均誤差E_2による判定

前提条件でカメラとペットボトルのラベル面が正対していることになっているが，実際は多少の傾きが生じてしまう．その影響で若干奥行き方向の変化があり上下左右で対象物のサイズが異なってしまう．このような場合，2次元アフィン変換だけでは対応し切れ無い．

これに対応するため，E_1による欠陥判定で$D_1 = NG$となった領域についてさらに領域分割を行う．ここでは重心位置で上下，左右各2分割の計4分割する(図3)．各分割された領域A_i $(i = 1,2,3,4)$毎にマッチング処理で求めたパラメータベクトル$\mathbf{m}_{\min}$を初期値として再探索し，4分割された領域毎に最適なパラメータベクトル$\mathbf{m}_i$を求め

a. 元のテンプレート　　b. 4分割後のテンプレート

図 3 テンプレート②

る．そして被検査対象画像と同サイズで各領域 A_i に対応した $\mathbf{m}_i$ により変換されたテンプレートと被検査対象画像とで平均誤差 E_2 を求める．E_1 の時と同様に，式(2)の E_1 を E_2 に置き換えて判定する．

2.3.3 誤差変化率 F による判定

平均誤差 E_1，E_2 を用いた判定で $D_1 = NG$ となった場合，これは欠陥による影響なのか，変形や量子化誤差等によるエッジ周辺の誤差による影響なのかは平均誤差だけでは判断できない．そこで，ここでは E_1 と E_2 の関係に着目した．誤差の値が欠陥による影響なら E_1 と E_2 ではほとんど変わらないのでその差は小さく，変形などによる影響なら E_2 は E_1 より小さくなるはずである．つまり E_1 と E_2 の差が小さければ欠陥である可能性が高いと考えられる．この関係を誤差変化率として式(3)のように定義し，式(4)を用いて判定を行う．求められた誤差変化率 F により判定を行う．

$$F = \frac{|E_1 - E_2|}{E_1} \tag{3}$$

$$D_2 = \begin{cases} OK & F \geq F_{th} \\ NG & F < F_{th} \end{cases} \tag{4}$$

3. 実　験

本稿では，サントリー㈱社の製品である清涼飲料水「**DAKARA**」のペットボトルのラベル検査について行った．今回の実験では，テンプレート作成にも利用した正常なペットボトルAとラベルに細長い異物として髪の毛が付着した B，小さな異物が付着した C と D，ラベルのめくれた E，テンプレートに使用したものとは違うが正常な F について行った．

ラベル小領域はラベル上部から順に①会社名部，②ロゴマーク部，③製品名部の3つの領域に分けた．今回は前提条件として，検査対象となるペットボトルはカメラに対して正対している前提で実験を行った．

今回6つのペットボトルについて原画像からラベル領域を抽出しさらに抽出された領域から3つのラベル小領域への分割を行う．次に各小領域毎にAから事前に作成し

a. テンプレート　　b. 画像 B

図 4 各小領域のラベル画像

ていたテンプレートとのマッチング処理を行い，コンプレックス法を用いてマッチングの最適なアフィン変換パラメータを求める．次に求めたパラメータを用いてその領域の平均誤差を求めその値から欠陥判定を行い欠陥のある領域を見つける．

4. 実験結果と検討

今回実際のペットボトルの画像(1500×2000[pixel],モノクロ256階調)を用いて欠陥検出の実験を行った．領域の抽出結果としてテンプレート用に抽出した結果を図4-a に，被検査画像の一例として画像B の結果を図4-b に示す．各ペットボトルの小領域毎の平均誤差は表1 のような結果になった．平均誤差による判定で $D_1 = NG$ となった領域について誤差変化率(表 2)を求め誤差変化率による判定を行った．欠陥検出の判定結果は表3 に表す．

表 1 平均誤差

	E_1			E_2		
	①	②	③	①	②	③
画像A	0.00000	0.00000	0.00000	-	-	-
画像B	0.00000	0.00079	0.00000	-	0.00081	-
画像C	0.00000	0.00071	0.00000	-	0.00071	-
画像D	0.00000	0.00221	0.00038	-	0.00151	0.00012
画像E	0.00000	0.00409	0.03397	-	0.00064	0.02922
画像F	0.00006	0.01911	0.00439	-	0.00270	0.00044

□ $D_1 = NG$　　下線 は，$E \leqq 0.0002$

表 2 平均誤差の差と誤差変化率

	$\lvert E_1 - E_2 \rvert$			F		
	①	②	③	①	②	③
画像A	-	-	-	-	-	-
画像B	-	0.00002	-	-	0.031	-
画像C	-	0.00000	-	-	0.000	-
画像D	-	0.00069	-	-	0.315	-
画像E	-	0.00345	0.00475	-	0.843	0.140
画像F	-	0.01641	0.00394	-	0.859	0.899

□ $D_1 = NG$　　下線 は，$F \geqq 0.6$

表 3 判定結果

	欠陥の種類と場所			D_1			D_2		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③
画像A				OK	OK	OK	OK	OK	OK
画像B		毛 髪		OK	*NG*	OK	OK	*NG*	OK
画像C		小 片		OK	*NG*	OK	OK	*NG*	OK
画像D		小 片		OK	*NG*	OK	OK	*NG*	OK
画像E			めくれ	OK	*NG*	*NG*	OK	OK	*NG*
画像F				OK	*NG*	*NG*	OK	OK	OK

□ $D_1 = NG$　　下線 は, $NG \rightarrow$OK

画像 A は欠陥無しでテンプレートにも使用した画像なので全て OK で当然の結果が出ている. 画像B～D では欠陥部分のある小領域②が NG , それ以外の①, ③では OK になっていることがわかる. 画像 D の③について E_1 では NG だが E_2 で $D_1 = OK$ と修正されている. 画像E に関しては「めくれ」のある小領域③が NG で, 本来正常である②では平均誤差だけで判断すると誤差値は画像 B～C に比べても大差は無いので NG となっていたが誤差変化率による判定では OK と修正された. 本来正常と判断される画像 F の小領域②, ③については, 平均誤差は表1 からも分かるとおり欠陥のある画像B～E に比べても大きな値なので NG となっているが, 誤差変化率を見ると画像 B～D に比べかなり大きな値となっているので誤差変化率による判定で $D_2 = OK$ と修正された.

誤差変化率による判定で $D_2 = NG$ となった領域のマッチング結果を図5に, $D_2 = OK$ となった結果を図6に示す.

今回の2次元アフィン変換を用いたテンプレートマッチングにより被検査対象のラベル面がカメラと正対していれば, 微少な回転やサイズの違い, 平行移動等にも対応した欠陥検出が出来ることを確認できた. さらにラベル小領域を4分割してそれぞれマッチングを行うことによりラベル面とカメラが必ずしも正対していなくてもある程度正対していれば対処出来ることが確認できた. さらに, 平均誤差だけでは欠陥による影響かどうか分からなかったが誤差変化率を求めることにより同じ平均誤差値でも欠陥かどうか判定できるようになった. ただし, 収縮処理や, 膨脹処理を入れたことにより 3[pixel](約 150[μm]を越えるサイズの欠陥しか検出出来ない事になる.

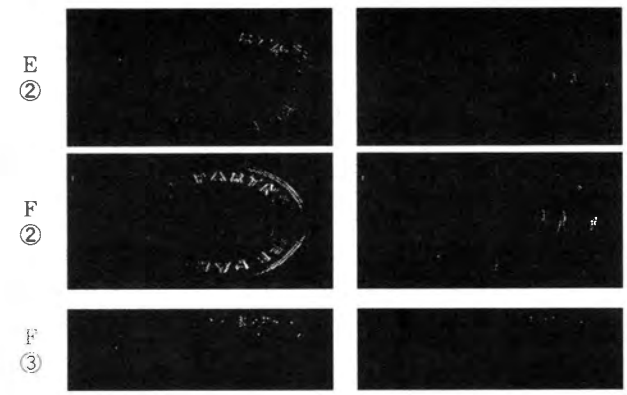
5. あとがき

本稿では, 実際のペットボトルを使用した画像処理によるラベル欠陥検出の手法と実験について述べてきた. 本手法は検査対象をカメラに正対させるという条件であれば, ラベル面が少し傾いていても, 多少の奥行き方向に変化があってもほぼ有効に欠陥を判定できることが確かめられた. 今回アフィン変換パラメータの決定をコンプレックス法により求めたが, 他にもっと適切な方法がないか検討していくことも考えている.

将来的にはライン上の検査対象を画像取り込みから欠陥検出の判定までの処理をハードウェア化して一連の流れで自動的に出来るようにしていきたいと考えている.

a. 被検査対象　　b. 誤差画像

図 5 マッチング結果 (D_2=*NG*)



a. 領域全体での誤差画像　　b. 4分割による誤差画像

図 6 マッチング結果 (D_1=*NG*, D_2=*OK*)

謝辞

最後に実験画像は, マイクロエンジニアリング㈱からの提供によることを記し, ここに謝意を表します.

参考文献

[1] 奥水大和 監修: "目視検査の自動化技術", ㈱テクノシステム (1995)

[2] 垣内忍,佐藤明樹,前田博: "画像処理によるペットボトルのラベル欠陥検出", 第4回日本ファジィ学会九州支部学術講演会予稿集, pp.21-24 (2002)

[3] Box, M.J.(1965). A new method of constrained optimization and a comparison with other methods. Computer Journal, Vol.8, pp.42-52

連絡先

〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1
九州工業大学 工学部 電気工学科
垣内 忍
Tel/Fax: 093-884-3213
E-Mail: kakiuchi@comp.kyutech.ac.jp

植物の生育状況観測による環境計測への画像処理の応用

Applications of Image Processing to Environment Measurement by Observing Botanic Growth

—環境問題解決のためのコンピュータの応用研究—

—A Study of Computer Applications for Solving the Environment Problems—

高橋恒介、大石義、 川口順功
Kousuke Takahashi, Tadashi Oishi, Junkou Kawaguchi
静岡産業大学　国際情報学部
Shizuoka Sangyo University, Faculty of Communications and Informatics

Abstract : Measurement of environments is proposed to discover some associative relations between the climatic changes and the growth rate of plants. The pictures to show plant growth situation are analyzed by graphical computing software. The growth rate of tea plants is shown by RGB ratio of picture.

1．まえがき

環境問題の解決へコンピュータを応用する研究の１つとして、環境計測とそれによるデータのコンピュータ処理方法の研究が重要である。知的処理（ニューラルネット、ファジイ、データマイニングなど）の前に、ファジイな環境情報をコンピュータにどのように取り込むかが難問であり、取り込みを容易にするには１つの例として画像処理が必要であると考えた。

今回は、大量の観測写真処理への画像処理ソフトの応用を試み、ファジイな色合いの検出方法の手がかりを探ってみた。

自然環境は様々な要因で変動し、人間の生活や産業活動によって起こる環境汚染（エネルギーや化学物質の大量消費など）が自然環境の変化をさらに複雑にし、それによる環境悪化が心配される。変動する自然環境の中で動植物がどのように生活しているかを網羅的に把握することは非常に困難であるが、動物や植物の生育状況の観測から環境の変化を記録できるかもしれない。特に、今では一般的に使用されるようになったディジタルカメラや携帯電話機を使うことにより、その可能性が高まると思われる。

ディジタルカメラや携帯電話機で動植物の観測をすることにより、年々の環境変化の記録が残される。環境悪化に伴う動植物の生育状態の変化は全くファジイであり、複雑すぎる環境変化と動植物の生育状況の関係を従来のアプローチで研究するには時間が掛かりすぎる。マクロな変化を捉えるにはファジイ工学的なアプローチが良いと考える。

2．植物の生育状況観測の場合

気候変動と地域毎の動植物の生育状況との関連性を分析する前に、気象データや動植物の生育情報のデータを得ることが先決である。

気象データは、TV、ラジオや新聞から定期

的に伝えられる気象ニュース情報を定期的に記録することで得られる。生態の生育状況は、ディジタルカメラによって生態を定期的に観測し続けることで記録される。

図1は上記の方法で記録した2002年の気温変化の推移を示す。この図での平均気温変化のデータは理科年表による。

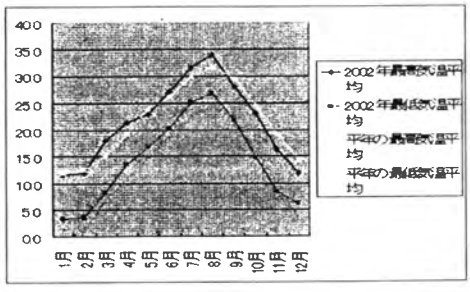


図1. 2002年の気温変化

図2は静岡県で大量に栽培されている茶木の2002年における生育状況を、ディジタルカメラによって1週間に一度の割で撮影観測したものである。茶木の生育状況は毎年同じようであるが、気候の影響で早くなったり遅くなったりする。撮影時刻がきちっと明記されるため、同じ時期の茶木の生育状況が写真で比較できる。図2のような観測写真が厳密に記録されると、毎年の生育状況が平均より何日ぐらい早まるか遅くなるかをファジイ推論することが容易になる。

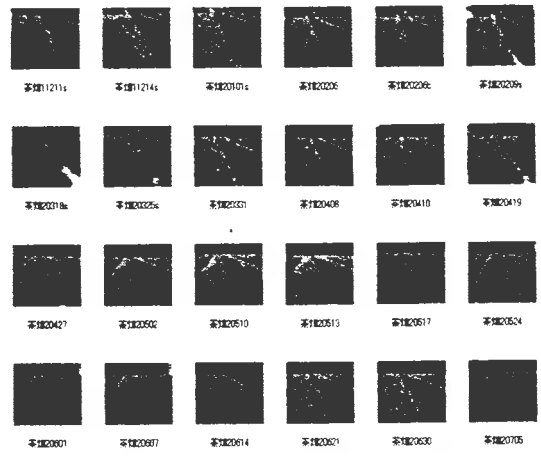


図2. 2002年の茶畑の観測写真例

問題は、茶畑で注目する茶木を同じ位置、同じ明るさの下で写真観測することが困難であるということである。カメラの手ぶれの影響も避けられない。このようなファジイな観測写真の集合から生育状況に関する年別のトレンドの把握に画像処理ソフトを利用できないか検討した。

3. 画像処理ソフトPhotoshopの利用

観測していない期間の茶木の生育状況を推定するために、1週間前と後の観測写真からモーフィング処理によって中間の生育状況を作り出すことが可能である。しかし、2つの茶畑写真の畝の位置がぴったり一致していないと、映像がゆがんでしまう。個々の茶葉の生育状況を内挿することが難しい。畝の位置を使って茶畑の位置を正規化するにも作業時間がかかる。

茶畑全体の色合いの変化は目で見てもはっきりしている。そこで、画素毎での赤（R)、緑（G)、青（B）の照度値に着目した。写真の中の特定エリヤにおけるRGBごとの照度値の分布と照度の平均値を計算する機能が画像処理ソフトPhotoshopに備わっている。そこで、R、G、Bのヒストグラム表示機能が出力する情報を調査することにした。図3は茶畑の観測写真から得たR、G、Bのヒストグラムである。

特定エリアの選び方により観測結果が大きく変わらないかを調べるために、観測写真の中の2地点を選んだ。中央部分をA地点、その奥の部分をB地点として、それぞれのエリアにおけるヒストグラムを調べた。その結果は図3のように、ほぼ同様の分布であると認められる。

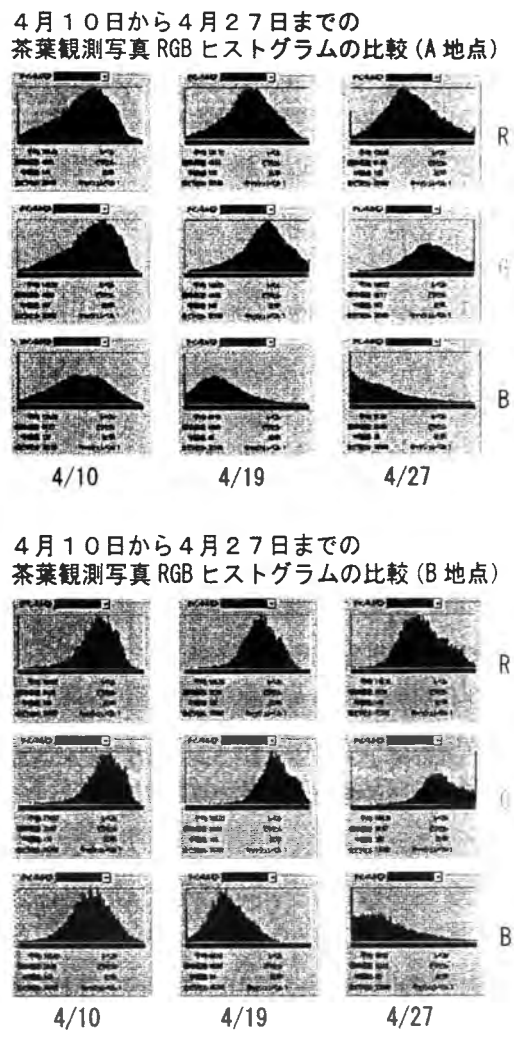


図 3. 観測写真 RGB ヒストグラムの例

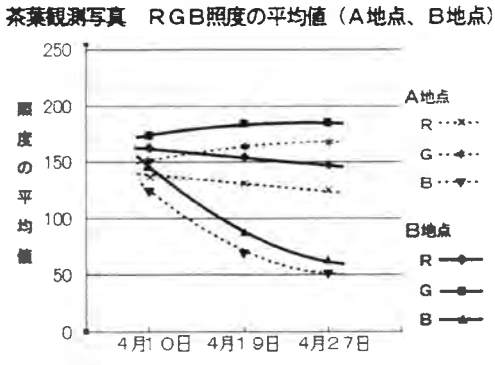


図 4.観測写真での RGB 照度の平均値の推移

また図４は、４月 10 日から４月２７日までの茶畑の観測写真における R、G、B それぞれの照度の平均値をグラフで示している。

赤（R）成分、緑（G）成分の照度の平均値は変化量が比較的に少ないのに対して、青(B)の照度の平均値が茶葉の生育に合わせて急激に減少していることがわかる。

4. ＲＧＢ比率の傾向

生育状況に関しては、画像処理ソフトの利用（RGB 比計算）で月に 2～3 枚の観測写真から植物の生育速度を推定し、平年値と比較できる。生育速度の平年値が求まれば、茶摘み時期、開花時期や収穫時期などの予測も行える。

図５は茶葉観測写真の R、G、B 照度の平均値を積上げ棒グラフの形式で表示しなおしたものである。

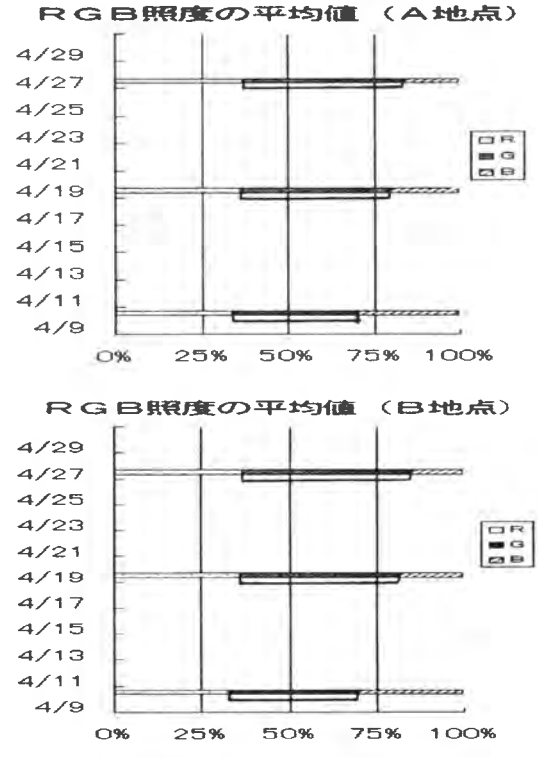


図５．観測写真での RGB の平均値推移

２つの図から、赤（R）と緑（G）の照度平均値の成分比が少しずつ増加しているのに対し、青（B）の照度平均値の成分比が生育日数

の経過と共にかなり減少していることがわかる。しかし、R、G、Bの成分比はA地点とB地点でほとんど変わりがない。

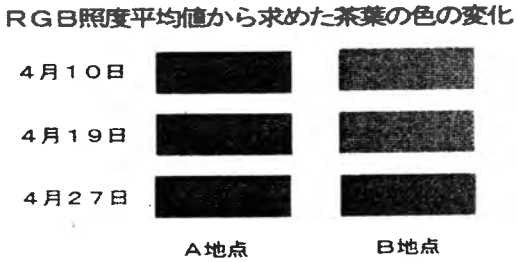


図6．RGB照度平均値から合成した茶葉の色

図6は、4月10日から4月27日の茶畑観測写真から、R、G、Bに分解した照度の平均値を再び合成して求めた茶葉の色である。日数の経過とともに緑が濃くなっていくことがわかる。A地点とB地点では場所の違いにより明暗などが生じるが、茶葉は色相や彩度の違いはほとんど無く、明度の違いによるものであることがわかる。

5. 気候や生育状況の記号化

もちろん、上記RGB比による植物の生育状況の変化は気候変動や異常気象によって狂う。開花時期や収穫時期の記録とともに生育状況の記録を残すことが、環境計測につながる。

生育状況と照合される気候変動に付いては、TV や新聞や理科年表で報告されるものを利用出来る。データマイニングなどの知能情報処理をしやすくするには、記号化が求められる。月々の平均気温を「平年並み」と「平年より高い」、あるいは「平年より低い」などの言語変数にクラス分けすることから始める。その際にファジイ集合の理論が役立つと考える。平年との温度差でグレードを変えることができる。図7はその結果の一例である。クラス分けすることで1年間の気候変動を言葉で表現できる。この図から、昨年は 3-4 月と 7-8 月が異常高温の年で 11-12 月が異常低温になった年と言える。その結果として、2002 年は茶摘みが 4 月末に早まったことがわかる。

図7．2002 年の気温変化の記号化例

最高気温の月平均の推移

月	平年並み	平年より高い	異常に高い	平年より低い	異常に低い	平年との差
1	-0.3					-0.3
2	-0.6					-0.6
3			2.7			2.7
4			2			2
5	-0.9					-0.9
6	0.9					0.9
7		1.6				1.6
8			2.4			2.4
9				-1.6		-1.6
10				-1.6		1.6
11					-2.9	-2.9
12					-2.5	-2.5

最低気温の月平均の推移

月	平年並み	平年より高い	異常に高い	平年より低い	異常に低い	
1		1.8				1.8
2	0.7					2.7
3		1.2				1.2
4			2.8			2.8
5		1.8				1.8
6		1.6				1.6
7			2.6			2.6
8			2.4			2.4
9				-1.6		-1.6
10				-1.3		-1.3
11				-1.5		-1.5
12			2.8			2.8

6．結論および考察

植物生育状況観測写真と気候データとのファジイな照合に利用される可能性を考えて、2002 年の気候データと合わせて茶木の生育状況の観測データを収集し、画像の色合いの変化に気候との因果関係が見られるか調査をした。その結果、茶葉は4月の下旬から5月初旬に摘み取られるが、R、G、B ごとの照度比がR（37%)、G(47%)、B(16%)程度の色合いになったときが摘み取りに最適であるとわかった。

参考文献

[1]高橋、川口、大石「環境計測へのグラフィックコンピューティングの応用」第 14 回東海ファジイ研究会講演論文集(2003)

[2]立木英機「環境をはかる」日刊工業(2001)

[連絡先]

静岡産業大学　高橋恒介

Tel.054-646-5443　Fax.054-645-0195

Mail:takahasi@ssu.ac.jp

言葉を用いた対話型似顔絵描写システムの改良

Improvement of Interactive Facial Caricature Drawing System with Linguistic Expressions

平澤 裕介
Yusuke Hirasawa
筑波大学システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

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

Abstract : This paper improves our previous facial caricature drawing system by reconsidering facial parameters and hairstyles. The experiments are performed to compare our present system with the previous one. The experimental results show that the present system is more useful than our previous system about the flexibility of drawn facial caricatures.

1 はじめに

顔は人物の属性、心理状態など様々な情報を持っており、人間のコミュニケーションにおいて重要な役割を果たしている[1]ため、顔が持つ情報を計算機上で扱うことができれば様々な用途に応用可能であると考えられる。本研究では顔の中でも似顔絵に焦点を当てる。似顔絵は莫大な情報を持つ顔の中から重要な情報を端的に表示できる性質を持っているため、ホームページ、エージェントなど顔を用いたコミュニケーションを行う場合には、実画像を用いるよりも似顔絵を用いた方が利用者の情報や意図を表現しやすく、情報の削減にもつながる。そのため、計算機を用いての似顔絵描写の試みは意義のあることと考えられる。

計算機を用いた似顔絵生成の研究では、実写の顔画像を用いて顔の特徴点を抽出し、それを強調することで似顔絵生成を行っているものが多い[2]、[3]。これらの研究では顔画像から似顔絵を生成するため、モデルの顔を客観的に正確に表現することができる。一方、我々はユーザがモデルの顔から受ける印象を言葉で入力し対話的に似顔絵描写を行うシステムの構築を試みている[4]、[5]。我々の研究では、客観的に正確な似顔絵の描写をするのではなく、ユーザが持っているモデルの顔に関する主観的なイメージを似顔絵に反映させることを目的としている。

本稿では、我々の従来のシステムを発展させ自由度の高い似顔絵を描くことを目的とする。そのため、顔の各部を構成するパラメータを再設定し髪型の描画方法を改良する。また、被験者実験を行い、本システムを用いて描いた似顔絵を従来のシステムを用いて描いた似顔絵と比較し、似顔絵の評価と柔軟さについて検討する。

2 システムの概要

図1に示すように、言葉による入力は大きく分けると初期入力と修正の2つの部分で構成される。あらかじめ用意されている顔の印象や特徴などを表現する言葉を選択し入力すると似顔絵が出力される。

2.1 初期入力

初期入力では顔型、顔の印象、特徴、髪型を入力する。ユーザはモデルの顔を思い浮かべてそのイメージを言葉にして入力する。

顔型 : 丸型、三角型、四角型、ホームベース型、普通(卵型)の 5 種類の中から最もモデルに適している顔型を一つ選択する。

印象 : 本研究では「活発」、「男っぽい」といった顔の印象を表現する言葉を印象語と呼ぶ。表1に示すように、11個の印象語が5つのグループに分かれており、各グループの中から一つずつ選択することができる。

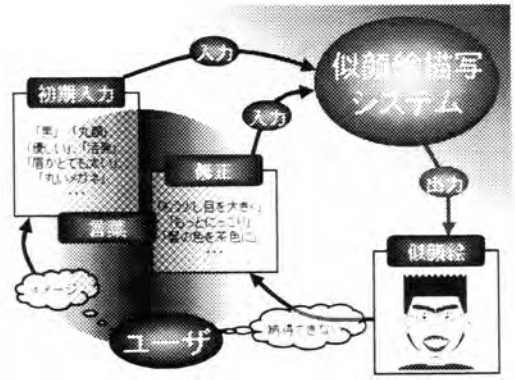


図1: システムの概要

表1: 印象語とそのグループ分け

番号	グループ	印象語
1	快活さ	活発、おとなしい
2	性別相応度	男っぽい、女っぽい、かわいい
3	強弱	強い、弱い
4	年齢相応度	大人っぽい、若々しい
5	優しさ	優しい、鋭い

各印象語から受けるイメージがユーザごとに違ったり、1 個の印象語から複数のイメージを思い浮かべたりすることがあると考えられる。そこで、事前に実験を行い、ユーザごとに各印象語から受けるイメージを考慮した顔データベースを作成しておき、似顔絵描写に用いる[4]。本研究ではこれらの顔を印象顔と呼ぶ。

特徴 : 本研究では「目が大きい」、「眉が太い」といった顔の特徴を表現する言葉を特徴語と呼ぶ。特徴語は全部で 65 個用意されている。

特徴は目、鼻、口、眉、耳、輪郭の各部に分類され、各部はさらに大きさ、傾き、形など数種類の要素に分類される。そして、その要素ごとにいくつかの特徴語が用意されている。

顔の各部の大きさ、傾き、形などをパラメータと呼び、表 2 に示す 29 個のパラメータを考える。また、パラメータの値をパラメータ値と呼ぶ。各パラメータは言葉で表現されるため言葉の持つ意味を三角型メンバーシップ関数

$$\tilde{N}(r(j)-0.2, r(j), r(j)+0.2) \quad (-1.0 \le r(j) \le 1.0,\ j = 1,2,\cdots,29)$$

を持つファジィ集合で表現する。すべての j に対して $r(j)=0$ となる時に日本人の男性の平均的な顔になるように文献[6]を参考にしてパラメータ値を設定しておき、この顔を平均顔と呼ぶ。

特徴語はそれぞれ一つまたは複数のパラメータに対応している。例として、目の要素、特徴語、対応するパラメ

表2:パラメータ

特徴	番号	パラメータ	特徴	番号	パラメータ
目	1	横幅	眉	16	横幅
	2	縦幅		17	縦幅
	3	傾き		18	傾き
	4	形		19	形
	5	瞳の位置	耳	20	横幅
	6	瞳の形		21	縦幅
鼻	7	横幅	輪郭	22	顔の横幅
	8	縦幅		23	顔の縦幅
	9	向き		24	頬
	10	鼻の穴		25	あごの長さ
口	11	横幅	距離	26	目と目の距離
	12	上唇		27	目と鼻の距離
	13	下唇		28	目と口の距離
	14	形		29	目と眉の距離
	15	開き具合			

表3: 目の要素、特徴語、対応するパラメータ

番号	要素	特徴語	パラメータ
1	大きさ	大きい、小さい	横幅、縦幅、瞳の大きさ
2	横幅	大きい、小さい	横幅
3	縦幅	太い、細い	縦幅
4	傾き	上がっている、下がっている	傾き
5	形	丸っこい、反っている	形
6	位置	上、下	縦位置
7	目と目の距離	遠い、近い	横位置
8	瞳の大きさ	大きい、小さい	瞳の大きさ

ータを表3に示す。また、特徴語は副詞を伴って入力される。副詞は「少し」、「普通に」、「とても」の3種類の中から1個を選択する。

髪型：あらかじめ髪型のサンプルを用意しておき、最もモデルに適している髪型を選択する。

パラメータ値の計算

初期入力後の似顔絵のパラメータ値を計算するために、メンバーシップ関数の平行移動の演算を用いる。印象語が入力されると、平均顔の各パラメータ値を表すメンバーシップ関数が印象顔の各パラメータ値を表すメンバーシップ関数に平行移動する。さらに、特徴語が入力されると、印象顔の各パラメータ値を表すメンバーシップ関数が似顔絵の各パラメータ値を表すメンバーシップ関数に平行移動する。図2はこの演算過程を示しており、これにより似顔絵のパラメータ値が計算される。

印象グループ k におけるパラメータ j のパラメータ値 $r(j,k)$ は次の式によって得られる。

$$r(j,k) = imp(j,k) + r'(j,k), \tag{1}$$

$$|r'(j,k)| = \max_i |r'(i,j,k)|, \qquad (i = 1,2,\cdots,m) \tag{2}$$

$$sign[r'(j,k)] = sign[\max_i |r'(i,j,k)|], \tag{3}$$

$$r'(i,j,k) = \begin{cases} (1 - imp(j,k)) \cdot f(i) \cdot r_{max}(i,j) \\ \qquad (r_{max}(i,j) \geq 0) \\ (imp(j,k) - (-1)) \cdot f(i) \cdot r_{max}(i,j) \\ \qquad (r_{max}(i,j) < 0) \end{cases}, \tag{4}$$

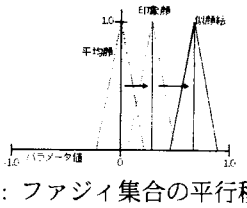


図2: ファジィ集合の平行移動

ただし、i は顔の特徴の i 番目の要素、m は要素の総数、$imp(j,k)$ は印象顔の印象グループ k におけるパラメータ j のパラメータ値、$sign[a]$ は a の符号、$r_{max}(i,j)$ は要素 i に関して選ばれた特徴語ごとに設定されているパラメータ値の動き得る範囲を $[-1.0, 1.0]$ に正規化した時の最大可変量、$f(i)$ はそれぞれの副詞を表すファジィ集合のパラメータ値である。

パラメータ j の最終的な値 $r(j)$ は次の式より得られる。

$$|r(j)| = |r(j,k^*)|, \tag{5}$$

$$sign[r(j)] = sign[r(j,k^*)], \tag{6}$$

ただし、k^* は $|r(j,k)|$ が最大値をとる時の k の値である。

2.2 修正

出力された似顔絵がユーザのイメージと違う場合には言葉を用いて修正を行う。修正は初期入力の特徴と同じように副詞を伴った特徴語を入力することによって行われる。修正時に用意されている副詞は「もう少し」、「もっと」、「だいぶ」の3種類である。

修正は毎回出力される似顔絵を見て試行錯誤を繰り返しながらユーザが納得できるまで何度も行い、最終的な似顔絵を得る。

パラメータ値の計算

修正時のパラメータ値の計算は、ファジィ真理値限定を用いて次のように行う。

$$\mu_{FT'} = \mu_T \circ \mu_{FT} = \mu_T(\mu_{FT}), \tag{7}$$

ただし、$\mu_{FT'}$、μ_{FT}、μ_T はそれぞれ修正後のパラメータ値、修正前のパラメータ値、修正に使用される副詞のメンバーシップ関数である。

3 パラメータの再設定

表2で示した従来のパラメータで冗長なものや各部の動きを制限しているものを削除し、各部の大きさ、傾き、形などが従来よりも柔軟に変化するようにパラメータを再設定する。表4に今回削除する従来のパラメータ、表5に再設定後の本システムで用いるパラメータを示す。新しく設定するパラメータは表5中に影を付けた11個のパラメータである。

3.1 パラメータの追加・削除

従来の冗長なパラメータを削除

「目」の「瞳の位置」はこれに対応する特徴語が設定されていないため冗長なものとなっている。また、現在の瞳の描画方法では細かい表現や形の微調整を行うことができないため、「目」の「瞳の形」も削除する。

「鼻」の「向き」、「鼻の穴」に関しては現在の単純な線画による二次元の似顔絵では表現しにくいため削除する。

従来のパラメータを改良

表4に示す「口」の「上唇」、「下唇」により唇の厚さを二つのパラメータで表現しているが、これらは冗長であるため「口」の「縦幅」に統合する。

表4に示すように従来は「輪郭」の「頬」のパラメータが存在し、頬は顔に線を引くことで表現している。しかし、本システムでは頬は輪郭の膨らみ具合で表現することに

表4：削除する従来のパラメータ

特徴	番号	パラメータ	特徴	番号	パラメータ
目	5	瞳の位置	輪郭	24	頬
	6	瞳の形	距離	26	目と目の距離
鼻	9	向き		27	目と鼻の距離
	10	鼻の穴		28	鼻と口の距離
口	12	上唇		29	目と眉の距離
	13	下唇			

表5：再設定後のパラメータ

特徴	番号	パラメータ	特徴	番号	パラメータ
目	1	横幅	眉	16	横幅
	2	縦幅		17	縦幅
	3	傾き		18	傾き
	4	形		19	形
	5	横位置		20	横位置
	6	縦位置		21	縦位置
	7	瞳の大きさ	耳	22	横幅
鼻	8	横幅		23	縦幅
	9	縦幅		24	横位置
	10	縦位置		25	縦位置
口	11	横幅	輪郭	26	顔の横幅
	12	縦幅		27	顔の縦幅
	13	形		28	頬の形
	14	開き具合		29	あごの長さ
	15	縦位置			

するため、従来の「頬」の代わりに「頬の形」を追加する。

「距離」の「目と目の距離」については表5中の「目」の「横位置」と同じものである。また、新たに「眉」の「横位置」を設定することで、従来「目と目の距離」に完全に依存していた眉と眉の間の距離を目と目の間の距離とは独立に設定できるようにする。さらに「目と鼻の距離」、「鼻と口の距離」、「目と眉の距離」に関しては各部の相対的な距離として設定しているが、各部の位置が他の部位との相対的な距離により定められていて、ある部位の動きが他の部位によって制限されてしまうことがある。例えば「目と鼻の距離」が近く鼻が上の方にある場合には「鼻と口の距離」により口の位置が鼻の位置に依存してしまうために、ある位置よりも口が顔の下の方に移動しない場合がある。そこで、「目」の「縦位置」、「鼻」の「縦位置」、「口」の「縦位置」、「眉」の「縦位置」をそれぞれ独立に設定し、上記のような各部の動きの制限が起こらないようにする。ただし、各部が他の部位に重ならないようにするために各部の位置には制限を設け、例えば目と眉が重なるというような実際には起こり得ないことが起こらないようにする。

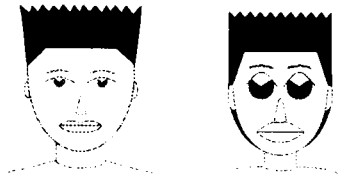
新規に設定するパラメータ

従来の瞳の大きさは「目」の「縦幅」に完全に依存していて瞳の大きさを独立に調節することができないが、「目」の「瞳の大きさ」というパラメータを設定することでこの問題を解決する。

「耳」に関しては、従来は位置を調整することができないため、「横位置」と「縦位置」を設定し位置を調整することができるようにする。

3.2 パラメータ値の可動範囲の変更

従来のパラメータの設定では、言葉を入力してもユーザにとっては似顔絵が変化しないように見えることがある。これはパラメータの設定時にパラメータに対応する箇所の可動範囲を小さく設定してしまうことが原因で、言葉を入力しパラメータ値が変化しても人間の目には変化しないように見える。そこで、従来よりも各部の可動範囲を大きくするように各パラメータを設定することで上記の問題を解決し、より自由度の高い似顔絵描写を行えるようにする。今回は表5中のパラメータ番号1〜5、7〜9、11〜14、16〜19、22、23、29の19個のパラメータに対応する箇所の可動範囲を従来よりも大きくするようにパラメータを設定する。例として、図3に目の「横幅」、「縦幅」、「瞳の大きさ」、口の「横幅」、「縦幅」のパラメータ値を最大にした時の従来の似顔絵と改良後の似顔絵を示す。図3のように従来よりも自由度の高い似顔絵描写が可能になる。



(a) (b)

図3：目の「横幅」、「縦幅」、「瞳の大きさ」、口の「横幅」、「縦幅」を最大にした時の似顔絵 (a)従来 (b)改良後

4 髪型の描画方法の改良

従来のシステムでは、髪型はあらかじめ用意してあるサンプル画像をそのまま似顔絵に用いている。しかし、この方法では微調整ができない、「顔の横幅」、「顔の縦幅」のパラメータ値が変化すると髪型と顔の輪郭がずれることがあるなどの問題がある。

そこで、顔の他の部分と同じように髪型にもパラメータを設定し言葉を用いて描画することにする。ただし、髪型は形や長さが様々であるためすべてをパラメータだけで扱うことは困難である。そこで、従来のようにあらかじめある程度のサンプルを用意しておき、言葉を入力しパラメータ(「前髪の長さ」、「額の位置」など)を操作することで微調整を行うことにする。髪型のパラメータを操作した時の例を図4に示す。

この改良により微調整が可能になり、パラメータ値の変化に伴う髪型と顔の輪郭にずれが生じる問題は解消される。現在は図5に示すような髪型のサンプルが用意され、さらに修正時に言葉を用いて微調整を行うことができる。

(a) (b) (c)

図4：髪型のパラメータを操作した時の例 (a)「額の位置」を上に (b)普通 (c)「前髪の長さ」を長く

図5：髪型のサンプル

5 実験

5.1 実験の概要

従来のシステムを用いて描いた似顔絵と本システムを用いて描いた似顔絵にどのような差が出るかを調べるために実験を行う。被験者は20代の男性5人、女性3人の計8人である。似顔絵のモデルは被験者が顔を思い浮かべることができる20代の男性3人である。

各被験者はそれぞれのモデルについて従来のシステム、本システムの2つのシステムを用いて似顔絵を描く。似顔

絵描写後に、各被験者は自分で描いた各モデルの似顔絵が自分のイメージに合う、または納得できるかどうかの満足度を{-3:全く満足しない、-2:満足しない、-1:少し満足しない、0:どちらとも言えない、+1:少し満足、+2:満足、+3:とても満足}の7段階で評価点を付ける。

その後、似顔絵の評価を分析する。また、実験により得られた似顔絵のパラメータ値を分析し、今回の改良が似顔絵に与える影響を検討する。

5.2 実験の結果

似顔絵の評価

従来のシステムを用いた場合の似顔絵の評価値は平均0.96、本システムでは平均1.07であった。両システムの似顔絵の評価値の差の平均についてt検定を行った結果、有意水準 1%で両者の間に有意さはあるとは言えないことが確認された。

似顔絵の柔軟さ

3章で述べたように、本システムでは新たに19個のパラメータ値の可動範囲を大きくするようにパラメータを設定し直しているが、この改良が似顔絵に影響を与えているかどうかを実験で得られた似顔絵のパラメータ値から分析する。また、4章で述べた髪型の微調整がどの程度行われているかについて分析する。

今回の改良により従来の可動範囲を超えた箇所のパラメータを調べた結果、本システムを用いて描いた24個の似顔絵中51個あった。ある似顔絵については、7個のパラメータに対応する箇所について従来の可動範囲を超えた似顔絵が得られている。

また、似顔絵の総修正回数は従来のシステムで平均54.6回、本システムで平均94.3回と大きな差が出ている。しかし、本システムでの修正は髪型の修正も含まれており、髪型の修正は平均30.6回行われている。これは総修正回数の約3分の1を占める回数である。

5.3 実験の考察

似顔絵の評価については2つのシステムで差がないが、これは自由度の高い似顔絵が必ずしも高い評価の似顔絵にはならないことを示している。つまり、似顔絵の評価を上げるためには似顔絵の自由度だけではなく、各部の顔部品を複数用意するなど似顔絵の表現力を上げることや、ユーザの曖昧なイメージからモデルの特徴を今以上にうまく捕らえる仕組みが必要になると考えられる。

パラメータの再設定により、従来の可動範囲を超えた似顔絵を得ることができている。パラメータに対応する箇所の可動範囲を大きくすることで似顔絵の自由度は高くなるが、その分最終的な似顔絵を得るまでの過程が長くなることが予想される。しかし、今回の実験では髪型の修正を除いた似顔絵の総修正回数は2つのシステムにおいて大きな差は見られなかった。似顔絵の自由度が増しても、ユーザがそれに柔軟に対応し修正を行っていると考えられる。

また、髪型の微調整を行えるようにしているが、今回の実験において髪型は総修正回数の約3分の1という多くの修正が行われた。髪型は顔の一部であり、ユーザの微調整を行いたいという要求に応じることのできる仕組みが重要であることがわかる。

5.4 似顔絵の例

実験で得られた同じ被験者が同じモデルについて2つのシステムを用いて描いた似顔絵の例を図6に示す。(b)と(c)を比較すると今回改良した頬の表現に大きな違いが見られる。

(a) (b) (c)

図6: 似顔絵の例 (a)モデルの写真 (b)従来のシステム (c)本システム

6 おわりに

本稿では、従来のシステムを発展させ自由度の高い似顔絵を描けるようにするために、パラメータを再設定し髪型の描画方法を改良した。被験者実験の結果、従来のシステムを用いて描いた似顔絵と本システムを用いて描いた似顔絵を比較すると、似顔絵の評価については差が出なかった。しかし、実験で得られた似顔絵のパラメータ値を分析した結果、従来のシステムではパラメータの制限により表現することのできない似顔絵が本システムを用いた場合には得られた。また、髪型の修正が多く行われた。これらのことから、本システムを用いることで従来よりも自由度の高い似顔絵を描けることがわかる。

今後の課題としては似顔絵の評価を上げることが挙げられる。そのためには、ユーザの入力した情報から今以上に効率良く的確にモデルの特徴を抽出し似顔絵に反映させる必要がある。具体的には、初期入力の正規化や言葉の入力によるパラメータ値の計算手法の改善などを行う必要があると考えられる。

参考文献

[1] 赤松茂：コンピュータによる顔の認識 ーサーベイー, 電子情報通信学会論文誌(D-II), vol.J80-D-II, no.3, pp.257-266,1997.

[2] 徐光哲, 金子正秀, 樽松明：固有空間を利用した計算機による似顔絵の生成, 電子情報通信学会論文誌(D-II), vol.J84-D-II, no.7, pp.1279-1288, 2001.

[3] Lin Liang, Hong Chen, Ying-Qing Xu : Example-based Caricature Generation with Exaggeration, proceedings of the 10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, pp386-393, 2002.

[4] 岩下志乃, 鬼沢武久：顔の印象・特徴の言語的表現に基づいた似顔絵描写, ヒューマン・インタフェース学会誌, vol.3, no.4, pp.299-306, 2001.

[5] 平澤裕介, 鬼沢武久：顔の特徴に対するイメージを考慮した似顔絵描写, 第18回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp83-86, 2002.

[6] 吉成勇編：歴史読本臨時増刊<日本人シリーズ>日本人の顔, 新人物往来社, 1995.

連絡先：
〒305-8573
茨城県つくば市天王台 1-1-1 筑波大学 機能工学系 鬼沢研究室
平澤 裕介
Tel : 029-853-6188
Fax : 029-853-5207
E-mail : hirasawa@fhuman.esys.tsukuba.ac.jp

主観を反映した複数の絵の内容の言語表現

Linguistic Expressions of Some Pictures Reflecting Subjectivity

○加藤　茂
Shigeru Kato
筑波大学大学院システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

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

Abstract: This paper aims at the construction of the system that outputs subjective and consistent linguistic expressions of some pictures. Input to this system is information on some pictures and this system outputs explanation of basic contents of pictures and consistent connective relationships between pictures. The present system consists of the explaining part of basic contents and the explaining part of connective relationship. The former part explains behaviors and feelings of objects drawn in pictures. The latter one explains the matters not drawn in pictures by guessing them from pictures. This part considers consistency of connective relationships. From the viewpoint that the interpretation of pictures is dependent on individual subjectivity, the present paper considers an individual system having individual databases for the interpretation of pictures. In order to confirm the usefulness of the present approach, simulation experiments are performed. In the experiments the individual systems of subjects are constructed and the outputs of the systems are evaluated. Experiment results show that good evaluation is obtained.

1　はじめに

コンピュータが誕生して以来、コンピュータに自然言語を理解させようとする多くの試みが行われており認知科学や人工知能の分野で様々な手法が提案されている。文章の理解には非常に高度な文脈処理や、文に直接表現されていない内容の理解も必要である。そして、人工知能の分野では物語理解や物語生成を行うシステムに関する様々な研究が行われている[1]。その中では、文の構造を解析することによって物語の意味を理解するもの、プランニング手法や物語構造を考慮して物語生成を行うもの[2][3]が多く行われている。一方、我々が物語を理解・生成するとき、物語内容の視覚的イメージを構成しており、計算機上で物語理解・生成を実現するには、視覚的イメージを考慮することも重要であると考えられる。そこで、本論文では画像情報からの物語生成に着目し、任意の順序で与えられた複数の絵情報から一貫性があり主観性を反映させた言語情報を自動生成するシステムの構築を目的とする。このような知的で柔軟な処理を計算機上で実現することができれば物語の創作活動支援システム[4][5]など非常に幅広い応用分野が考えられる。

本論文と関連する視覚情報と物語の結びつきに関するシステムの研究として、経験や行動履歴の漫画生成システム[6]、画像に基づくシナリオ作成システム[7]などが挙げられる。また、筆者らの以前の研究[8]では、絵の内容の説明として、行動に関する記述の推論を主に行っているが、本論文では行動に関する記述のみではなく、心情に関する記述の推論も行っている。

本システムは絵の主観的な説明として、絵に描かれているオブジェクトの行動や心情を表現する状態記述や、2枚の絵の間で起こった出来事の説明であるイベント記述の推論を行う。そして理解可能な言語表現を生成するために、イベント記述同士のつながりに一貫性があるかを判断する処理を行う。また、絵の解釈は個人の主観によって異なるため、理解可能な言語表現生成のためには、個人の主観に応じた言語表現を出力する必要がある。そのため、個人ごとに作成したデータベースを個別のシステムに入力した個人システムを作成する。本論文ではシステムによって出力される言語表現の評価を行う被験者実験について述べ、その評価結果を示す。また、考察と今後の課題について述べる。

2　システムの構造

システムへの入力は使用する絵に関する情報であり、本論文ではこれを絵情報[9]と呼んでいる。出力は絵の説明を記述した言語表現である。本システムは、図1に示すように、各絵の内容を説明する基本内容説明部と、絵と絵のつながりを説明する接続関連説明部とからなる。また、接続関連説明部ではイベント記述同士の一貫性の判断を行っている。最終的にシステムは基本内容説明部と接続関連説明部の出力をあわせて絵全体の言語表現を構成し出力する。以下に、システムの各構成要素について述べる。

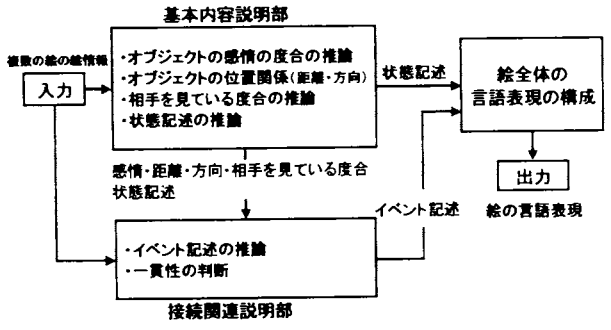


図1　システムの全体構造

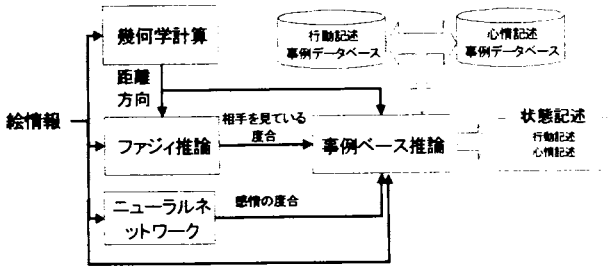


図2　基本内容説明部

2.1　基本内容説明部

基本内容説明部では、各絵に登場するオブジェクトに関する情報を計算または推論し、絵の内容を説明する言語表現を出力する。図2に示すように、2つのオブジェクト間の距離や方向などの配置関係を計算し、ファジィ推論により、人間、動物オブジェクトが相手のオブジェクトを見ている度合を推論する。また、人間オブジェクトの表情からニューラルネットワークを使用して感情の度合を推論する[9]。

以上のように推論、算出された数値情報から絵に関する情報を構成し、事例ベース推論により、その絵の状況に合った事例を検索することで、行動記述と心情記述の推論を行う。行動記述とは絵に登場する動物、人間オブジェクト

の他のオブジェクトに対する行動の説明であり、心情記述とは他のオブジェクトに対する心情の説明である。これらの記述に関する事例はそれぞれ、行動記述事例データベース、心情記述事例データベースに蓄えられている。本論では、これらの記述を状態記述と呼ぶ。

2.2 接続関連説明部

接続関連説明部ではイベント記述を推論し出力する。3枚の絵を入力する場合、図3に示すように、1、2枚目間、2、3枚目間のイベント記述の推論をそれぞれ個別に行う。連続する2枚の絵の基本内容説明部の出力をそれぞれの絵の状態とし、イベント記述事例データベースから事例を検索することで推論を行う。イベント記述は各絵の間で複数推論されることがある。そして1、2枚目間で推論されたイベント記述と、2、3枚目間で推論されたイベント記述全ての組合せについて一貫性があるかどうかの判断を行い、一貫性があると判断された組合せのみを絵の言語表現として採用する。

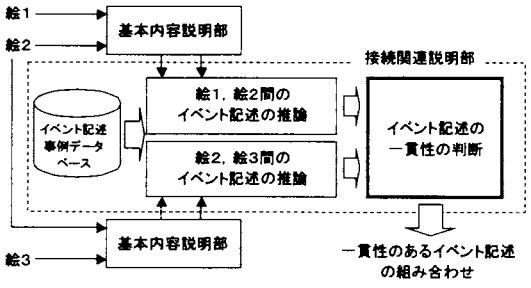


図3　接続関連説明部

3　一貫性の処理

本論では図4に示すようにイベント記述Aに含まれるオブジェクトの終了状態と、イベント記述Bに含まれるオブジェクトの初期状態が一致しているかどうかを調べることで(A,B)の一貫性の判断を行う。

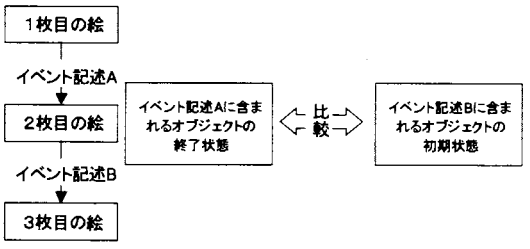


図4　一貫性の判断

3.1 オブジェクトの状態

イベント記述に含まれるオブジェクトの初期状態、終了状態の各状態は、オブジェクトの身体状態と位置で表現される。なお、これらの情報はユーザーがイベント事例を追加する際に与えられる。

(i) 身体状態

イベント記述Eに含まれるオブジェクトの集合をO_Eとし、$o_i \in O_E$なるオブジェクトo_iの初期状態と終了状態におけるそれぞれの身体状態$H_E^I(o_i)$、$H_E^F(o_i)$は以下の言語ラベルのいずれかで表現される。

行動可能、一時的行動不可能、永久に行動不可能、＊

オブジェクトが寝ている、気絶している、などのときは“一時的行動不可能”で表現され、死んでいる、というときは“永久に行動不可能”で表現される。ただし、人間、動物以外のオブジェクトの場合はいずれの状態も“＊”のラベルで表現される。

(ii) 位置

o_iの初期状態と終了状態におけるそれぞれの位置$P_E^I(o_i)$、$P_E^F(o_i)$は式（1）のように表現される。

$$P_E^I(o_i) = \bigcup_{o_j \neq o_i, o_j \in O_E} \{(o_j, L_E^I(o_i,o_j))\}$$
$$P_E^F(o_i) = \bigcup_{o_j \neq o_i, o_j \in O_E} \{(o_j, L_E^F(o_i,o_j))\} \quad (1)$$

o_iの位置はイベント記述に含まれる他のオブジェクトo_jと、そのオブジェクトとの位置関係を表現する言語ラベルの二項組で表現される。ここで$L_E^I(o_i,o_j)$,$L_E^F(o_i,o_j)$はそれぞれ、初期状態、終了状態の、o_iとo_jの位置関係を表現する言語ラベルである。言語ラベルには以下のものを使用する。

の中、の外、の上、の下、の前、の後ろ
の近く、の遠く、に接している

o_iの位置はイベント記述に含まれる他のオブジェクトo_jとの位置関係として表現されるため、o_jの数だけo_iの位置が考慮される。そのため$P_E^I(o_i)$、$P_E^F(o_i)$は、o_iの位置をo_jとの位置関係として表現する二項組$(o_j, L_E^I(o_i,o_j))$、$(o_j, L_E^F(o_i,o_j))$の和集合で表現される。

3.2 一貫性の判断

イベント記述の組合せ(A,B)の一貫性の判断は式（2）の$f((A,B))$を求めることで行われる。$f((A,B))$は2つのイベント記述の一貫性の度合を表現する。そして、$f((A,B)) \geq 0.6$のとき、システムは(A,B)に一貫性があると判断し、(A,B)を絵の言語表現として採用する。なお、$O_A \cap O_B = \phi$のときは$f((A,B))$を計算せずに(A,B)を出力する。

$$f((A,B)) = \min_{\substack{o_i \in O_A \cap O_B \\ O_A \cap O_B \neq \phi}} h(H_A^F(o_i), H_B^I(o_i)) \times g(P_A^F(o_i), P_B^I(o_i)) \quad (2)$$

ここで、$f((A,B)) \in [0,1]$

O_A：イベント記述Aに含まれるオブジェクトの集合

O_B：イベント記述Bに含まれるオブジェクトの集合

$$h(H_A^F(o_i), H_B^I(o_i)) = \begin{cases} 1 & (H_A^F(o_i) = H_B^I(o_i)) \\ 0 & (H_A^F(o_i) \neq H_B^I(o_i)) \end{cases} \quad (3)$$

$$g(P_A^F(o_i), P_B^I(o_i)) = \begin{cases} 1 & (P_A^F(o_i) = \phi \text{または} P_B^I(o_i) = \phi) \\ \min\limits_{(x,y) \in P_A^F(o_i) \times P_B^I(o_i)} k((x,y)) & (P_A^F(o_i) \neq \phi, P_B^I(o_i) \neq \phi) \end{cases} \quad (4)$$

式（3）はオブジェクトの身体状態の一致を表しており、状態が一致しているときは1、一致しないときは0の値をとる。式（4）は、オブジェクトo_iの位置の一致度を表しており、$k((x,y))$はx,yの2つの位置が一致している度合を表現している。イベント記述AあるいはBに含まれるオブジェクトがo_iのみの場合、式（1）においてo_jは存在しないこととなり、$P_A^F(o_i) = \phi$あるいは$P_B^I(o_i) = \phi$となる。この場合、位置の比較は行わずに$g(P_A^F(o_i), P_B^I(o_i)) = 1$とする。$P_A^F(o_i) \neq \phi$、$P_B^I(o_i) \neq \phi$の場合、$k((x,y))$を求める。

2つの位置 x, y が等しいとき、$k((x,y))=1$ とする。そうでない場合、図5に示す位置の一致度データベースから $k((x,y))$ を求める。位置の一致度データには2つの位置と、その一致度が与えられている。なお、一致度は[0,1]の実数値で表現される。データはユーザーとの対話処理により追加、学習される[8]。

位置1	位置2	一致度
(木.の上)	(木.の下)	0.4
(ロバ.の下)	(馬.の下)	1.0
・・・	・・・	・・・
(ボート.の中)	(ボート.の外)	0.4

図5　位置の一致度データ

4　絵全体の言語表現の構成

最終的に構成される言語表現は、基本内容説明部から出力される状態記述と、接続関連説明部で出力されるイベント記述を合わせたものである。

3枚の絵の絵情報を入力する場合の言語表現は図6に示すように、まず絵1の状態記述、絵1と絵2のイベント記述、絵2の状態記述、絵2と絵3のイベント記述、絵3の状態記述の順に生成される。ただし、一つのシーンで複数の状態記述が出力される場合、それらが機械的で不自然な表現となっている場合があり、その場合には状態記述の意味や内容を変えることなくより自然な表現に要約する処理を行っている。

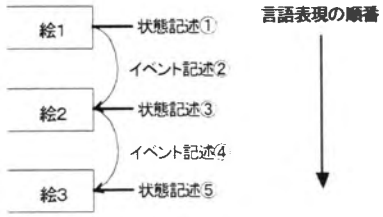


図6　絵の説明の構成

基本内容説明部は絵に描かれている全ての動物、人間オブジェクトを主体とする場合の状態記述を個別に推論、出力するため、図7に示す絵を入力する場合、右側に示すような状態記述を出力する。これらの記述は、絵の言語表現としては機械的で冗長であると考えられる。

図7　状態記述の要約

本システムはより自然な言語表現を出力するため、基本内容説明部から出力された状態記述に対して要約処理を行う。

状態記述は主語オブジェクトSと、対象オブジェクトOと、Sを主体とした場合のSとOの関係を表現する動詞表現Vの組合せで表現される。以下の規則で状態記述の要約を行う。

(i) 主語S、動詞表現Vが同じで、対象オブジェクトOのみが異なる記述同士、あるいは、対象オブジェクトO、動詞表現Vが同じで、主語Sのみが異なる記述同士は以下のように要約される。

・AはBをV＋AはCをV　→　AはBとCをV
・BはAをV＋CはAをV　→　BとCはAをV

（例）
猫は男の子を見ている　＋　猫は女の子を見ている
　→　猫は男の子と女の子を見ている

(ii) 主語Sと対象オブジェクトOが等しく、対象オブジェクトOと主語Sが等しい記述同士は以下のように要約される。

・AはBとV　＋　BはAとV　→　AとBはV
・AはBを（に）V　＋　BはAを（に）V
　→　AとBは互いを（に）V

（例）
男の子は女の子と話している ＋ 女の子は男の子と話している　→　男の子と女の子は話している

男の子は女の子を無視している＋女の子は男の子を無視している
→　男の子と女の子は互いを無視している

要約された状態記述が絵の言語表現として出力される。

5　システムの評価実験

絵の解釈は個人の主観によって異なるため、システムは個人の主観に応じた言語出力を行う必要がある。そのため、個人ごとに獲得したデータベースを個別のシステムに入力した個人システムを作成する。そして、個人システムが個人ごとに理解できる言語表現を生成することを確認するために、シミュレーションを行い、出力される言語表現の評価を行う。

5.1　個人システムの作成

4名の被験者について個人システムを作成する。4名はいずれも大学生、大学院生である。状態記述事例データベース、イベント記述事例データベース、位置の一致度データベースを個人ごとに作成する。図8に示すように被験者A～Dについて4つの個人システムを作成する。データの獲得には33枚の絵を使用する。

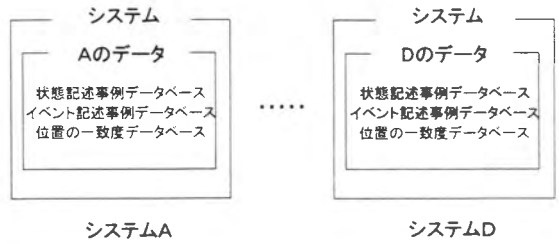


図8　個人システム

5.2　シミュレーション結果

シミュレーションには図9に示す個人システムの作成に使用していない4枚の絵を使用する。4枚から3枚をとる順列 24 通りを個人システムに入力したところシステムA～Dについてそれぞれ 27、23、15、18 個の言語表現が出力されている。例えば、No. 1 →No. 2 →No.3 の順序で絵を入力すると各システムから図 10 に示す言語表現が出力される。下線付きの記述はイベント記述で、それ以外は状態記述である。A～Dについてそれぞれ異なった内容の言語表現が出力されている。特に、1枚目と2枚目のイベント記述は、システムAからDについてそれぞれ、「熊が男の子にぶつかった」、「熊が男の子を家から追い出した」、「男の子が家から飛び出した」、「熊が男の子を襲ってきた」となっており、個人システムによって異なる内容となっている。また、紙面の都合上、本論文では省略しているが、異なる絵の並びを入力した場合でも、各システムから言語表現が得られていることを確認している。

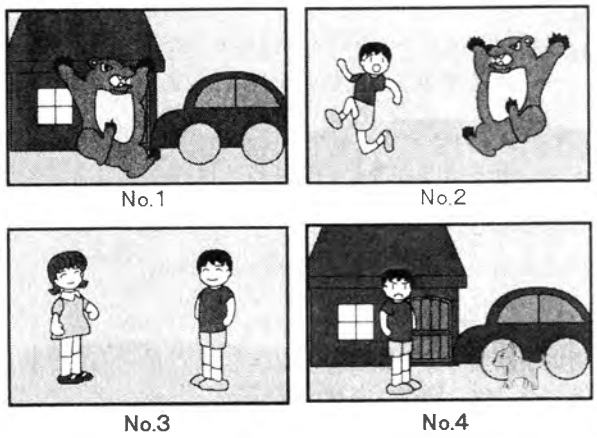


図９　シミュレーションで使用する絵情報

システムA
熊が男の子にぶつかった
熊が男の子に襲い掛かっている
熊は男の子に腹を立てている
男の子は熊を怖がっている
男の子は熊から逃げきった
女の子は男の子と笑っている
女の子と男の子は互いを好いている
男の子は女の子に笑いかけている

システムB
熊が男の子を家から追い出した
熊が男の子を襲っている
男の子が熊から逃げている
男の子は熊を怖がっている
男の子は熊から逃げ切った
女の子が男の子に笑い掛けている
男の子が女の子に微笑んでいる

システムC
男の子が家から飛び出した
熊が男の子を襲っている
男の子は熊から逃げている
男の子は熊を恐れている
男の子は熊から逃げ切った
女の子と男の子は互いに微笑んでいる
女の子と男の子は互いを好いている

システムD
熊が男の子を襲ってきた
熊が男の子を襲っている
熊は男の子を嫌っている
男の子が熊から逃げている
男の子は熊に怯えている
男の子は必死に逃げてきた
女の子と男の子は互いに微笑んでいる

図１０　シミュレーション結果

5.3　システムの出力の評価

シミュレーションで出力された言語表現の評価を行う。システムを作成した被験者４名が自分のシステムの出力の評価を行い、システム作成を行っていない５名の被験者が全てのシステムの出力の評価を行う。なお５名はいずれも大学院生である。以下では個人システムを作成した被験者をシステム作成者と呼び、他の５名の被験者を評価者と呼ぶ。

言語表現が絵の説明として理解できるかを以下の５段階で評価する。結果を表１に示す。

1　理解できない
2　あまり理解できない
3　どちらともいえない
4　やや理解できる
5　理解できる

表１　言語表現の評価

	システム作成者の評価の平均 （評価者５名の評価の平均）
システムA	4.7（3.9）
システムB	5.0（4.4）
システムC	4.4（4.1）
システムD	4.1（4.3）

表１に示すようにシステム作成者の評価の平均はいずれも、4.0 以上であり、システム作成者にとってほぼ理解できる内容の言語表現が得られている。また、評価者５名の評価の平均はいずれも 3.0 以上となっており、本システムの出力は客観的にも「理解できない」内容ではないといえる。

6　結論

本論文では複数の絵の内容から人間が作り出すような主観的で一貫性のある言語表現を生成するシステムの構築について述べた。主観的な言語表現として、絵に描かれているオブジェクトの行動や心情に関する記述やイベント記述の推論を行った。また、理解可能な言語表現生成のためにイベント記述の一貫性を考慮し、個人システムを作成した。また、より自然な言語表現を生成するため、状態記述の要約処理を行った。シミュレーションを行い、各システムから出力された言語表現の評価を行った結果、システム作成者にとってほぼ理解できる内容であることが確認され、また、客観的にも「理解できない」内容ではないとこうことが確認された。今後は、イベント記述と状態記述の因果関係を考慮するなど、より記述同士のつながりを考慮した言語表現生成を行う必要がある。

参考文献

[1] M. Mateas and P. Sengers: “Narrative Intelligence,” Proceedings of AAAI Fall Symposium, AAAI Press, Technical Report FS-99-01, pp. 1-10, 1999.

[2] Marc Cavazza, Fred Charles, and Steven Mead: “Characters in Search of an Author: AI-Based Virtual Storytelling,” Proceedings of the International conference on Virtual Storytelling 2001, pp145-154, France, 2001.

[3] Charles Callaway and James Lester: ”Narrative Prose Generator”: Proceedings of the Seventeenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 1241-1248, Seattle, WA, 2001.

[4] 石井余史子，Bipin Indurkhya，野瀬隆，乾伸雄，小谷善行，西村恕彦：“絵を使った創造的作文支援システムへのこどもの日常的知識の利用：”情報処理学会第４６回教育と研究研究会, pp.31-38, 1997.

[5] K.Kuriyama, T. Terano and M. Numao: “Story Composition Support by IGA and CBR,” Proc. of the Third Asian Fuzzy System Symposium, Masan, Korea, pp. 485-488, 1998.

[6] 角，坂本，中尾，間瀬：“コミックダイアリ：経験や興味を伝え合うための漫画日記，”情報処理学会インタラクション 2002，pp.101-108，2002.

[7] 増井重弘，佐藤秀昭，柴田浩司，内田勉，松田修三：“ファジィ関係とファジィ関係方程式の解を用いた画像のシナリオ作成，” 第１８回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp. 257-260, 2002.

[8] 加藤茂，鬼沢武久：“絵のつながりを考慮した複数の絵の内容の言語表現”，第１２回インテリジェントシステムシンポジウム，pp. 303-308, 2002.

[9] 岩田満,鬼沢武久：“絵のつながりを考慮した絵情報の言語的表現，” 電子情報通信学会論文誌，Vol.J84-D-II No.2, pp. 337-350, 2001.

連絡先：
〒305-8573
茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学機能工学系　鬼沢研究室
加藤　茂
TEL: 0298-53-6188　FAX: 0298-53-6471
E-mail: shigeru@fhuman.esys.tsukuba.ac.jp

男女の顔特徴抽出における分析法の比較

Comparison of Extraction of Male and Female Facial Feature Using Multiple Variable Analysis, Decision Tree and Neural Network.

○ 熊澤信幸，三好哲也（豊橋創造大学）
Nobuyuki KUMAZAWA, Tetsuya MIYOSHI (Toyohashi Sozo College)

Abstract: In this paper we present the comparison results on classifying the sex of faces using some classifier methods such as a neural network and a decision tree, and discuss what physical variables on faces make important contributions to classify the sex.

Keywords: Gender classification, Face recognition , Neural network, Decision tree, GINI index

1 はじめに

ユーザである人間の性別や年齢などの個人特性を正確に抽出することは，新たなマンマシンインタフェースを考える上で重要な課題であり，顔画像から個人特性を識別する方法が提案されている [1]．顔画像から年齢や性別などの個人特性の識別や感情識別に関する研究を，用いられる特徴量に基づいて分類すると，顔画像の各画素における画素値を直接分析対象とする研究 [2,3]，画素値の空間周波数特性を分析対象とする研究 [4,5]，眉毛の長さや幅といった形状特徴を分析する研究 [1,6] に分類できる．また，識別に用いる分析法に基づき分類すると，主成分分析と判別分析を組み合わせて用いた研究やニューラルネットワークを用いた研究が報告されている [1,6].

本研究では，顔画像から計測された造作に関する位置座標に基づき造作の形状を表すデータを算出し，そのデータに対して多変量解析，決定木，ニューラルネットワークを用いて判別分析を行い，それぞれの方法による判別率や識別に影響する要因の比較検討を行う．

2 分析対象

分析対象として高等学校の卒業アルバムに掲載された男女 100 人合計 200 人の個人撮影写真を用いた．顔画像から，眼や口などの各顔造作の特徴点座標を計測するために，マウスクリックによる顔造作の位置計測を行うプログラムを作成し，そのプログラムを用いて水平，垂直方向の位置計測を行った．顔造作の特徴点数は，左右の眉毛で 8 点，左右の眼で 8 点，鼻で 3 点，口で 4 点，輪郭で 3 点とし合計 26 点とした．目頭の中点と鼻頭の長さが 100 となるように各顔画像の大きさを基準化した．計測した顔造作の特徴点から眉毛の長さや幅などの 76 の特徴量を算出した．そして 76 の特徴量から文献 [1] で有意とされた 8 変量を顔造作の特徴量として用いた．用いた 8 変量は図 1 に示した眼の縦幅と眉毛の縦幅の比率 (eye height/brow height)，眉毛から眼までの面積 (brows-eyes area)，眉毛から顎までの距離 (brow-chin distance)，眉毛の離れ具合 (brow separation)，眉毛の曲率 (brow curve)，鼻の横幅 (nose width)，眼から鼻までの面積 (eyes-nose area)，眼の縦幅 (eye height) とし，この 8 変量を用いて次節で述べる手法によって男女識別を行った．

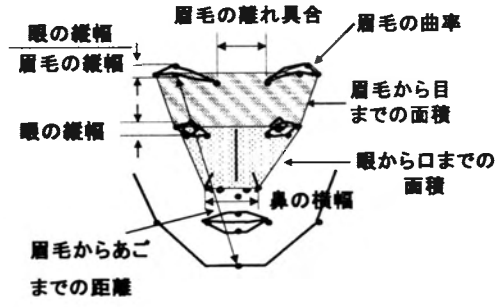


図 1 顔の特徴量

3 男女識別手法

本研究では男女識別に，マハラノビスの汎距離に基づく判別法，決定木として CART[7] および 3 層ニューラルネットワークを用いた．ここでは，決定木の作成アルゴリズムの説明を行い，ニューラルネットワークおよびマハラノビスの汎距離に基づく判別法については紙面の都合上割愛する．

いま，決定木を用いて＋－の 2 群判別を行う場合を例に取り，決定木における属性選択基準として本研究で用いた GINI 指標 [7,8] について説明する．データ

表 1 判別手法ごとの男女識別率

単位：(%)

	判別率		汎化性	
	男	女	男	女
多変量解析	78	70	42	90
決定木（CART）	90	96	92	60
ニューラルネット	100	98	80	74

ベース D の非純粋性（impurity）$im(D)$ を，

$$im(D) = 1 - p^2 - (1-p)^2 \quad (1)$$

と定義する．ただし，p はデータベース全体におけるクラス＋の割合である．データベースを属性 A の属性値 a_i によりデータ分割を行った場合の非純粋性は

$$im(A, a_i) = 1 - q_i^2 - (1-q_i)^2 \quad (2)$$

となる．ただし，q_i は，属性 $A = a_i$ となるデータのうち，クラス＋となる割合を表している．属性 A が a_i となる確率を $Pr(A = a_i)$ とし，各属性値に対する不純性の平均値を属性 A の不純性とすると

$$im(A) = \sum_{i=1}^{n} Pr(A = a_i) im(A, a_i) \quad (3)$$

と計算できる．決定木構築における GINI 指標では，属性に対する不純性 $im(A)$ を最小とする属性が選択される．属性値が連続値の場合は，適当なしきい値 θ と比較して大小により 2 つの属性値を与え，その値による属性選択を行う．属性選択を行う際に適当なしきい値も併せて探索する．

4 識別結果の比較

モデル作成には，計測した 200 人のデータの 50%を利用し，残りの 50%はモデルの汎化能力の評価に用いた．モデル作成に用いた 100 件のデータとモデル作成に用いなかったデータ 100 件に対する男女別判別率をマハラノビスの汎距離に基づく判別法，決定木およびニューラルネットワークごとに表 1 に示す．決定木を用いた判別モデルの構築では，属性選択基準として GINI 指標を用いた CART アルゴリズムを使用し，枝分割の停止基準として不純度の最小変化を 0.01，親枝葉中の最小レコード数を全体の 2%，子枝葉中の最小レコード数を全体の 1%とした．また，ニューラルネットワークでは，中間層数を 3 としてモデル構築を行った結果を示した．また，得られた決定木を図 2 に示す．

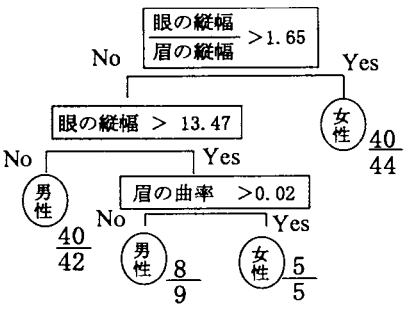


図 2 得られた決定木

5 おわりに

本研究では，多変量解析，決定木，ニューラルネットワークを用いて顔画像から男女識別を行い，用いる手法ごとの識別率や識別に重要な要因抽出を行った．その結果，モデル構築に用いたデータおよびその他のデータに対する判別率においてニューラルネットワークによる識別が他の手法に比較して優位であることを示した．

参考文献

[1] 山口　真美, 加藤　隆, 赤松　茂：顔の感性情報と物理的特徴との関連について－年令/性の情報を中心に－, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J79-A , No.2, pp.279–287, (1996)

[2] 永田　明徳, 金子　正秀, 原島　博：平均顔を用いた顔印象分析, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J80-A, No.8, pp.1266–1272, (1997)

[3] M.Turk and A.Pentland, Eigenfaces for recognition, J.Cognitive Neurosci, Vol.3, No.1, pp.71 86, (1991)

[4] 肖　業貫, N.P. チャンドラシリ, 田所　嘉昭, 尾田　政臣：2-D DCT とニューラルネットワークを用いた顔画像の表情認識, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J81-A, No.7, pp.1077–1086, (1998)

[5] 坂口　竜己, 森島　繁生：空間周波数を利用した実時間顔表情認識, テレビジョン学会技 術報告, Vol.20, No.41, pp.49 54, (1996)

[6] 赤松　茂：コンピュータによる顔の認識－サーベイ－, 電子情報学会 A, Vol.J80-A, No.8, pp.1215–1230, (1997)

[7] L.Breiman, J.Friedman, R.Olshen and C.Stone : Classification and regression trees, Wadsworth, (1984)

[8] J.Mingers: An Empirical Comparison of Selection Measures for Decision-Tree Induction, Machine Learning, Vol.3, pp.319–342,(1989)

［問い合わせ先］
〒 440-8511 豊橋市牛川町松下 20-1
豊橋創造大学 経営情報学部
メディア・ネットワーク学科
三好　哲也
TEL:0532-54-2111 ext.623
E–mail: miyoshi@sozo.ac.jp

知覚の重要度を基準とした顔画像からの特徴抽出
Facial feature extraction based on a degree of perceptual importance

神酒 勤　　佐藤 徹
Tsutomu Miki　　Toru Sato
九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻
Graduate School of Life Science and Systems Engineering,
Kyushu Institute of Technology

Abstract: The Three Component Image Model has been reported as a perceptually motivated image model. This model decomposes the image into three components with difference in a degree of perceptual importance. We focus its effective extraction ability of the perceptually significant region of the image and try to apply this concept to the facial feature extraction. In this paper, the facial feature extraction based on a degree of perceptual importance by using the hardware-oriented nonlinear function network is proposed and its performance is discussed.

1 はじめに

人間の知覚の重要度を基に画像を周波数領域で分割する Three Component Image Model が提案されている.[1] このモデルは，対象画像を知覚において重要な領域 (Stressed Image) と重要でない領域 (Weaker Edges) に大別する．知覚に重要な Stressed Image は，Strong Edges と Smooth Area に分けられる．つまり画像を 3 つのコンポーネントに分割し，それぞれに適した画像処理を行うという手法である．一方，佐松らが提案した Simplest wavelet network(SWN)[4] というモデルがある．このモデルは，コサイン関数を基底に用いた基底関数ネットワークの一つであり，空間近似能力にすぐれている．我々は，SWN をハードウェア実装に適した形に改良したモデルを提案し，FPGA にて実現した [5]．本研究では，Stressed Image が人間の知覚に重要な領域を抽出するという能力に着目し，リアルタイム性に優れたハードウェア・オリエンティドな非線形関数ネットワークモデルを提案し，効率的な特徴量抽出を試みる．具体的には，2 次元型基底を用いた非線形関数ネットワークを用いて，空間周波数に応じたレベルでの画像近似を行うことにより Stressed Image の生成を行う．具体的な画像に適用することにより人間の知覚に重要な (その画像の印象を強く与える) 特徴量が抽出することができることを示す．

2 Three Component Image Model

Three Component Image Model とは，画像を知覚の重要度に応じて Strong Edges, Smooth Area, Weaker Edges の 3 つのコンポーネントに分割，処理するモデルである．人間の視覚は intensity variation の最小化問題としてとらえる [2]，また，画像の低周波成分の変動と Edge が重なることで知覚されやすい [3] という報告が行われている．そこで，人間の知覚に重要な画像として Stressed Image を定義する．低周波成分である Smooth Area の変動が大きな領域でのエッジを人間に知覚されやすいエッジとする．つまり，Stressed Image は，知覚されやすいエッジである Strong Edges と Smooth Area から構成される．よって，Weaker Edges は，原画像から Stressed Image を取り除いた画像であり，知覚に対する重要度は低い．以上の概念によって分割したコンポーネントに対しそれぞれに最適な処理を行う．

次に，画像を 3 つのコンポーネントに分割する

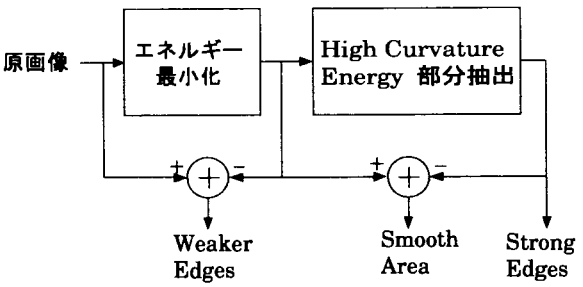


図 1: コンポーネント分割の流れ

手法について説明する．図1にフローチャートを示す．MxMの入力画像に対し，行方向のCurvature Energy $C^r_{i,j}$，列方向のCurvature Energy $C^c_{i,j}$ を定義し，知覚に重要なエッジとそうでないものに分割する．

$$C^r_{i,j} = \begin{cases} (D^r_{i,j})^2 & i=0,1,...M-2, j=0,1,...M-1 \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (1)$$

$$C^c_{i,j} = \begin{cases} (D^c_{i,j})^2 & i=0,1,...M-1, j=0,1,...M-2 \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (2)$$

$$D^r_{i,j} = x_{i,j-1} - 2x_{i,j} + x_{i,j+1} \begin{cases} i=0,1,...,M-1 \\ j=0,1,...,M-2 \end{cases} \quad (3)$$

$$D^c_{i,j} = x_{i-1,j} - 2x_{i,j} + x_{i+1,j} \begin{cases} i=0,1,...,M-2 \\ j=0,1,...,M-1 \end{cases} \quad (4)$$

式(5)に示す $E_{i,j}$ を定義し，Eが最小となるパラーメタ $\lambda^1_{i,j}, \lambda^2_{i,j}, \lambda^3_{i,j}$ を求めることでStressed Imageを抽出している．その後，Stressed ImageからCurvature Energyの高い部分をStrong Edges，残りをSmooth Areaとして分割する．

$$E_{i,j}(\lambda^1_{i,j}, \lambda^2_{i,j}, \lambda^3_{i,j}) = \lambda^1_{i,j}(x_{i,j} - x^s_{i,j}) + \lambda^2_{i,j} C^r_{i,j} + \lambda^3_{i,j} C^c_{i,j} \quad (5)$$

Three Component Image Modelの問題点として，画像分割を行う際にエネルギー最小化問題を解く必要があり，多大な計算時間がかかってしまう．

また，コンポーネントの分割処理は，なんらかの情報処理を行う前処理であり，システム全体の処理量はさらに増加することになるので，できるだけ簡単な処理にするか，もしくは，その後に行う処理と一体化したアルゴリズムで処理量を軽減する必要がある．

本研究では，2次元型基底を用いた非線形関数ネットワークを使うことによってコンポーネント分割と特徴量抽出を同時に行うシステムを作成する．また，ハードウェア指向の設計をすることで実時間処理の実現を目指す．

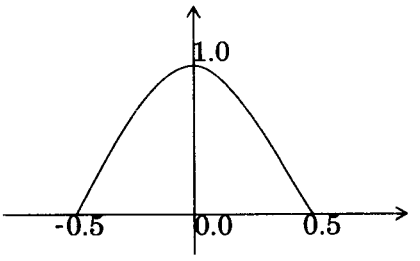


図 2: 非線形関数ネットワークの基底

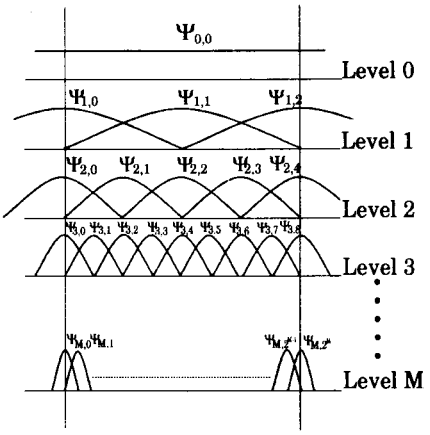


図 3: 非線形関数ネットワークの基底配置

3 非線形関数ネットワークを用いた特徴抽出アルゴリズム

本研究で使用するネットワークモデルの基本形であるSWNについて述べる．SWNは，図2に示す非線形関数であるコサイン関数を用いた基底関数を線形結合した非線形関数ネットワークである．それぞれの関数の結合係数は，結合加重の形で与えられる．

ネットワークの出力 $f(X_k)$ は，入力 X_k に対するそれぞれの基底関数 ψ_i の出力と結合荷重 W_i との積和で表現される．したがって，出力 $f(X_k)$ は，次式となる．

$$f(X_k) = \sum_{i=0}^{M} W_i \psi_i(X_k) \quad (6)$$

ここでは，ネットワーク構造をハードウェア化に最適化したモデルに改良した．改良型の非線形関数ネットワークの基底配置を図3に示す．本研究では，2節で述べたThree Component Image Modelの特徴抽出を2次元型基底を用いた非線形関数ネットワーク(2D型モデル)を使って実現する．その基底配置を図4に示す．ネットワークの出力は，$f(X_k, Y_l)$ は，入力 X_k, Y_l に対して式(7)で与えられる．

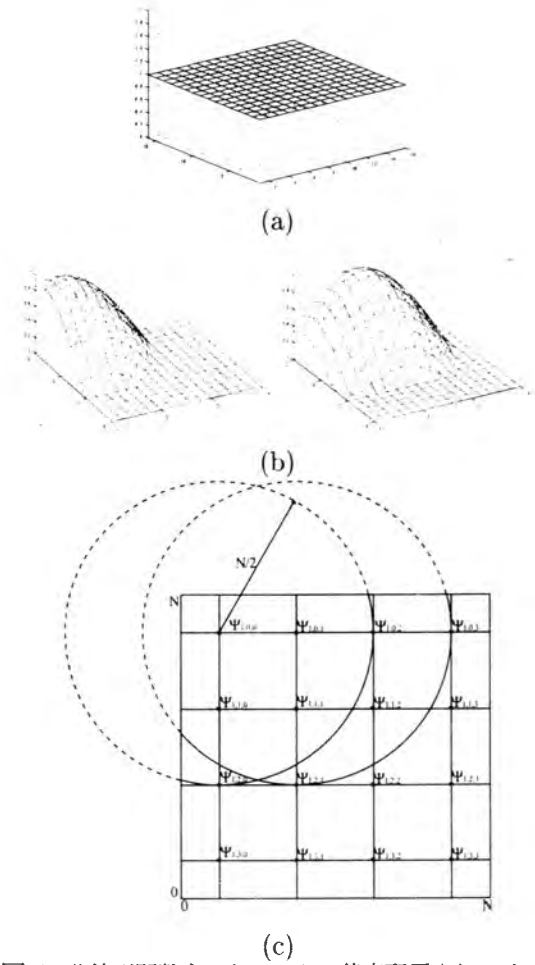


図 4: 非線形関数ネットワークの基底配置 (a) レベル 0 での基底であり, 直流成分 (b) レベル 1 の $\psi_{1,0,0}$,$\psi_{1,0,1}$ の基底の形状 (c) レベル 1 での全ての基底配置の中心点. N は対象画像のピクセル数. 基底の巾は, レベルを M とすると $N^{-(M+1)}$ で表される

$$f(X_k, Y_l) = \sum_{a=0}^{M} \sum_{bk=0}^{2^{a+1}-1} \sum_{bl=0}^{2^{a+1}-1} W_{a,bk,bl}\psi_{a,bk,bl}(X_k, Y_l) \quad (7)$$

ここで a はレベル, bk は x 軸方向の基底の個数, bl は y 軸方向の基底の個数を表す.

通常の Three Component Image Model では, pixel 毎の処理を行っている. 人間に知覚に重要な画像を抽出するには, pixel 毎ではなく周辺の情報も必要となる. 本研究では, 複数 pixel に対して基底関数を適用する非線形関数ネットワークを用いることで, Strong Edges を構成している (人間の知覚に重要な) 画像を抽出するシステムを実現した.

処理の流れを図 5 に示す. まず, 2D 型モデルを使って低レベルのみの基底で画像の近似を行う.

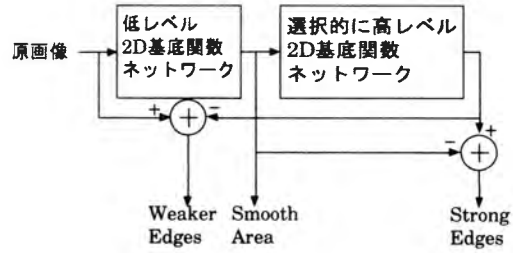


図 5: Stressed Image 生成の流れ

この時、再構成画像は, 原画像の低周波数成分のみで構成される. これを Smooth Area とする. 次に, ここで得られた再構成画像の Curvature Energy を求める. Curvature Energy の閾値を設けて, それより高い領域に対してのみ高レベルの基底を適用し近似処理を行う. この操作を繰り返し順次レベルをあげていくことで知覚に重要な画像を生成する.

4 顔画像からの特徴抽出

顔画像中から目や口, 鼻といった顔部品を抽出することは, 顔認識の前処理として非常に重要である. 本手法の有効性を確認するために, 複数のテスト画像に適用した結果を図 6,7 に示す. 図 6,7 において (a) は原画像である. まず, レベル 4 までの基底の適用を行い smooth area(b) を得る. 次に, (b) の Curvature Energy を求めた結果が (c) である. 色の濃い部分が Curvature Energy の高い領域を示す. Curvature Energy が所定の Threshold を越えた領域にのみレベル 5 基底を適用する. 以下, Curvature Energy の算出, 基底の適用を繰り返し, レベル 7 まで行う. その結果が (d) である. (d) から (b) を取り除いた画像 (e) が人間の知覚に重要な画像 (Strong Edges) となる. 比較として原画像にラプラシアンフィルタを適用し, エッジを抽出した画像を (f) に示す. 通常のエッジ抽出法では, 全てのエッジが抽出されているが, 本手法では, 人間の知覚に重要な領域のみがうまく抽出されていることがわかる.

5 おわりに

本論文では, Three Component Image Model が人間の知覚に重要な特徴を抽出することに注目し, その処理を空間近似能力に優れた非線形関数ネットワークを用いて効率的に特徴量抽出を行うことを試みた. Three Component Image Model

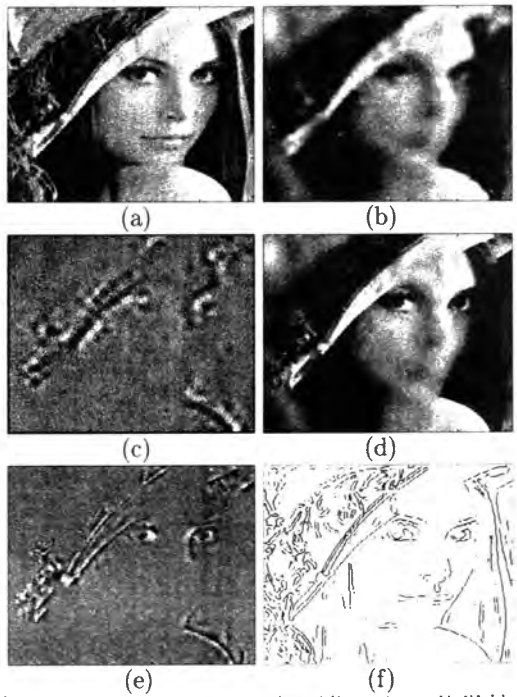


図 6: 本手法を用いた顔画像からの特徴抽出 (a) 対象画像 (b)Smooth Area(c)Curvature Energy(d)Stressed Image(e)Strong Edges (f) ラプラシアンフィルタによるエッジ画像

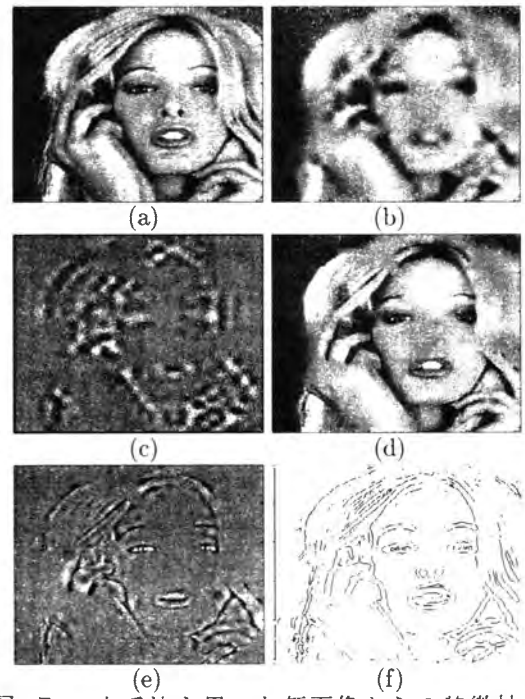


図 7: 本手法を用いた顔画像からの特徴抽出 (a) 対象画像 (b)Smooth Area(c)Curvature Energy(d)Stressed Image(e)Strong Edges (f) ラプラシアンフィルタによるエッジ画像

では，pixel 毎に処理を行い Strong Edges のみを抽出するのに対し，本手法では巾のある基底関数を使って画像を近似することにより Strong Edges のみではなく，Strong Edges を構成している人間の知覚に重要な領域の再構成を同時に実現した．複数のサンプル画像に対し，特徴抽出実験を行いラプラシアンフィルタよる結果と比較することにより，本手法が人間の知覚に重要なエッジ情報を効果的に抽出していることを確認した．今後は，2 次元型非線形関数ネットワークをハードウェア化し，リアルタイムシステムでの処理の実現をはかる．

参考文献

[1] X.Ran,N.Farvardin,A perceptually motivated three component image model, IEEE Trans Image Proc 4(6), pp.401-415, April 1995.

[2] H.Helmholtz, Treatise on physiological optics, edited by J. Southall, vol. III, The perceptions of vision, the Optical Society of America, George Bonta Publishing Company, Wisconsin, 1925.

[3] T. Cornsweet, Visual perception, Academic Press, New York and London, 1970.

[4] 山川 烈, 内野 英治, 佐松 崇史, “単峰性ウェーブレットを用いたウェーブレットネットワークとそのダイナミカルシステムのモデリングへの応用,” 信学論 (A), Vol.J79-A, No.12, pp.2046-2053, 1996.

[5] 神酒 勤, 佐藤 徹, 川越 聡, シンプレスト・ウェーブレットネットワークの FPGA 実装に関する考察, TECHNICAL REPORT OF IEICE.VLD2001-125, pp.25-30,2002

[6] H. Helmholtz, Treatise on physiological optics, edited by J. Southall, Vol. III, The perceptions of vision, the Optical Society of America, George Bonta Publishing Company, Menasha, Wisconsin, 1925.

[7] T. Cornsweet, Visual perception, Academic Press Press, New York and London, 1970.

[8] 斉藤秀昭, 森 晃徳, 視覚認知と聴覚認知, 1999.

連絡先:
〒 808-0196
福岡県北九州市若松区ひびきの 2-4
九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻
神酒 勤
Tel/Fax:093-695-6125
Email:miki@brain.kyutech.ac.jp

エージェントを用いたクラスタリングとルールの発見について

On Clustering and Rule Extraction by Agent Approach

領家 美奈
Mina Ryoke
筑波大学
University of Tsukuba

中森 義輝
Yoshiteru Nakamori
北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology

Abstract: This paper proposes an agent-based approach to knowledge discovery from a complex database in which some attributes are numerical and others are categorical. A number of agents are sent to the data space to detect local substructures of the database, and to build a model of the total structure cooperatively.

1 はじめに

本論文では数値データと記号データが混在するデータベースからの知識発見へのエージェント・アプローチについて述べる。エージェントは部分構造を探策するような内部設計をもち、また各エージェントはそれぞれが持つ集合を表現するルールを記述するための変数を同定する。これまでの多くのクラスタリング手法が提案されている [1] が、エージェント・アプローチを用いる利点は、大局的な評価関数をもたないことからクラスタリング途中で重要視する変数を容易に変更できることと、エージェントの数に相当するクラスタ数を前もってパラメータとして与える必要がないことなどがあげられる。

次節で記号データと数値データを同時に扱うために、類似度を定義し、次にエージェントの内部設計について述べる。エージェントが持つアルゴリズムの詳細は別に譲るが、その概略は、エージェントはデータベースに投入され、データというオブジェクトを規範に従って取り合い、自分がもつオブジェクト集合を基にルールを同定していくということである。

2 類似度の定義

ここでは、各属性における類似度を属性値間類似度と呼び、全属性について求められた属性値間類似度を用いてオブジェクト間類似度類似度を定義する。ここで、集合 O はオブジェクト番号の添字集合、集合 X は属性番号の添字集合である。

$i, j \in O$: オブジェクト集合　　$x \in X$: 属性集合

そして z_{ix} は i オブジェクトの第 x 属性の値を示す。

$$z_{ix} : (i \in O, x \in X)$$

数値データを持っている属性 x における属性値間類似度 $Sim(z_{ix}, z_{jx})$ は次のように定義する。

$$Sim(z_{ix}, z_{jx}) = 1 - \frac{|z_{ix} - z_{jx}|}{\max_{l \in O}\{z_{lx}\} - \min_{l \in O}\{z_{lx}\}} \qquad (1)$$

カテゴリーデータを持っている属性は、比例、間隔、順序といった、様々な尺度を持つことが想定できる。従って、それに応じて属性 x における属性値間類似度 $Sim(z_{ix}, z_{jx})$ は定義できる。ここでは、例えば、次のように定義する。

$$Sim(z_{ix}, z_{jx}) = \begin{cases} 1 & \text{if} \quad z_{ix} = z_{jx} \\ 0 & \text{if} \quad z_{ix} \neq z_{jx} \end{cases} \qquad (2)$$

あるいは、あらかじめカテゴリーに対する知見がありその距離を別に同定することができるといった状況に応じて、各属性毎に類似度を定義することとする。

以上の属性値間類似度を用いて、オブジェクト i と j の間の類似度 $SIM(i, j)$ は次のように定義される。

$$SIM(i, j) = \frac{1}{|X|} \sum_{x \in X} Sim(z_{ix}, z_{jx}) \qquad (3)$$

3 エージェントの内部

本節では、エージェントの内部について述べる。はじめに代表オブジェクトが与えられ、それをエージェントと呼ぶことにする。最小オブジェクト間類似度というパラメータ α を用いて、各エージェントはオブジェクトを保有する。

ここで、A は第 A エージェントを示す。また、i_A を A エージェントの代表オブジェクト番号とする。

$$View(A) = \{i \in O | SIM(i, i_A) \geq \alpha\} \qquad (4)$$

これは、そのエージェントがルールを作るときにベースとするオブジェクト集合となる。

Viewオブジェクト集合はどういう特徴を持つのかを探るため、Char変数集合を次のように同定する。

$$Char(A) = \{x | \min_{i,j \in View(A)} Sim(z_{ix}, z_{jx}) \geq \beta\} \quad (5)$$

パラメータβは属性値間類似度における同様の意味を持つものである。Char変数集合にある変数xが含まれていることは、x変数軸ではViewオブジェクト集合に含まれるオブジェクトが近くに存在することを示していることから、本集合は、エージェントがルールを作るときにその条件部を構成する変数を選択するための変数候補集合を意味する。

目的属性がChar(A)属性集合に含まれる場合は、結論部は線形モデルを用いるまでもなく記述できることを意味する。このとき、次のルールが得られている。

$$\text{if } \{x = z_{ix} | x \in Char(A), \exists i \in View(A)\}, \text{ then } y \text{ is } A_y \quad (6)$$

ここでA_yは、含まれるオブジェクトの数により、シングルトンか、区間か分布と形を変えて表現される。

一方、目的属性がChar(A)属性集合に含まれないとき、それは、目的属性軸でばらついていることを意味するので、その場合は許容オブジェクト間類似度αが小さすぎる可能性があり少しαを大きくしてもう一度オブジェクト集合を探索することを考慮した方がよい場合もある。特に目的属性が記号属性であるときは、αを大きくするべきである。

目的属性が数値属性であるとき、実は、結論部は線形モデルを用いる必要があるかも知れないことを示唆している。そこで、他の属性軸ではどうか次の集合を用いて調べる。

$$Survey(A) = \{k | \min_{i,j \in View(A)} Sim(z_{ik}, z_{jk}) < \beta\} \quad (7)$$

Survey属性集合に含まれるとき、それは、その属性ではばらつきがみられることを意味するので、次に、目的属性を線型回帰モデルで表現する可能性を検討する。そのため、他の属性と目的属性の相関を次のように調べる。

$$(i_1, i_{|View(A)|}) = \arg \min_{(i,j)|i,j \in View(A), i<j} Sim(z_{iy}, z_{jy}) \quad (8)$$

ここで$|View(A)|$は、View(A)オブジェクト集合に含まれるオブジェクトの数を示す。式(8)は、目的属性値間類似度の最も小さなペアを求めている。

そして下記のように、オブジェクトの順番を与え、番号をつけなおす。

$$i_{j+1} = \arg \max_{i|i \notin i_1, \cdots, j_j} Sim(z_{iy}, z_{i_j y}), \quad j = 1, 2, \cdots, |View(A)| - 1 \quad (9)$$

いま、目的属性についてオブジェクト集合が並べ換えられた。その順番を用いて、数値属性を持つ各属性軸上では目的属性と相関が強いかを調べる。

$$Mon(x) = \frac{\sum_{l=2}^{|View(A)|-1} Sig(Sim(z_{i_l x}, z_{i_1 x}) - Sim(z_{i_{l+1} x}, z_{i_1 x}))}{|View(A) - 2|} \quad (10)$$

ここで、$Sig(x)$は、次のように定義される。

$$Sig(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (11)$$

本論文では、より簡単なため、目的属性と各属性の間の単調性を調べて、次の説明変数集合を求めることとする。

$$Space(A) = \{x | Mon(x) \geq \gamma, x \in X\} \quad (12)$$

Space(A)属性集合は、結論部における線型回帰モデルの説明変数候補集合である。現時点ではその集合に含まれる属性を説明変数として使用しているが、相関行列を求めて説明変数間の相関を検討することも考えられる。

4 おわりに

本論文では、エージェントを用いたクラスタリングとルール獲得について述べた。本手法は、数値データと記号データが混在する混合データについて適用可能で、エージェントを用いたクラスタリングのアプローチと各エージェントのルール同定について述べた。

参考文献

[1] U. M. Fayyad, G. Piatetsky, P. Smyth, R. Uthurusamy (eds.): Advances in Knowledge Discovery and Data Minig, AAAI/MIT Press, 1996.

連絡先

領家 美奈
〒112-0012 東京都文京区大塚 3-29-1
筑波大学大学院ビジネス科学研究科
Tel: 03-3942-6889, Fax: 03-3942-6829
Email: ryoke@gssm.otsuka.tsukuba.ac.jp

カテゴリカルデータに対するファジィクラスタリングの定式化について

Formulations of Fuzzy Clustering for Categorical Data

○馬屋原 一孝 * 宮本 定明 ** 中森 義輝 *
○ Kazutaka Umayahara* Sadaaki Miyamoto** Yoshiteru Nakamori*

* 北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科
Japan Advanced Institute of Science and Technology

** 筑波大学 機能工学系
University of Tsukuba

Abstract: In this paper, new formulations of fuzzy clustering algorithm for categorical data are proposed. Although fuzzy c-means algorithm usually uses the distances from cluster centers, the memberships are weighted with categorical data and the distance from the unit vectors are used in this new formulation. Then, different types of the metrics between the weighted membership vectors and unit vectors are considered for the objective functions.

1 はじめに

本研究では各個体をマルチ集合として問題を定式化した，カテゴリカルデータに適用可能なクラスタリング手法を提案する。fuzzy c-means 法では，各個体をデータ空間の距離に応じてクラスタリングを行う。しかし，普通に同手法をカテゴリカルデータに適用しようとすると，異なるカテゴリにうまく距離を定義することが難しい。さらにカテゴリカルデータは実数値で与えられるため，多くの個体間の距離が離散的に与えられるために同手法にはあまり適さないという問題がある。本研究ではメンバシップを多次元ベクトルとみなし，そのベクトルのカテゴリカルデータの重みつき平均と単位ベクトルとの距離を用いた目的関数を提案する。さらにこの距離の代わりに内積を用いた目的関数を考え，呉ら [8] の定式化がこの定式化によって異なる側面から捉えられることを示す。

fuzzy c-means 法 [1] は crisp な c-means 法 [2, 3] をファジィ化した，現在広く用いられているクラスタリング手法である。しかし，fuzzy c-means 法は各個体とクラスタの中心との距離の総和を最小化するという手法であるため，主に連続データに対して用いられてきた。本論文では，従来とは全く異なったクラスタリング空間を考える。まず fuzzy c-means 法で用いられるクラスタの中心の代わりに，メンバシップを多次元空間上でのベクトルと捉え，それをカテゴリカルデータにより加重平均する。そしてその結果がクラスタごとに離散するように，単位ベクトル方向に近くなるように分割を行う。

まず 2 節では fuzzy c-means 法とマルチ集合についての概略を述べる。そして 3 節では，各個体がマルチ集合であるようなカテゴリデータに対する，3 種類のファジィクラスタリングの目的関数を定式化し，その最適解を示す。

2 準備

2.1 fuzzy c-means 法

いま，クラスタリングすべき**個体の集合**を $X = \{\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2, \cdots, \boldsymbol{x}_n\} (\subset \boldsymbol{R}^p)$，**クラスタの数**を c，クラスタ i の**代表点（プロトタイプ）**を $\boldsymbol{v}_i$ とし，u_{ik} を個体 $\boldsymbol{x}_k$ がクラスタ i に属する**帰属度**とする。このとき，**fuzzy c-means(FCM) 法**は，u_{ik} が以下の制約

$$\mathcal{U}_1 = \left\{ (u_{ik}) \;\middle|\; \sum_{i=1}^{c} u_{ik} = 1,\ u_{ik} \in [0,1],\ k \le n \right\}$$

のもと，$U = (u_{ik}), V = (\boldsymbol{v}_i)$ に関する目的関数

$$J_{fcm}(U,V) = \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n} (u_{ik})^q\, D_{ik} \qquad (1)$$

を最小化する問題となる。ただし，$D_{ik} = ||\boldsymbol{v}_i - \boldsymbol{x}_k||^2$ であり，$q(>1)$ はクラスタリングにあいまいさを与えるパラメータである。この $J_{fcm}(U,V)$ を，最初に U を固定し V について，次に V を固定し U について最小化する次のような **2 段階アルゴリズム**を考える [1]。

FCM1. $\bar{U}$ と $\bar{V}$ の初期値を適当に与える。

FCM2. $\min_{V \in \boldsymbol{R}^{pc}} J_{fcm}(\bar{U}, V)$ の最適解を $\bar{V}$ とする。

FCM3. $\min_{U \in \mathcal{U}_1} J_{fcm}(U, \bar{V})$ の最適解を $\bar{U}$ とする。

FCM4. 最適解 $(\bar{U}, \bar{V})$ が収束していれば終了，そうでなければ **FCM2** に戻る。

このとき，**FCM2** での最適解 $\bar{V}$ は

$$\bar{\boldsymbol{v}}_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} (\bar{u}_{ik})^q \boldsymbol{x}_k}{\sum_{k=1}^{n} (\bar{u}_{ik})^q} \qquad (2)$$

となり，**FCM3** での最適解 $\bar{U}$ は

$$\bar{u}_{ik} = \left[\sum_{j=1}^{c} \left(\frac{D_{ik}}{D_{jk}} \right)^{\frac{1}{q-1}} \right]^{-1} \tag{3}$$

となることが示されている [1]。

2.2 マルチ集合

通常の集合では，ある要素は 1 つしか存在しないが，要素の重複が許される集合が Knuth [6] や Manna, Waldinger [7] によって考察されている。このような集合はマルチ集合 (multiset) あるいはバッグ (bag) と呼ばれている。

マルチ集合については文献 [5] に詳しく紹介されている。有限集合 $X = \{x_1, \cdots, x_n\}$ 上にマルチ集合が定義されるものとする。クリスプマルチ集合 M は，$M = \{x_i, \cdots, x_i, x_j, \cdots, x_j\}$ のように要素の重複を許す集合であり，各 $x_i \in X$ に自然数を対応付ける $Count_M$ 関数 ($Count : X \to N$) で特徴付けられる。$Count_M$ 関数は，要素の重複度を表し，$Count_M(x_1) = 3$ ならば，M には x_1 が 3 個存在することを意味している。マルチ集合 M について任意の $Count_M(x_i) < \infty, \forall x_i \in X$ を仮定する。$X = \{x_1, \cdots, x_n\}, a_i = Count_M(x_i), i = 1, \cdots, n$ と書くとき，ひとつのマルチ集合 M について $M = \{a_1/x_1, a_2/x_2, \cdots, a_n/x_n\}$ と表記したり，各要素 x_i を k_i 個並べた集合として表記することもある。なお以降，$Count_M(x)$ を簡単のために $C_M(x)$ とする。

3 カテゴリカルデータのクラスタリング

本章では，カテゴリカルデータのクラスタリングについて，これまでとは異なる視点で 3 つの定式化を述べる。さらに，この中の 1 つが呉らの定式化と類似したものとなっていることを示し，その定式化の意味の違いについて考察する。

今，次のような m 個のマルチセットからなる族，$\mathcal{M} = \{M_1, M_2, \cdots, M_m\}$ を c 個のクラスタに分割する問題を考える。通常，ファジィクラスタリングでは許容集合として $\mathcal{U}_1$ を考えるが，ここでは以降の定式化で最適解を得るために以下の許容集合を考える。

$$\mathcal{U}_2 = \left\{ (u_{ik}) \,\middle|\, \sum_{k=1}^{n} u_{ik} = 1,\ u_{ik} \in [0,1],\ i \le c \right\}$$

次に，クラスタ i のプロトタイプ V_i をメンバシップ関数 $\mu_{V_i}(x_k)$ によって表される下記のような X のファジィ部分集合を考える。

$$\begin{aligned} V_i &= \{\mu_{V_i}(x_j)/x_j \mid j = 1, 2, \cdots, n\} \\ &= \{\mu_{V_i}(x_1)/x_1, \mu_{V_i}(x_2)/x_2, \cdots, \mu_{V_i}(x_n)/x_n\} \end{aligned}$$

ただし $V_1, V_2, \cdots, V_c$ が，X のファジィ分割となっているために次のような制約を満たしているものとする。

$$\sum_{i=1}^{c} \mu_{V_i}(x_j) = 1, \quad j = 1, 2, \cdots, n \tag{4}$$

この $\mu_{V_i}(x_j)$ を簡単に μ_{ij} と記し，ベクトルとして次のように標記する。

$$\mu_j = (\mu_{1j}, \mu_{2j}, \cdots, \mu_{cj}) \tag{5}$$

そして $\vec{M}_k$ をこの $C_{M_k}(x_j)$ の重みつき平均とする。

$$\vec{M}_k = \frac{\sum_{j=1}^{n} C_{M_k}(x_j) \cdot \mu_j}{\sum_{j=1}^{n} C_{M_k}(x_j)} \tag{6}$$

(a) まず最初の定式化では d_{ik} は以下のように距離を定める。

$$d_{ik} = \|\vec{M}_k - \vec{e_i}\|^2 \tag{7}$$

ここで $\vec{e_i}$ は，i 番目の要素が 1 で，それ以外は 0 の c 次元ベクトル $\vec{e_i} = (e_{i1}, e_{i2}, \cdots, e_{ic})$ とする。

$$e_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

そして c 個のクラスタをできるだけ遠くに存在するように $U = (u_{ik}), V = (V_i)$ に関する目的関数

$$\begin{aligned} J_1(U,V) &= \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{m} u_{ik}\, d_{ik} \\ &+ \lambda^{-1} \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{m} u_{ik} \log u_{ik} \end{aligned} \tag{8}$$

を最小化する問題を考える。上式の第 2 項は u_{ik} のべき乗の代わりにあいまいさを与えるエントロピー項 [4] である。このとき U の最適解は

$$u_{ik} = \frac{\exp(\lambda d_{ik})}{\sum_{l=1}^{m} \exp(\lambda d_{il})} \tag{9}$$

で与えられ，μ_j の最適解は下記のように求められる。

$$\mu_{tj} = \frac{\sum_{k=1}^{m} \left[\frac{4C_{M_k}(x_j)}{C_k} \cdot \sum_{i=1}^{c} (u_{ik})^q A_{ijkt} \right]}{\sum_{k=1}^{m} \left[\frac{4C_{M_k}(x_j)^2}{C_k^2} \cdot \sum_{i=1}^{c} (u_{ik})^q \right]} \tag{10}$$

ただし，

$$A_{ijkt} = \left[\left(e_{it} - \frac{r_{jt}}{C_k} \right) - \frac{1}{c} \sum_{s=1}^{c} \left(e_{is} - \frac{r_{js}}{C_k} \right) + \frac{C_{M_k}(x_j)}{c \cdot C_k} \right]$$

$$\vec{r_j} = (r_{j1}, r_{j2}, \cdots, r_{jc}) = \sum_{l \neq j} C_{M_k}(x_l) \mu_l \tag{11}$$

$$C_k = \sum_{j=1}^{n} C_{M_k}(x_j) \tag{12}$$

とする。

ただし J_1 の最適化に関して μ_j は互いに交互に影響しているため，単純に最適化できない。ここでは，μ_j の最適化の中に交互最適化を導入し，以下のような最適化アルゴリズムを考える。

CFCM1. $\bar{U}$ と $\bar{V}$ の初期値を適当に与える。

CFCM2. $\min_{U \in \mathcal{U}_2} J(U, \bar{V})$ の最適解を $\bar{U}$ とする。

CFCM3. $\min_{\mu_j \in \boldsymbol{R}^c} J(\bar{U}, \bar{\mu}_1, \cdots, \mu_j, \cdots, \bar{\mu}_n)$ の最適解を $\bar{\mu}_j$ とし，各 $\bar{\mu}_j$ が収束するまで **CFCM3** を繰り返す。

CFCM4. 最適解 $(\bar{U}, \bar{V})$ が収束していれば終了，そうでなければ **CFCM2** に戻る。

(b) 次に，d_{ik} に二乗距離のかわりに内積を用いる。ただし，このとき最適化のために μ_j の制約条件を変更する必要がある。

$$d_{ik} = < \vec{M}_k, \vec{e}_i > \tag{13}$$

とおき，μ_j の制約条件を，

$$\|\mu_j\|^2 = 1 \tag{14}$$

と置く。このとき，$U = (u_{ik}), V = (V_i)$ に関する目的関数

$$\begin{aligned} J_2(U,V) &= \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{m} u_{ik}\, d_{ik} \\ &- \lambda^{-1}\sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{m} u_{ik}\log u_{ik} \end{aligned} \tag{15}$$

の最大化を考えることができる。このとき u_{ik} の最適解は (9) 式と同様に，μ_j の最適解は下記のように得られる。

$$\mu_{ij} = \frac{\left(\sum_{k=1}^{m} \frac{u_{ik} C_{Mk}(x_j)}{C_k}\right)^2}{\sum_{i=1}^{c}\left(\sum_{k=1}^{m} \frac{C_{Mk}(x_j)}{C_k}\right)^2} \tag{16}$$

ただし，$C_{Mk}(x_j)$ を $\sum_{j=1}^{n} C_{Mk}(x_j) = 1$ と事前に正規化しておくと，より簡単に

$$\mu_{ij} = \frac{\left(\sum_{k=1}^{m} C_{Mk}(x_j)\right)^2}{\sum_{i=1}^{c}\left(\sum_{k=1}^{m} C_{Mk}(x_j)\right)^2} \tag{17}$$

となる。

(c) 最後に，μ_j の制約条件は変更せず，μ_j にも u_{ik} と同様のエントロピー項を導入する。

まず d_{ik} は，(13) 式を用い，μ_j に (4) 式の制約を考え，この目的関数を最大化する。このとき μ_j はクリスプ解となるため，μ_j に あいまいさを導入するエントロピー項を導入した目的関数

$$\begin{aligned} J_3(U,V) &= \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{m} u_{ik}\, d_{ik} \\ &- \lambda_1^{-1}\sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{m} u_{ik}\log u_{ik} \\ &- \lambda_2^{-1}\sum_{i=1}^{c}\sum_{j=1}^{n} \mu_{ij}\log \mu_{ij} \end{aligned} \tag{18}$$

の最大化を考える。実はこの方法は，呉らの目的関数 [8] と類似したものになっている。このとき，u_{ik}, μ_{ij} の最適解は下記のように得られる。

$$u_{ik} = \frac{\exp\left(\frac{\lambda_1}{C_k}\sum_{j=1}^{n} \mu_{ij} C_{Mk}(x_j)\right)}{\sum_{k'=1}^{m}\exp\left(\frac{\lambda_1}{C_{k'}}\sum_{j=1}^{n} \mu_{ij} C_{Mk'}(x_j)\right)} \tag{19}$$

$$\mu_{ij} = \frac{\exp\left(\lambda_2\sum_{k=1}^{m} \frac{u_{ik} C_{Mk}(x_j)}{C_k}\right)}{\sum_{i=1}^{c}\exp\left(\lambda_2\sum_{k=1}^{m} \frac{u_{ik} C_{Mk}(x_j)}{C_k}\right)} \tag{20}$$

ここでも $C_{Mk}(x_j)$ を事前に正規化しておくと，C_k は不要となりそれぞれ以下のような簡単な解となる。

$$u_{ik} = \frac{\exp\left(\lambda_1\sum_{j=1}^{n} \mu_{ij} C_{Mk}(x_j)\right)}{\sum_{k'=1}^{m}\exp\left(\lambda_1\sum_{j=1}^{n} \mu_{ij} C_{Mk'}(x_j)\right)} \tag{21}$$

$$\mu_{ij} = \frac{\exp\left(\lambda_2\sum_{k=1}^{m} u_{ik} C_{Mk}(x_j)\right)}{\sum_{i=1}^{c}\exp\left(\lambda_2\sum_{k=1}^{m} u_{ik} C_{Mk}(x_j)\right)} \tag{22}$$

これらの解も，呉らの解 [8] と似たものとなっている。

この定式化は，呉らの定式化とは以下の 2 点で異なっている。(1) u_{ik} と μ_{ij} の制約の方向が異なる。この制約の方向の違いは，クラスタリング対象となるベクトルの違いを意味している。(2) この定式化では，$\|\vec{M}_k\| = 1$ と正規化されている。この正規化により，大きなクラスタの目的関数への影響と小さいクラスタの影響が同様に扱われるようになっている。

呉らの目的関数を本論文のように表記すれば，$\vec{u}_k = (u_{1k}, u_{2k}, \cdots, u_{ck})$ と置くと，

$$\vec{M}_j = \sum_{k=1}^{m} C_{Mk}(x_j) \cdot \vec{u}_k \tag{23}$$

$$
\begin{aligned}
J_4(U,V) &= \sum_{i=1}^{c}\sum_{j=1}^{n} \mu_{ij} < \vec{M}_j, \vec{e}_i > \\
&- \lambda_1^{-1} \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{m} u_{ik} \log u_{ik} \\
&- \lambda_2^{-1} \sum_{i=1}^{c}\sum_{j=1}^{n} \mu_{ij} \log \mu_{ij} \qquad (24)
\end{aligned}
$$

という定式化となり，以下のような最適解となる。

$$
u_{ik} = \frac{\exp\left(\lambda_1 \sum_{j=1}^{n} \mu_{ij} C_{Mk}(x_j)\right)}{\sum_{i'=1}^{c} \exp\left(\lambda_1 \sum_{j=1}^{n} \mu_{i'j} C_{Mk}(x_j)\right)} \qquad (25)
$$

$$
\mu_{ij} = \frac{\exp\left(\lambda_2 \sum_{k=1}^{m} u_{ik} C_{Mk}(x_j)\right)}{\sum_{j'=1}^{n} \exp\left(\lambda_2 \sum_{k=1}^{m} u_{ik} C_{Mk}(x_{j'})\right)} \qquad (26)
$$

なお，定式化 **(b),(c)** の場合は目的関数の最適化に μ_j が互いに影響しないので，**(a)** と違い通常の 2 段階アルゴリズムが適用される。

4 おわりに

本稿では fuzzy c-means 法を応用した，これまでとは異なる視点でのカテゴリデータに対するファジィクラスタリング手法の 3 つの定式化を示した。さらに，この中の 1 つが呉らの定式化と類似したものとなっていることを示し，その定式化の意味の違いについて述べた。

これらの目的関数の違いによるクラスタリング手法の性質の違いについての研究は今後の課題である。

参考文献

[1] J. C. Bezdek: *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms.* Plenum, New York, 1981.

[2] J. B. McQueen: Some methods of classificationand analysis of multivariate observations, *Proc. of 5th Berkeley Symposium on Math. Stat. and Prob.*, pp. 281–297, 1967.

[3] R. O. Duda and P. E. Hart: *Pattern Classification and Scene Analysis*, Wiley, New York, 1973.

[4] 宮本 定明: クラスター分析入門. 森北出版, 1999.

[5] 宮本 定明: ファジィマルチ集合の基本演算について, 日本ファジィ学会誌, Vol.8, No.4, pp.639-645, 1996.

[6] D. E. Knuth: *The Art of Computer Programming, Vol.2 / Seminumerical Algorithms*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1969.

[7] Z. Manna and R. Waldinger: *The Logical Basis for Computer Programming, Vol.1: Deductive Reasoning*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1985.

[8] Chi-Hyon Oh, Katsuhiro Honda and Hidetomo Ichihashi: Fuzzy Clustering for Categorical Multivariate Data, *Proceedings of the Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference*, pp.2154- 2159, 2001.

問い合わせ先 〒 923–1292
石川県能美郡辰口町旭台 1-1
北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科
馬屋原 一孝 (uma@jaist.ac.jp)
tel. 0761-51-1758 / fax. 0761-51-1149

ファジィクラスタリングを用いた重み付き回帰分析

Weighted Regression Analysis using Fuzzy Clustering

松岡　孝　　佐藤　美佳
Takashi Matsuoka　　Mika Sato-Ilic
筑波大学システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

Abstract: Geographically weighted regression model has been introduced as a technique for exploring geographical locations. This technique is aimed at extracting the relevance between spatial variables. In this model, the weights of geographical location are estimated based on the use of the kernel function. This paper discusses a method of estimating the geographical weight by using degree of belongingness of fuzzy clustering and investigates the results of weights between the kernel estimate and the use of fuzzy clustering based on density estimate.

1　はじめに

従来の回帰分析に，ロバストな推定や空間的変動を考慮し，重みを導入する方法が提案されている．[1, 2, 3, 4] 地理的重み付き重回帰分析は地域間の相違性の概念を導入し，地理的な重みを考慮した回帰分析モデルである．[1]

一方，ファジィクラスタリングを用いることにより，地域の分類を行い，重みを推定する方法が提案されている．[3, 4] 本研究では，地理的重み付き重回帰分析で用いられているカーネル関数による重みを，ファジィクラスタリングを用いることにより推定し，それらの重みを適合度，密度推定を用いて比較検討を行う．

2　ファジィクラスタリングを用いた重み付き重回帰分析

目的変数 $\boldsymbol{y}$ と p 個の説明変数 $x_1, \cdots, x_p$ で観測された n 個 $(n > p)$ の個体があるとき，ファジィクラスタリングを用いた重み付き重回帰モデルは，次のように示される．

$$\boldsymbol{y} = U_k X \boldsymbol{\beta}_k + \boldsymbol{\varepsilon}_k, \qquad (2.1)$$

$$U_k = \begin{bmatrix} u_{1k} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & u_{2k} & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & u_{nk} \end{bmatrix}, \qquad (2.2)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \boldsymbol{\beta}_k = \begin{bmatrix} \beta_{k1} \\ \vdots \\ \beta_{kp} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\varepsilon}_k \sim N(0, \sigma^2).$$

ここで，K はクラスター数を示し，$\boldsymbol{y}$ は目的変数，$\boldsymbol{\beta}_k$ は k 番目のクラスター $(k = 1, \cdots, K)$ における回帰係数であり，β_{kj} は k 番目のクラスターにおける j 番目の変数に対する回帰係数を示す．U_k は k 番目のクラスターに対する重みを示す行列で，u_{ik} はファジィクラスタリングを用いて，n 個の個体を K 個のクラスターに分類したときの i 番目の個体が k 番目のクラスターに属す度合いを示し，次の条件を満足するものとする．

$$0 \leqq u_{ik} \leqq 1, \ \sum_{k=1}^{K} u_{ik} = 1,$$
$$i = 1, \cdots, n, \quad k = 1, \cdots, K.$$

このとき (2.1) の回帰係数 $\boldsymbol{\beta}_k$ の推定値は

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}_k = (X^t U_k U_k X)^{-1} X^t U_k \boldsymbol{y} \qquad (2.3)$$

となる．ここで X^t は行列 X の転置行列を示す．

地理的重み付き重回帰分析 [1] では，(2.3) の重みを示す行列 U_k は次のように推定される．

$$W_k = \begin{bmatrix} \alpha_{1k} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \alpha_{2k} & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \alpha_{nk} \end{bmatrix}, \qquad (2.4)$$

$$\alpha_{ik} = \Phi(d_{ik}).$$

Φ はカーネル関数であり，一般に，次の $(a),(b),(c)$ の条件を満たす．

$(a)\Phi(0) = 1$

$(b)\lim_{d\to\infty} \Phi(d) = 0$

$(c)\Phi$ は単調減少

$(a),(b),(c)$ を満たす Φ の例として次の式がある．

$$\alpha_{ik} = exp(\frac{-d_{ik}}{h}). \qquad (2.5)$$

h は地理的データの影響する円の範囲を制御するパラメータである．

(2.4) の重みの推定法として使われるカーネル関数は，本質的に各地域の重心と個体との距離に基づく関数であり，本手法で用いたファジィクラスタリング手法も，距離に基づく重み推定を実現したものである．

(2.3) の推定値を検証するために，以下の非適合度を用いる．

$$F^U = \frac{\sum_{k=1}^{K} g^U(k)}{K\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}, \qquad (2.6)$$

ここで，

$$g^U(k) \equiv \sum_{i=1}^{n}(y_i - Y_{ki}^U)^2,$$

$$Y_k^U = U_k X \hat{\boldsymbol{\beta}}_k, \quad Y_k^U = (Y_{k1}^U, \cdots, Y_{kn}^U)^t,$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n}$$

である．また，カーネル関数での推定値には以下の非適合度を用いる．

$$F^W = \frac{\sum_{k=1}^{K} g^W(k)}{K\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}, \qquad (2.7)$$

$$g^W(k) \equiv \sum_{i=1}^{n}(y_i - Y_{ki}^W)^2,$$

$$Y_k^W = W_k X \tilde{\boldsymbol{\beta}}_k, \quad Y_k^W = (Y_{k1}^W, \cdots, Y_{kn}^W)^t,$$

$$\tilde{\boldsymbol{\beta}}_k = (X^t W_k W_k X)^{-1} X^t W_k \boldsymbol{y}. \qquad (2.8)$$

3 数値例

(2.5) のカーネル関数による重みの推定法を用いた回帰係数の推定値 (2.8) とファジィクラスタリングの帰属度を用いた重みにより求めた回帰係数の推定値 (2.3) を人工データを用いて検証した．データを図 3.1 に示す．

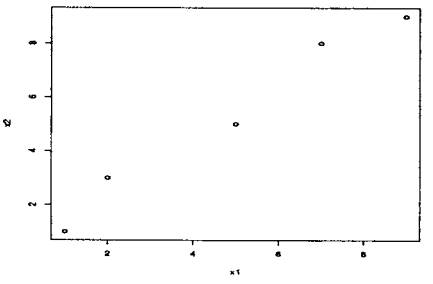


図 3.1　人工データ

図 3.1 は説明変数 x_1, x_2 について 5 個のデータを布置したものである．クラスター数は 2 と仮定した．カーネル関数を用いて得られた回帰係数の推定値は

$$\tilde{\boldsymbol{\beta}}_1 = \begin{bmatrix} 4.73 \\ -1.53 \end{bmatrix}, \tilde{\boldsymbol{\beta}}_2 = \begin{bmatrix} 2.10 \\ -0.72 \end{bmatrix}, \qquad (3.1)$$

であり，帰属度を重みとして用いて求められた回帰係数の推定値は

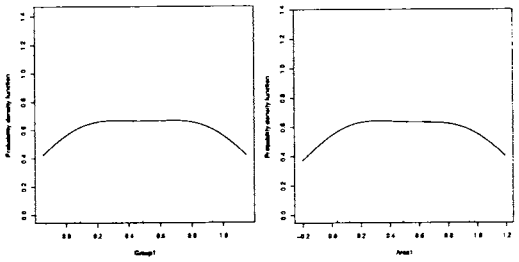
$$\hat{\boldsymbol{\beta}}_1 = \begin{bmatrix} 5.60 \\ -2.13 \end{bmatrix}, \hat{\boldsymbol{\beta}}_2 = \begin{bmatrix} 1.48 \\ -0.18 \end{bmatrix}, \qquad (3.2)$$

となった．(3.1), (3.2) より，両者に類似した傾向があることがわかる．また，(2.6),(2.7) の非適合度を計算した結果を表 3.1 に示す．

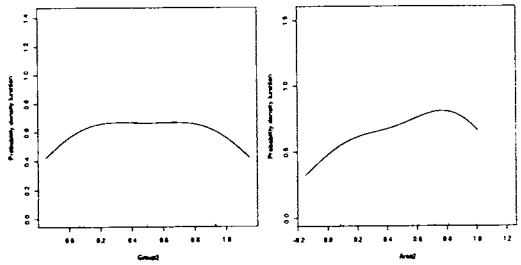
表 3.1 非適合度の比較

F^U	F^W
0.59	0.74

ファジィクラスタリングを用いた場合の非適合度の方が良い値を示した．図3.2は各クラスターについて，カーネル関数による重みとファジィクラスタリングによる重みをガウス型カーネル密度推定 [5] により推定した結果を示す．図3.2において，$(a),(c)$ はファジィクラスタリングの結果を用いた重みを示し，$(b),(d)$ はカーネル関数を用いた重みを示す．$(a),(b)$ はクラスター1に対する密度推定であり，$(c),(d)$ はクラスター2についての密度推定を示す．これより，1番目のクラスターでは，類似した重み構造であるが，2番目のクラスターでは顕著な違いがあることがわかる．



(a) クラスター1 (ファジィクラスタリング)　(b) クラスター1 (カーネル関数)



(c) クラスター2 (ファジィクラスタリング)　(d) クラスター2 (カーネル関数)

図 3.2　人工データの密度推定の比較

次に実データを用いた解析を行った．データは日本の2000年度の気象データ [6] であり，扱うデータは北海道から沖縄まで66の都市 (観測所) を選んだものである．目的変量を気温とし，説明変量を都市の各月の降水量とした．

カーネル関数による推定法を用いる場合は，5地域 (北海道・東北地域，関東・中部地域、近畿・中国四国地域、九州地域，沖縄・離島地域) のように分類をし，(2.8) を用いた回帰係数の推定を行った．ファジィクラスタリングを用いた推定法では，クラスター数を5として与え，分類を行い，(2.3) により回帰係数の推定を行った．

この結果，降雪量の少ない近畿・中国・四国地域や九州地域，沖縄・離島地域で構造が非常に良く似た結果を得た．表3.2は沖縄・離島地域の回帰係数の推定値の比較を示す．

表 3.2　沖縄・離島地域の回帰係数の推定値

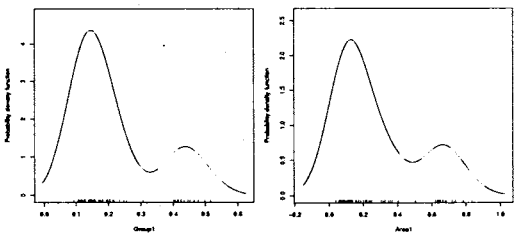
月	回帰係数 (ファジィクラスタリング)	回帰係数 (カーネル関数)
1	15.81	19.54
2	-18.53	-3.69
3	-6.80	-10.92
4	-15.77	-13.99
5	2.08	13.33
6	7.61	5.65
7	-8.97	-11.16
8	7.30	5.27
9	2.95	5.04
10	3.15	14.72
11	10.40	9.00
12	32.55	12.03

表3.3に非適合度の結果を示す．この表より，ファジィクラスタリングを用いた回帰係数の推定値の非適合度の方が良い結果を得た．図3.3は各クラスターについて，ガウス型カーネル密度推定により推定した結果を示す．

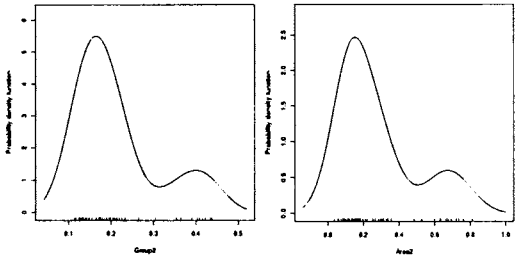
表 3.3 非適合度の比較 (降水量データ)

F^U	F^W
0.03	0.21

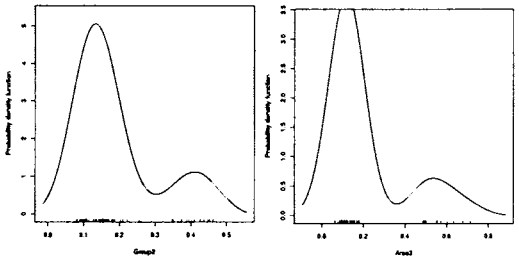
図3.3において，(a),(c),(e),(g),(i) はファジィクラスタリングの結果を用いた重みを示し，(b),(d),(f),(h),(j) はカーネル関数を用いた重みを示す．これより，北海道・東北地域であるクラスター1や関東・中部地域であるクラスター2では，類似した重み構造であることがわかる．一方，近畿・中国・四国地域 (クラスター3)，九州地域 (クラスター4)，沖縄・離島地域 (クラスター5) では両者に相違性があることがわかる．



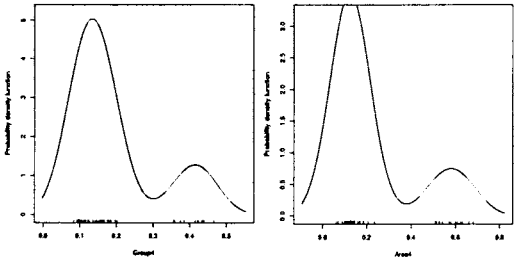
(a) クラスター1 (b) クラスター1
(ファジィクラスタリング) (カーネル関数)



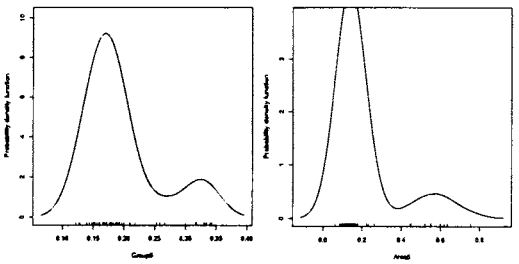
(c) クラスター2 (d) クラスター2
(ファジィクラスタリング) (カーネル関数)



(e) クラスター3 (f) クラスター3
(ファジィクラスタリング) (カーネル関数)



(g) クラスター4 (h) クラスター4
(ファジィクラスタリング) (カーネル関数)



(i) クラスター5 (j) クラスター5
(ファジィクラスタリング) (カーネル関数)

図 3.3 降水量データの密度推定の比較

4 おわりに

重み付き重回帰分析におけるファジィクラスタリングの帰属度を用いた重みの推定法について，従来のカーネル推定法による重みと比較，検討を行った．数値例からカーネル関数による重み推定とファジィクラスタリングによる帰属度を用いた重み推定では，特定のクラスター(地域)において類似した構造を持つが，非適合度の値はファジィクラスタリングを用いた方が良い結果を示した．モデル(2.1)は地理的な重みを考慮した重回帰モデル [1] や Switching Regression Model [3] と類似した構造を持つが，これらのモデルでは，モデルとデータ間の残差に重みを導入するのに対し，本研究で扱うモデルでは，データに重みを導入するという相違点がある．

参考文献

[1] C. Brunsdon, S. Fotheringham and M. Charlton, Geographically weighted regression modeling sapatial non-stationarity, *Journal of the Royal Statistical Society*, 47, Part3, pp.431-443, 1998.

[2] P. J. Diggle, P. Heagerty et al., *Analysis of Longitudinal Data*, Oxford University Press, 2002.

[3] R. J. Hathaway, J .C . Bezdek, Switching Regression Models and Fuzzy Clustering, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 1, 3, pp.195-204, 1993.

[4] M. Sato-Ilic, Fuzzy Regression Analysis using Fuzzy Clustering, *NAFIPS-FLINT 2002 International Conference*, pp. 57-62, 2002.

[5] B. W. Silverman, *Density estimation for statistics and data analysis*, Chapman and Hall, 1986.

[6] 平成12年アメダス年報, (財) 気象業務支援センター, 気象庁監修, 2000.

連絡先:
茨城県つくば市天王台1－1－1
筑波大学社会工学系
佐藤　美佳
mika@sk.tsukuba.ac.jp

カーネル関数を用いた階層的クラスタリングについて
On Hierarchical Clustering Using Kernel Function

春山 秀幸 †　　遠藤 靖典 †
Hideyuki HARUYAMA　Yasunori ENDO

† 筑波大学大学院 システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineering,
University of Tsukuba

Abstract: In this papaer, the two new hierarchical algorithms are proposed. One is constructed by introducing the kernel function into the centroid method, and the other constructed by introducing into Ward method.
The kernel function give the inner product of two vectors into the feature space, which is the mapping space by a map. The map is determined by selecting the kernel fuction and not explicit. In general, the dimension of feature space is higher than of the original space. The kernel function is available into the field of classification.
Moreover, some numerical examples are shown.

1　はじめに

近年，情報化社会の中におけるデータ解析の分野は非常に重要な位置を占めており，様々な分野で手法が提案されている．そのデータ解析の技法の１つにクラスタリングがある．クラスタリングとはデータ集合を外的基準無しに自動的に分類する手法である．パターン認識の分野では，教師無し自動分類と呼ばれ，外的基準が無いため，分類すべき個体の間に定義された類似性や距離に基づいて，グループ分けを行う．

クラスタリング技法には大きく分けて，階層的と非階層的があり，一般に，階層的クラスタリングは，非階層的クラスタリングに比べて良好な結果が得られる．本報告では，階層的クラスタリングのうち，重心法と Ward 法に着目し，それらにカーネル関数を導入した新たなアルゴリズムを提案する．カーネル関数を導入することにより，データをパターン空間より次元の高い空間で扱うことができるようになり，よりよい分割結果を得ることが期待される．

また，提案したアルゴリズムの有効性を，数値例を用いて，従来の重心法，Ward 法，代表的な非階層的クラスタリングの１つである Fuzzy C-means (FCM) と比較することにより検証する．

2　階層的クラスタリング

階層的クラスタリングにおいてクラスタ形成のための手続きはまず，各個体間に類似度または非類似度を定義し，この類似度または非類似度に基づいて，クラスタを逐次結合していく，という流れである．つまり，一番類似度の大きい (又は非類似度の小さい) 個体同士を結合してクラスタリング結果が樹形図によって得られるのである．ここでは基盤となる階層併合的手法 AHC (agglomerative hierarchical method) について述べる．階層的クラスタリングの基本アルゴリズムは以下の通りである．

アルゴリズム 1 (AHC)

Step. 1 n 個のデータを n 個のクラスタとする．

Step. 2 クラスタ間の非類似度行列 $D = [d_{ij}]$ を更新する．

Step. 3 D を参照し，最も類似性の高い *2* つのクラスタを結合して *1* つのクラスタを作る．

Step. 4 クラスタ数が *1* なら終了．そうでないなら Step. 2 へ戻る．結果は樹形図で得られる．

階層的クラスタリングでは，D の与え方が重要となり，重心法 (centroid method, AHC-C) と Ward 法 (Ward method, AHC-W) はその代表的なものである．

3 カーネル関数

写像 $\Phi : R^p \to R^r$ を考える．ただし，一般に $p << r$ とする．R^p はパターン空間，R^r は特徴空間と呼ばれる．ここで，$x = (x^1, \ldots, x^p) \in R^p$ に対して，$\phi^i(x)$ $(i = 1, \ldots, r)$ を用いて，$\Phi(x) = (\phi^1(x), \ldots, \phi^r(x))^t$ と定義する．ある関数 $K : R^r \times R^r \to R$ について，

$$K(x, y) = \langle \Phi(x), \Phi(y) \rangle \tag{1}$$

を満たすような Φ が存在するとき，K をカーネル関数と呼ぶ．Φ は K には陽に現れないので，$\Phi(x)$ によって定義される $K(x)$ を求める場合，$\Phi(x)$ の内積形さえ定義されていれば，$\phi^i(x)$ を計算する必要がない．すなわち，r がどのように大きくなろうとも，そのことは K の形に直接影響を及ぼさないので，低次元空間における計算で高次元空間のデータを扱うことが可能になる．このような式 (1) を満たす Φ が存在するカーネル関数 K の例として，

$$K_P(x, y) = (1 + x^t y)^p \tag{2}$$

$$K_G(x, y) = \exp(-\frac{\|x - y\|^2}{2\delta^2}) \tag{3}$$

がある．式 (2) は多項式型カーネル，式 (3) はガウス型カーネルと呼ばれる．本報告でも，これら2つのカーネルについて検討する．

4 カーネル関数を用いたクラスタリング

ここでは，カーネル関数を用いた重心法及び Ward 法を提案する．従来のこれら2つの方法では，非類似度として，パターン空間上の距離を用いているが，本報告で提案する方法では，パターン空間上の点を特徴空間に写像し，非類似度として，特徴空間における距離の自乗を用いる．カーネル関数を用いた重心法及び Ward 法をそれぞれ，Kernel-重心法 (K-AHC-C)，Kernel-Ward 法 (K-AHC-W) と呼ぶこととする．なお，データの集合を X とし，$x \in X$ と $y \in X$ の距離 $\|x - y\|$ が定義されているとする．

4.1 Kernel-重心法

この方法では，特徴空間におけるクラスタ C の重心 $M(C)$ は，

$$M(C) = \frac{1}{|C|} \sum_{x \in C} \Phi(x) \tag{4}$$

で与えられる．従来の重心法では，クラスタ C_i と C_j の間の非類似度はクラスタ重心間の距離の自乗で与えられるが，ここでは，特徴空間上でクラスタリングを行うため，特徴空間上でのクラスタ C_i と C_j の間の非類似度 d_{ij}^G を，

$$d_{ij}^G = \|M(C_i) - M(C_j)\|^2 \tag{5}$$

で定義する．これは，カーネル関数を用いることにより，以下のように記述できる．

$$\begin{aligned} d_{ij}^G &= \frac{1}{|C_i|^2} \sum_{x \in C_i} \sum_{y \in C_i} K(x, y) \\ &\quad - \frac{2}{|C_i||C_j|} \sum_{x \in C_i} \sum_{y \in C_j} K(x, y) \\ &\quad + \frac{1}{|C_j|^2} \sum_{x \in C_j} \sum_{y \in C_j} K(x, y) \end{aligned} \tag{6}$$

4.2 Kernel-Ward 法

この方法では，クラスタ内のデータと重心との距離平方和を損失と考え，結合の際に損失が最小とするようなクラスタを選択・結合する．そこで，特徴空間上におけるクラスタ C 内のデータと重心 $M(C)$ の間の距離平方和を，

$$\begin{aligned} E(C) &= \sum_{x \in C} \|\Phi(x) - M(C)\|^2 \\ &= \sum_{x \in C} K(x, x) \\ &\quad - \frac{1}{|C|} \sum_{x \in C} \sum_{y \in C} K(x, y) \end{aligned} \tag{7}$$

で定義することにより，クラスタ C_i と C_j の間の非類似度 d_{ij}^W を

$$d_{ij}^W = E(C_i \cup C_j) - E(C_i) - E(C_j) \tag{8}$$

と定義する．カーネル関数を用いることにより，非類似度 d_{ij}^W は以下のように記述できる．

$$\begin{aligned} d_{ij}^W &= \frac{|C_i||C_j|}{|C_i| + |C_j|} \|M(C_i) - M(C_j)\|^2 \\ &= \frac{|C_i||C_j|}{|C_i| + |C_j|} d_{ij}^G \end{aligned} \tag{9}$$

4.3 非類似度の更新について

紙面の関係上，詳細は省くが，上述の非類似度の式は原理であり，実際には，非類似度の更新は，新たに作られたクラスタについてのみ行われる．その際に用いられる更新式は，カーネルを用いない従来のアルゴリズムと同じものを使用することが出来る．一般に，カーネル関数を導入した場合，アルゴリズムの計算量は増大するが，本報告で提案した方法に関しては，計算量の増大はなく，従来と同様の手間で計算結果を得ることが出来る．

5 数値結果

この章ではサンプルデータを使用して，各クラスタリングアルゴリズムとの比較を行った (表 1)．サンプルデータとして，入れ子状に分布しているデータ集合 (図 1,2)，円の中にさらに円が配置されている二重円状のデータ集合 (図 3,4)，そして大小 2 つの円が隣接しているデータ集合 (図 5,6) を考える．本報告で提案したカーネル関数を用いた階層的クラスタリングの他に FCM，重心法，Ward 法において実験を行った．さらに，多項式型カーネルとガウス型カーネルにおいても同様に実験を行った (表 2, 表 3)．尚，サンプルデータ数はそれぞれ 300, 270, 312 であり，クラスタ数は 2 とした．

6 おわりに

本報告では，カーネル関数を用いた重心法及び Ward 法を提案した．今回のサンプルデータにおいて，従来のアルゴリズムと同様の計算量で，従来のものよりも不自然な分類が少ない，良い識別結果が得られたものと考えられる．

同じカーネルを用いても，Kernel-重心法に比べて，Kernel-Ward 法の方が比較的良い識別結果を得ている．これは，Kernel-重心法よりも Kernel-Ward 法の方が δ の許容範囲が広いためであると考えられる．

今後の課題として，人工的なサンプルデータではなく，実際のデータに対してもクラスタリングの有効性について検証する必要がある．また，カーネルの選択についても分類結果が異なっているが，様々なカーネルに対する詳細な比較検討も今後の研究課題である．

表 1: 各アルゴリズムのクラスタリング結果

	入れ子型 (図 1,2)	二重円型 (図 3,4)	隣接型 (図 5,6)
FCM	×	×	×
AHC-C	×	×	×
AHC-W	×	×	×
K-AHC-C	×	×	○
K-AHC-W	○	○	○

表 2: 各カーネル関数によるクラスタリング結果 (多項式型カーネル)

	入れ子型	二重円型	隣接型
K-AHC-C	×	×	×
K-AHC-W	×	×	×

表 3: 各カーネル関数によるクラスタリング結果 (ガウス型カーネル)

	入れ子型	二重円型	隣接型
K-AHC-C	×	×	○
K-AHC-W	○	○	○

参考文献

[1] 宮本 定明 : 'クラスター分析入門', 森北出版 (1999).

[2] Burges, C. : "A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition", Data Mining and Knowledge Discovery, Vol.2, pp.1–47 (1998).

連絡先：
〒 305-8573
つくば市天王台 1-1-1
筑波大学大学院 システム情報工学研究科
春山 秀幸
電話：0298-53-5250
Email : haruyama@esys.tsukuba.ac.jp

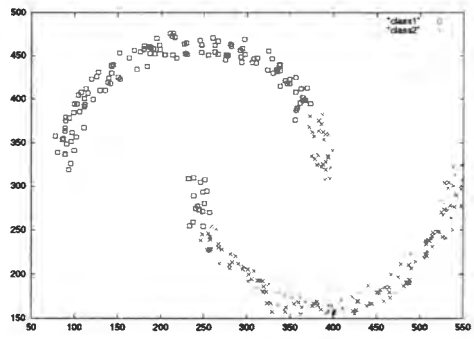


図 1: FCM によるクラスタリング結果

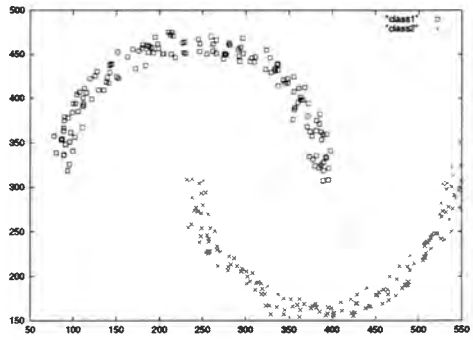


図 2: K-Ward 法によるクラスタリング結果 ($\delta = 1$)

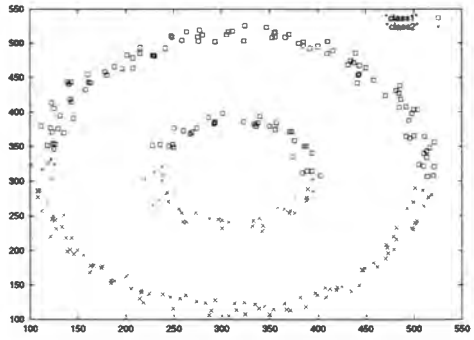


図 3: FCM によるクラスタリング結果

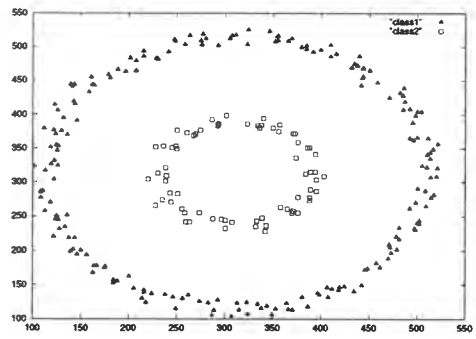


図 4: K-Ward 法によるクラスタリング結果 ($\delta = 60$)

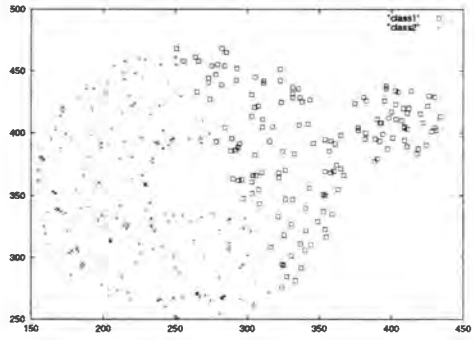


図 5: FCM によるクラスタリング結果

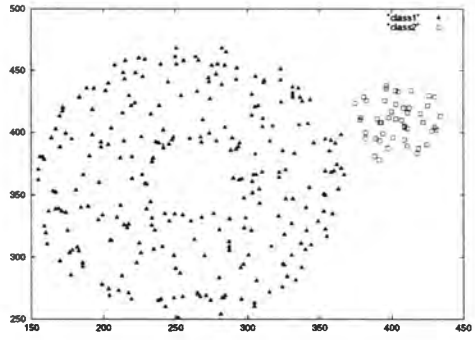


図 6: K-Ward 法によるクラスタリング結果 ($\delta = 8$)

ごみ焼却炉相関分析のファジィバイプロット

Fuzzy Biplots from Correlation Analysis of Incinerator

1) ○市橋秀友，望月耕治，本多克宏，2) 藤吉誠，福島龍太郎，林一久
H.Ichihashi, K.Mochizuki, K.Honda, M.Fujiyoshi, R.Fukushima, K.Hayashi
1) 大阪府立大学, Osaka Prefecture University
2) 日立造船株式会社, Hitachi Zosen Corporation

Abstract : A biplot is a graphical representation of two kinds of information such as samples and variables. In this paper, we recapitulate the similarity between the methods of representation and the fuzzy relational clustering. Based on the discussion, we propose fuzzified approaches of the biplot and the correspondence analysis along with the use of the fuzzy relational clustering for representing the associations. The proposed method is applied to correlation analysis of incinerators.

1. はじめに

個体とその変数を同時に低次元空間にプロットして表示する方法に，バイプロット，対応分析などがある．いずれも，個体や変数の数が増えると多次元空間が必要となる．そこでそれぞれのファジィ化手法とともに，ファジィクラスタリングによるクラスタ毎の布置を用いる階層的なプロット法を提案する．また，提案手法をごみ焼却炉燃焼制御の相関分析データに適用する．ごみ焼却炉はダイオキシンや一酸化炭素の発生低減を目的としているが，ごみの質，量，水分の含有量など計測されない要因も多く，制御方式の改善が困難な制御対象である[1]．そこで,正準相関分析を用いて,変数間の比例関係から焼却炉の稼動状態を総合的に評価する.しかし,分析対象の個体や変数の数が多いと,相関係数から直感的に状態を把握することは困難になる.そこで,提案法を用いてそれらの多次元データを2次元平面などの低次元空間に布置することにより,焼却炉の変化を直感的に捉えやすくし，異常状態の検出に役立てる．

2. ファジィクラスターの平面プロット

データ行列Dがファジィクラスターに分割されたときの主成分分析によるファジィバイプロットを,式(1)の特異値分解から求める．

$$P = M^{\frac{1}{2}}(D - \mathbf{1}_n\tilde{s})W^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

$$\tilde{s} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \boldsymbol{d}_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i} \tag{2}$$

ただし，M，Wはそれぞれ個体と変数の重みであるメンバシップ値の対角行列であり，Wは分析者が変数の重要性を考慮して決定する．個体と変数の座標U，Vは

$$P = U\Lambda V^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

$$U^* = (D - \mathbf{1}_n\tilde{s})V \tag{4}$$

$$V^* = V \tag{5}$$

と求められる．

ファジィ対応分析での個体と変数の座標U，Vを次の一般化特異値分解によって求める．

$$MPW = U\Lambda V \tag{6}$$

$$U^{\mathrm{T}}RU = I \tag{7}$$

$$V^{\mathrm{T}}SV = I \tag{8}$$

ただし,RとSはそれぞれ,MPWの行和，列和を対角要素とする対角行列である．

本研究ではエントロピー正則化を用いて,n個のN次元類似度データをD^*とし，個体のクラスター分割を求め，ファジィバイプロットやファジィ対応分析を適用することでファジィクラスタリングを併用したプロット図を得る.メンバシップの関数

$$e_{ij} = u_i \log u_i + v_j \log v_j \tag{9}$$

を要素とする行列を$E = (e_{ij})$としてクラスタリングの目的関数を

$$f = \mathrm{tr}(\mathrm{U^T D^* V}) - \eta \mathbf{1}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{T}} \mathbf{E} \mathbf{1}_{\mathrm{n}} \tag{10}$$

$\eta > 0$，$U\mathbf{1}_c = \mathbf{1}_n$,$V^{\mathrm{T}}\mathbf{1}_n = \mathbf{1}_c$とする．$\eta$はファジィ度を指定するためのパラメータである．$f$の第2項はエントロピーを表すのでメンバシップ$U$と$V$について$f$を最大化する問題となる．$f$の最大解を求めるアルゴリズムはFCM法と同様の不動点反復法である．

3. クラスタリングと相関分析

ごみ焼却炉の相関分析への応用を目的として,行列$P = (c_{ij})$としてn個の個体とN個の変数との相互間の相関係数$c_{ij} \in [-1, 1]$が与えられているとする．

$$D^* = K\mathbf{1}_n\mathbf{1}_n^{\mathrm{T}} + PP^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

$D^* = (d_{ij}^*)$は$d_{ik}^* > 0$であり,相関係数の絶対値が大き

く符号が等しい変数が多くある個体間では大きく,逆に符号が逆の変数が多いと小さくなる.このような意味でD_{ij}は類似度を表している.式(11)の右辺第1項目のK=0.5は非負の類似度にするための定数である.表1は1号機と2号機の正準相関分析での第1固有値に対応する構造係数をPとして,提案のファジィリレーショナルクラスタリングを行った結果のメンバシップ値を示す.

表 1: メンバシップ値

	Cluster1	Cluster2
8月6日 (1号機)	0.43	0.57
9月6日 (1号機)	0.28	0.72
7月30日 (1号機)	0.58	0.42
8月27日 (1号機)	0.85	0.15
8月7日 (1号機)	0.89	0.11
9月3日 (1号機)	0.15	0.85
9月19日 (1号機)	0.68	0.32
9月2日 (1号機)	0.99	0.01
8月9日 (1号機)	0.72	0.28
7月31日 (1号機)	0.95	0.05
8月2日 (1号機)	0.99	0.01
9月3日(*) (2号機)	0.61	0.39
9月5日 (2号機)	0.52	0.48
8月27日(*) (2号機)	0.06	0.94
9月12日 (2号機)	0.13	0.87
9月13日 (2号機)	0.94	0.06

図1, 図2は各クラスターにファジィ対応分析をそれぞれ適用した結果である.一酸化炭素(CO)の発生量が比較的多い日(CO発生率5.6%以上)を▲,少ない日を●,変数を×で表している.1号機と2号機で同一の日には2号機の日に*を付けて表示している.$C1$や$C2$はそれぞれcluster1とcluster2に分類された▲の日であることを示している.図1では,9月2日,8月2日,9月13日が●の集団から離れている.グラフから,9月2日,9月13日が層内温度と2次空気量との相関が高く,コンベア供給速度と強い負の相関があることが明確である.図2より,8月27日,9月12日が●の集団から離れていて,8月27日(*)は2次空気量が,9月12日は層内温度との相関が特に高いことが明確に表されている.このように個体と変数を同じ平面にプロットすることで,相関関係が通常日と異なる日を分かりやすく表示して,CO発生要因発見の手がかりとできる.

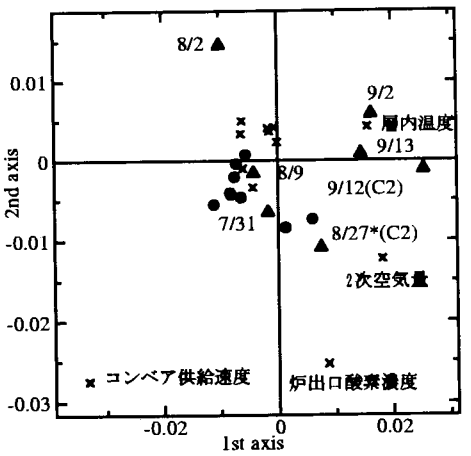


図 1: ファジィ対応分析 (Cluster1)

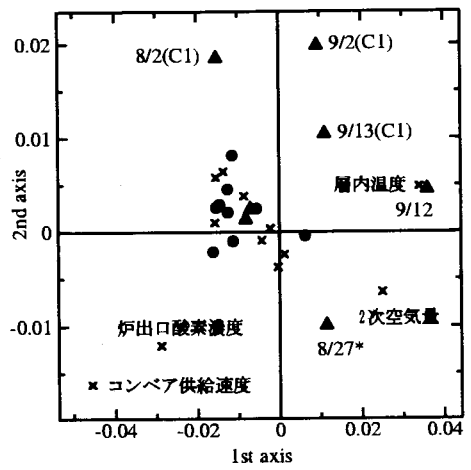


図 2: ファジィ対応分析 (Cluster2)

4. おわりに

ファジィクラスタリングを併用して,変数と個体を同一平面上にプロットする方法を提案した.数値例では,ごみ焼却炉燃焼制御の相関分析データに対して提案法を適用し,CO発生率の高い日をその要因とともに示すことができた.

参考文献

[1] 藤吉誠, 福島龍太郎, 桝屋道治: "ごみ焼却炉制御のインテリジェント化", 第18回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.25-28 (2002)

[問い合わせ先] 〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1
大阪府立大学 大学院工学研究科 電気・情報系専攻
経営工学分野　市橋秀友　TEL: 0722-54-9352
FAX: 0722-54-9915　email: ichi@ie.osakafu-u.ac.jp

K-L情報量正則化ファジィクラスタリングによる部分空間の抽出

Subspace learning using fuzzy clustering with regularization by K-L information

本多 克宏, 森 吉央, 市橋 秀友
Katsuhiro HONDA, Yoshio MORI, Hidetomo ICHIHASHI
大阪府立大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract : Fuzzy c-Means with regularization by K-L information (KFCM) is closely related to Gaussian Mixture Models and the constrained model of KFCM provides a modified linear fuzzy clustering algorithm. This paper applies fuzzy clustering with regularization by K-L information to subspace learning and discusses the effect of changing the number of parameters in the KFCM algorithm.

1. はじめに

データを球状のクラスターに分類するFuzzy c-Means (FCM) 法 [1] やその派生手法とガウス混合モデルとの類似性に着目して，EMアルゴリズムと良く似たアルゴリズムによりデータの分類が行われるファジィクラスタリング法としてK-L情報量正則化を用いるFCM (KFCM) 法 [2] が提案されている．一方，確率モデルに基づく混合主成分分析法 [3] を線形ファジィクラスタリングに拡張した手法 [4] が提案されている．この手法はKFCM法にパラメータ数の制約を加えることにより定義されているが，Fuzzy c-Varieties (FCV) 法 [1] と同様に局所的な部分構造を捉えることから，K-L情報量正則化を用いることでFCV法を適応的な形状調整機能を有する手法に拡張したモデルとみなされる．本研究では，多変量データからの部分空間の抽出法としてのKFCM法とKFCV法を比較し，数値実験を通してパラメータ数を変化させる効果を検証する．

2. K-L情報量正則化を用いたファジィクラスタリング

m 次元の観測値からなる n 個の標本データ $\boldsymbol{x}_i = (x_{i1}, \cdots, x_{im})^\top, i = 1, \cdots, n$ が与えられたとする．メンバシップのファジィ化のためにK-L情報量の項を導入し，ガウス分布における分散共分散行列の行列式の大きさを制限するための項を付加することにより，KFCM法 [2] の目的関数は，以下のように定義される．

$$L_{kfcm} = \sum_{c=1}^{C}\sum_{i=1}^{n} u_{ci} d_{ci} + \lambda \sum_{c=1}^{C}\sum_{i=1}^{n} u_{ci} \log \frac{u_{ci}}{\pi_c} + \sum_{c=1}^{C}\sum_{i=1}^{n} u_{ci} \log |\Sigma_c| \quad (1)$$

ただし，d_{ci} はマハラノビス距離であり，

$$d_{ci} = (\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{b}_c)^\top \Sigma_c^{-1} (\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{b}_c) \quad (2)$$

で表され，分散共分散行列 Σ_c も未知パラメータとして扱われる．また，π_c は第 c クラスターの容量を表す．(1) 式の最小化は，c に関して u_{ci} と π_c のそれぞれの和が1となる制約のもとで行われ，第 c クラスターにおいてすべての標本データのメンバシップ u_{ci} がクラスター容量 π_c に近づくようにすることで，メンバシップのファジィ化を行っている．したがって，K-L情報量正則化ではクラスター容量を考慮したメンバシップのファジィ化が行われており，係数 λ によりファジィ度を調整している．

一方，Tippingら [3] の確率的主成分分析法は潜在変量モデルに基づいた主成分分析法の拡張として定式化されているが，その混合分布モデルを考えた場合にはガウス混合モデルの分散共分散行列のパラメータ数に制約を加えたモデルと理解することができる．そこで，KFCM法の分散共分散行列のパラメータ数に制約を加えることにより，適応的な形状調整機能を有する線形ファジィクラスタリング法が提案されている [4]．(1) 式の目的関数において，$(m \times p)$ 行列 A_c を用いて，分散共分散行列を少ないパラメータからなる行列 $W_c = A_c A_c^\top + \sigma_c^2 I_m$ に置き換えることにより，パラメータ数に制約を加えたKFCM法の目的関数は，以下のように定義できる．

$$L_{kfcv} = \sum_{c=1}^{C}\sum_{i=1}^{n} u_{ci} d_{ci} + \lambda \sum_{c=1}^{C}\sum_{i=1}^{n} u_{ci} \log \frac{u_{ci}}{\pi_c} + \sum_{c=1}^{C}\sum_{i=1}^{n} u_{ci} \log |A_c A_c^\top + \sigma_c^2 I_m| \quad (3)$$

ただし，d_{ci} は以下の擬似的なマハラノビス距離である．

$$d_{ci} = (\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{b}_c)^\top (A_c A_c^\top + \sigma_c^2 I_m)^{-1} (\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{b}_c) \quad (4)$$

最適性の必要条件から，最適な A_c は以下のように求められる．

$$A_c = U_{pc}(\Delta_{pc} - \sigma_c^2 I_p)^{1/2} V \quad (5)$$

また，σ_c^2 も，

$$\sigma_c^2 = \frac{1}{m-p} \sum_{j=p+1}^{m} \delta_{cj} \quad (6)$$

となる．ただし，Δ_{pc} はメンバシップを考慮した重み付きの分散共分散行列 S_c の大きな p 個の固有値 $\delta_{c1}, \cdots, \delta_{cp}$ を対角要素に持つ $(p \times p)$ の対角行列を，U_{pc} は対応する p 本の固有ベクトルを並べた $(m \times p)$ 行列を，V は $(p \times p)$ の任意の直交行列を表す．また，$\delta_{c,p+1}, \cdots, \delta_{cm}$ は S_c の小さな $m-p$ 個の固有値を表す．このように，A_c のおのおのの列ベクトルは，FCV 法と同様に，プロトタイプとなる線形多様体を張るベクトルととらえられる．一方，σ_c^2 は線形多様体上では表すことができないデータの広がりの度合いを示しており，適応的にクラスター形状を変化させる機能を担っている．

ここで，(5) 式から，行列 W_c は，

$$\begin{aligned} W_c &= U_{pc}(\Delta_{pc} - \sigma_c^2 I_p) U_{pc}^\top + U_{mc}(\sigma_c^2 I_m) U_{mc}^\top \\ &= U_{mc} \Delta_{pc}^* U_{mc}^\top \end{aligned} \quad (7)$$

と表される．ただし，

$$\Delta_{pc}^* = \begin{bmatrix} \Delta_{pc} & O \\ O & \sigma_c^2 I_{m-p} \end{bmatrix} \quad (8)$$

とおいた．このように，W_c は分散共分散行列の固有値分解を p 個の固有値と σ_c^2 を用いて近似した行列となっている．また，$p = m-1$ のときは，W_c は分散共分散行列に等しく，KFCM 法に一致する．

3. 数値実験

UCI Machine Learning Repository で公開されている電離層データを用いて，KFCM 法のパラメータ数を減少させる効果を検証した．2 クラスのデータで構成されるこのデータ集合は，おのおの 34 個の観測値からなる 351 個の標本データを含むもので，34 個の観測値のうち，名義データを除いた 32 次元の数値データのみを使用した．5-fold cross-validation 法を用いて，トレーニングセットから推定されたファジィ分類関数によりチェッキングセットでのメンバシップを算出した際の目的関数値を調べた．(3) 式の目的関数値の標本データ 1 件あたりの平均値の変化を，図 1 に示す．ただし，なるべく局所解に陥ることを避けるために，文献 [2] と同様に繰り返しアルゴリズムにおいて λ を 8.0 から 2.0 に順次減少させるアニーリングを用いた．図 1 から，

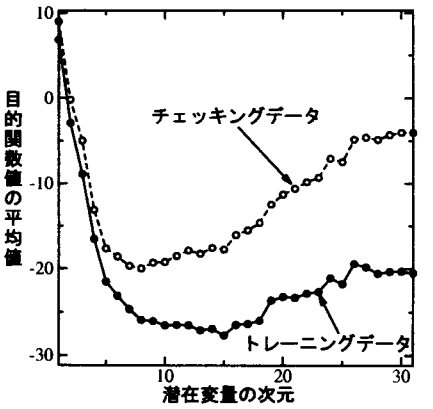


図 1: 潜在変量の次元の違いによる目的関数値の変化

本実験では潜在変量の次元を 8 としたときがチェッキングセットの目的関数値が最小となっており，次元を大きくするにしたがってトレーニングセットとの乖離が大きくなる傾向，すなわちトレーニングセットへの過学習が見られた．このようにファジィクラスタリングにおいても，標本データ数の少ない多次元データ集合を取り扱う際には，未知パラメータ数を適当に定めることでより適切にデータ集合の局所的な特徴を抽出できることが分かった．

4. おわりに

本論文では，KFCM 法とそのパラメータ数に制約を加えたモデルとの比較を通して，未知パラメータ数を減少させることでより適切なデータ分割モデルが得られることを議論した．ただし，どのように最適な未知パラメータ数を定めるかは今後の課題である．

参考文献

[1] J. C. Bezdek: *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum Press (1981)

[2] 宮岸 聖高, 市橋 秀友, 本多 克宏: K-L 情報量正則化 FCM クラスタリング法, 日本ファジィ学会誌, Vol. 13, No. 4, pp. 406-417 (2001)

[3] M. E. Tipping and C. M. Bishop: Mixtures of Probabilistic Principal Component Analysers, *Neural Computation*, Vol. 11, No. 2, pp. 443-482 (1999)

[4] 森 吉央, 本多 克宏, 神田 章弘, 市橋 秀友: K-L 情報量正則化を用いた線形ファジイクラスタリング法, 第 47 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 659-660 (2003)

連絡先

〒 599-8531 大阪府堺市学園町 1-1

大阪府立大学大学院工学研究科　　本多 克宏

TEL: 072-254-9355　FAX: 072-254-9915

E-mail: honda@ie.osakafu-u.ac.jp

不完全データのための局所的な数量化分析

Local quantification method of incomplete data

中村 芳仁，本多 克宏，市橋 秀友
Yoshihito NAKAMURA, Katsuhiro HONDA, Hidetomo ICHIHASHI
大阪府立大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract : This paper proposes a simultaneous application of homogeneity analysis and fuzzy clustering with incomplete data. Taking the similarity between the loss of homogeneity in homogeneity analysis and the least square criterion in principal component analysis into account, the new objective function is defined in a similar formulation to the linear fuzzy clustering with missing values. Numerical experiment shows the characteristic properties of the proposed method.

1. はじめに

アンケート調査の分析は，分野，業務を問わず様々な場面で行われており，被験者や項目に数量的得点を与えることによって，内在する構造を容易に把握することが目的となる．日本では林による数量化分析3類が有名であるが，独自の着想と理論に基づくオランダ学派の等質性分析，西里の双対尺度法なども，本質的には同等の解に至る点で同一の解析法と見なすことができる．

一方，多変量解析にファジィクラスタリングを融合することで，データベースの潜在的な特徴を抽出する研究がなされている．プロトタイプとなる線形多様体とデータ点との距離をクラスタリング基準とするFuzzy c-Varieties(FCV)法は，最小2乗基準にメンバシップを導入した目的関数の最小化問題ともとらえられることから，局所的な主成分分析法であるとみなされる [1]．そこで本研究では，等質性分析で用いられる非等質性基準と最小2乗基準との類似性 [2] に着目して，新たな局所的な数量化分析手法を提案する．数量化分析手法とファジィクラスタリングの融合手法としては，土屋 [3] の項目分類のための等質性分析や金海ら [4] のクラスタリングと数量化3類の同時分析法があるが，提案手法はFCV法との関連性に特色があり，線形ファジィクラスタリングと同様にデータ行列中の欠測値を処理する [1] ことができる．

2. 欠測値を含むデータに対する等質性分析とファジイクラスタリングの同時適用法

本論文では，1つの項目に対して数個の選択肢が用意されていて，被験者はその中から答えを1つ選択するという形式で収集された多肢選択データを扱う．なお，データ行列の各行は必ずしも被験者である必要はないので，これを個体と呼びかえることにする．今，個体数を n，項目数を m として各個体を $i(i=1,\cdots,n)$，各項目を $j(j=1,\cdots,m)$ と表し，各項目はそれぞれ K_j 個の選択肢 $k(k=1,\cdots,K_j)$ をもつものとする．今，ある項目 j に対して，ダミー変数 g_{ijk} 及び $(n\times K_j)$ データ行列 G_j を以下のように定める．

$$g_{ijk}=\begin{cases}1 & ; \text{ ある項目 } j \text{ について個体 } i \text{ が} \\ & \quad \text{選択肢 } k \text{ を選んだとき} \\ 0 & ; \text{ それ以外}\end{cases}$$

$$\boldsymbol{G}_j=\begin{pmatrix} g_{1j1} & \cdots & g_{1jk} & \cdots & g_{1jK_j} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{ij1} & \cdots & g_{ijk} & \cdots & g_{ijK_j} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{nj1} & \cdots & g_{njk} & \cdots & g_{njK_j} \end{pmatrix} (j=1,\cdots,m)$$

全項目の選択肢の総数を $K=\sum_{j=1}^{n}K_j$ で表し，一連の $\boldsymbol{G}_j(j=1,\cdots,m)$ を横に並べた $(n\times K)$ のデータ行列を $\boldsymbol{G}=[\boldsymbol{G}_1,\boldsymbol{G}_2,\cdots,\boldsymbol{G}_m]$ で表すものとする．

ここで，個体と項目の選択肢に割り当てる数量的得点を定義する．得点は P 次元とし，個体および選択肢に割り当てる得点をそれぞれ $(n\times P)$ の行列 $\boldsymbol{X}$，$(K_j\times P)$ の行列 $\boldsymbol{Y}_j$ にまとめ，次のように表す．

$$\boldsymbol{X}=\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1P} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nP} \end{pmatrix} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{Y}_j=\begin{pmatrix} y_{j11} & y_{j12} & \cdots & y_{j1P} \\ y_{j21} & y_{j22} & \cdots & y_{j2P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{jK_j1} & y_{jK_j2} & \cdots & y_{jK_jP} \end{pmatrix} \tag{2}$$

また，$\boldsymbol{X}$ 及び $\boldsymbol{Y}_j$ の各行をそれぞれ $\boldsymbol{x}_i = [x_{i1}, x_{12}, \cdots, x_{1P}]^\top$，$\boldsymbol{y}_{jk} = [y_{j11}, y_{j12}, \cdots, y_{j1P}]^\top$ で表す．

2.1 等質性分析

等質性分析は各個体の得点とその個体が反応した選択肢の得点は等質的な値をとるという原理に基づいて X 及び Y_j を推定する手法である．したがって，項目 j に関する個体 i の等質性の仮定からの逸脱度 d_{ij}^2 は

$$d_{ij}^2 = \|\boldsymbol{x}_i - \sum_{k=1}^{K_j} g_{ijk}\boldsymbol{y}_{jk}\|^2 \quad (3)$$

と表される．ここで $\|\cdot\|^2$ は，要素を 2 乗和する演算子でユークリッドノルムの 2 乗を表す．データ全体の仮定からの逸脱度は，さらに項目に関して平均をとり，個体を合計したもので，これを非等質性基準と呼び，σ と表す．

$$\sigma = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} d_{ij}^2$$

$$= \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\|\boldsymbol{X} - \boldsymbol{G}_j\boldsymbol{Y}_j\|^2 \quad (4)$$

ただし，ここでの $\|\cdot\|^2$ は，要素を 2 乗和する演算子でフロベニウスノルムの 2 乗を表す．(4) 式を最小にする $\boldsymbol{X}$，$\boldsymbol{Y}_j (j = 1, \cdots, m)$ が等質性分析の解となる．ここで，一意な解を得るため n 個体の得点について各次元の平均が 0，分散が 1，次元間の相関が 0，つまり

$$\mathbf{1}_n^\top \boldsymbol{X} = \mathbf{0}^\top \quad (5)$$

$$\boldsymbol{X}^\top\boldsymbol{X} = n\boldsymbol{I}_p \quad (6)$$

という正規化条件を導入する．ここで $\mathbf{1}_n$ は要素が全て 1 の n 次元ベクトル，$\mathbf{0}$ は零ベクトル，$\boldsymbol{I}_p$ は p 次の単位行列である．

2.2 等質性分析とファジイクラスタリングの同時適用法

等質性分析は，カテゴリー得点の行列の階数を 1 と制約すれば，主成分分析における最小 2 乗基準と類似性があることが知られている [2]．したがって，等質性分析は主成分分析の質的データへの拡張と位置づけることができる．一方，最小 2 乗基準を用いた主成分分析の目的関数にメンバシップを導入したものが，FCV 法の目的関数に帰着できるという研究がある [1]．FCV 法は主成分分析とファジイクラスタリングの同時適用法であり，局所的な主成分の抽出法であると見なされる．そこで本節では，最小 2 乗基準を用いた主成分分析の目的関数と非等質性基準の類似性に着目して，等質性分析にメンバシップを導入することでファジイクラスタリングとの同時適用法を提案する．(4) 式の非等質性基準は

$$\sigma = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\mathrm{tr}\{(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{G}_j\boldsymbol{Y}_j)^\top(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{G}_j\boldsymbol{Y}_j)\} \quad (7)$$

のように変形できることから，目的関数を (8) 式のように定義する．

$$\tilde{\sigma} = \frac{1}{m}\sum_{c=1}^{C}\sum_{j=1}^{m}\mathrm{tr}\{(\boldsymbol{X}_c - \boldsymbol{G}_j\boldsymbol{Y}_{cj})^\top\boldsymbol{U}_c \times(\boldsymbol{X}_c - \boldsymbol{G}_j\boldsymbol{Y}_{cj})\} + \lambda\sum_{c=1}^{C}\sum_{i=1}^{n} u_{ci}\log u_{ci} \quad (8)$$

ただし，U_c は $u_{ci} (i = 1, \cdots, n)$ を対角要素に持つ $(n \times n)$ の対角行列 $U_c = \mathrm{diag}(u_{c1}, \cdots, u_{cn})$ であり，(8) 式は個体にメンバシップを付加して，個体を C 個のクラスターに分けることで局所的な数量化を行うことを目的としている (数量的得点もそれぞれ C 個得られることに注意されたい)．また，メンバシップのファジイ化のためにエントロピー正則化を考慮して最終項を付加している．

2.1 節と同様に，一意な解を得るため n 個体の得点について，次の正規化条件を導入する．

$$\boldsymbol{u}_c^\top\boldsymbol{X}_c = \mathbf{0}^\top \quad (9)$$

$$\boldsymbol{X}_c^\top U_c\boldsymbol{X}_c = (\sum_{i=1}^{n} u_{ci})\boldsymbol{I}_p \quad (10)$$

2.3 欠測値の処理

実際の調査においては，しばしばデータの欠損があり，その処理法が問題となる．データの欠損が無作為に生起するのであれば，欠測値を無視して応答者が積極的に与えてくれた反応のみで解析を行う方法が最も納得のいく方法である．これはクラスタリング手法においても同様で，欠測値のみを無視することにより，妥当な結果が得られることが知られている．

そこで本論文では，不完全なデータ行列から，欠測値のみを無視しながら局所的に数量的得点を割り当てることを考える．2.2 節で定義した目的関数に，$\sum_{k=1}^{K_j} g_{ijk}$ を対角要素にもつ $(n \times n)$ の対角行列 $\boldsymbol{M}_j = \mathrm{diag}(\sum_{k=1}^{K_j} g_{1jk}, \cdots, \sum_{k=1}^{K_j} g_{njk})$ を導入し，非等質性基準を以下のように変更する．

$$\tilde{\sigma} = \frac{1}{m}\sum_{c=1}^{C}\sum_{j=1}^{m}\mathrm{tr}\{(\boldsymbol{X}_c - \boldsymbol{G}_j\boldsymbol{Y}_{cj})^\top\boldsymbol{U}_c\boldsymbol{M}_j \times(\boldsymbol{X}_c - \boldsymbol{G}_j\boldsymbol{Y}_{cj})\} + \lambda\sum_{c=1}^{C}\sum_{i=1}^{n} u_{ci}\log u_{ci} \quad (11)$$

ここで，$\sum_{k=1}^{K_j} g_{ijk}$ は個体 i の項目 j が観測されていれば 1，欠測していれば 0 をもつことから，(11) 式では，欠測値を無視しながら観測値に対応する逸脱度の

表 1: アンケートの回収結果

responder	interests			tastes for pasta			liking for car	
	appreciation of musics	watching movies	spectator sports	Chinese noodle	spaghetti	Japanese noodle	recreation vehicle	sports car
1	0	0	1	0	0	1	1	0
2	1	0	0	1	0	0	1	0
3	0	1	0	0	1	0	0	1
4	1	0	0	1	0	0	0	1
5	0	0	1	0	1	0	1	0
6	0	0	0	0	0	1	1	0
7	0	0	1	1	0	0	1	0

み最小化がはかられる.

また, 正規化条件は $\boldsymbol{M}_* = \sum_{j=1}^{m} \boldsymbol{M}_j$ とすると次のようになる.

$$\boldsymbol{u}_c^\top \boldsymbol{M}_* \boldsymbol{X}_c = \boldsymbol{0}^\top \tag{12}$$

$$\boldsymbol{X}_c^\top \boldsymbol{U}_c \boldsymbol{M}_* \boldsymbol{X}_c = m(\sum_{i=1}^{n} u_{ci}) \boldsymbol{I}_p \tag{13}$$

2.4 解法とアルゴリズム

条件 (12), (13) の元で非等質性基準 (11) を最小にする $\boldsymbol{X}_c$, $\boldsymbol{Y}_{cj}(c = 1, \cdots, C, j = 1, \cdots, m)$ が等質性分析の解である. 方程式 $\partial\tilde{\sigma}/\partial\boldsymbol{Y}_{cj} = 0$ を解くと, $\boldsymbol{Y}_{cj}$ の解は

$$\hat{\boldsymbol{Y}}_{cj} = \boldsymbol{D}_{cj}^{-1} \boldsymbol{G}_j^\top \boldsymbol{U}_c^\top \boldsymbol{X}_c \tag{14}$$

となる. ただし, $\boldsymbol{D}_{cj} = \boldsymbol{G}_j^\top \boldsymbol{U}_c \boldsymbol{G}_j$ である. また, $\partial\tilde{\sigma}/\partial \boldsymbol{X}_c = 0$ を解くと, $\boldsymbol{X}_c$ の解は

$$\hat{\boldsymbol{X}}_c = \boldsymbol{M}_*^{-1} \sum_{j=1}^{m} \boldsymbol{G}_j \boldsymbol{Y}_{cj} \tag{15}$$

となる. 最後に $\partial\tilde{\sigma}/\partial u_{ci} = 0$ を解くと

$$\hat{u}_{ci} = \exp(B_{ci} - 1) \tag{16}$$

$$B_{ci} = \frac{-1}{\lambda m} \sum_{j=1}^{m} \sum_{p=1}^{P} \sum_{k=1}^{K_j} g_{ijk} (x_{cip} - y_{cjkp})^2 \tag{17}$$

となる. ここでメンバシップの制約として確率的制約 $\sum_{c=1}^{C} u_{ci} = 1$ を用いると

$$\hat{u}_{ci} = \frac{\exp(B_{ci})}{\sum_{l=1}^{C} \exp(B_{lj})} \tag{18}$$

となる. 以下にアルゴリズムを記述する.

Step1 $\boldsymbol{X}_c$ の初期値を, 乱数により発生させ, (12) 式, (13) 式を満たすように正規化する.

Step2 (14) 式から $\boldsymbol{Y}_{cj}$ を求める.

Step3 (15) 式から $\boldsymbol{X}_c$ を求める.

Step4 (12) 式, (13) 式を満たすように $\boldsymbol{X}_c$ を正規化する.

Step5 (18) 式よりメンバシップ u_{ci} を求める.

Step6 収束判定条件

$$\max_{c,i} |u_{ci} - u_{ci}^{\mathrm{OLD}}| < \epsilon \tag{19}$$

を満たせば終了. その他は Step2 へ戻る.

3. 数値例

7 人の若者に行った趣味・嗜好に関するアンケート調査の結果 [4] を用いて, 提案法の有効性を検証する実験を行った. ただし, 文献 [4] では完全データを取り扱ったが, ここではそこから 1 箇所を欠測値とした表 1 のデータを用いた.

まず, 等質性分析を実行したときに得られた散布図を図 1 に示す (この結果は, 提案法でクラスター数を 1 としたものに等しい). 図 1 から, スポーツ観戦とうどん, 音楽鑑賞とラーメン, 映画鑑賞とスパゲッティの大まかに 3 つのグループに分類されている.

次に, 提案法でクラスター数を 2 として分析を行った. 各々の個体に割り当てられたメンバシップを表 2 に, クラスターごとに得られた散布図を図 2, 図 3 に示す. 最も反応の少なかった映画鑑賞という選択肢を大きくはずすことで, 局所的な特徴をとらえた散布図が得られている. 一方, クラスター 2 では映画鑑賞を選択していた若者 3 を映画鑑賞と同じ位置に配置することにより, クラスター 1 とは違った角度からとらえた散布図を表現している. このように, 適当にデータを分割することで, クラスターごとに簡潔な散布図を作成することができた.

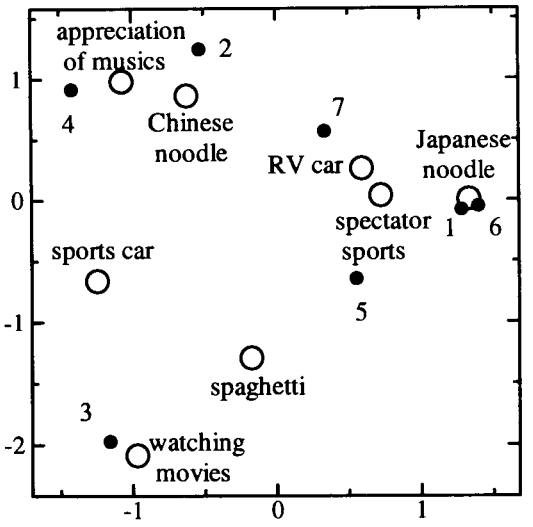


図 1: 等質性分析により得られた散布図

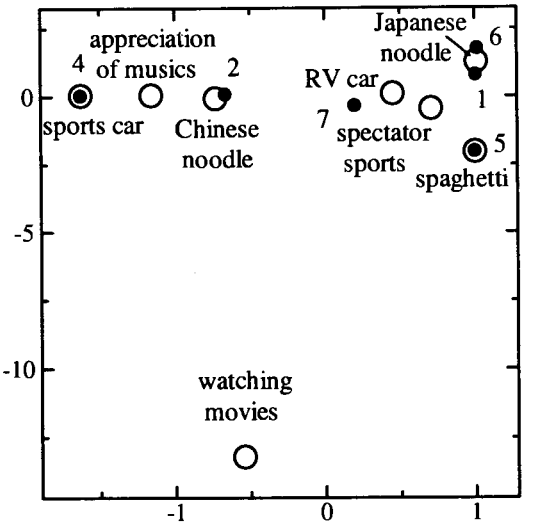


図 2: 提案法により得られた散布図 (c=1)

表 2: 個体のメンバシップ値

responder	c=1	c=2
1	0.4691	0.5309
2	0.5410	0.4590
3	0.0000	1.0000
4	0.5636	0.4364
5	0.4000	0.6000
6	0.4526	0.5474
7	0.5083	0.4917

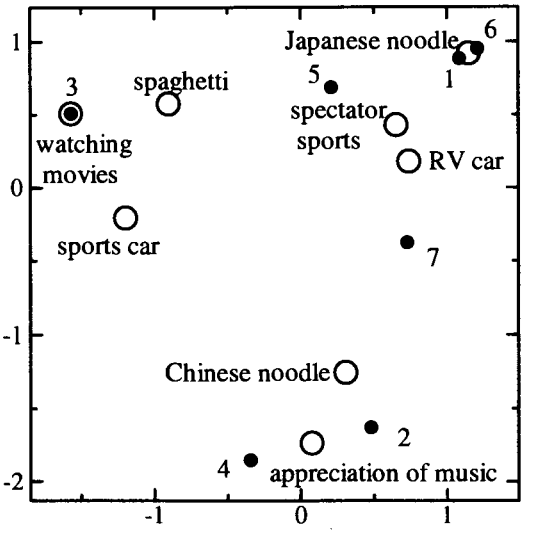


図 3: 提案法により得られた散布図 (c=2)

4. おわりに

個体をいくつかのクラスターに分類しながら等質性分析を行うことによって，局所的な特徴を明らかにする分析法を提案した．本論文では，欠測値の処理を考慮し，計算の難しい固有値分解を使わないアルゴリズムを用いることで不完全な実データへの拡張を試みた．項目間の一次元性や尺度の違いに対応すること，数量化分析 3 類，双対尺度法などとの関連について考慮し，更なる拡張を試みることが今後の課題である．

参考文献

[1] 本多克宏, 杉浦伸和, 市橋秀友, 荒木昭一, 九津見洋 : “最小 2 乗基準を用いた Fuzzy c-Varieties(FCV) 法における欠測値の処理法”, 日本ファジィ学会論文誌, Vol.13, No.6, pp.680-688, (2001)

[2] 足立浩平 : “多変量カテゴリカルデータの数量化と主成分分析”, 心理学評論, Vol.43, No.41, pp.487-500, (2000)

[3] 土屋隆裕 : “項目分類のための数量化法”, 行動計量学, 第 22 巻第 2 号 (通巻 43 号), pp.95-109, (1995)

[4] 金海好彦, 山川あす香, 市橋秀友, 三好哲也 : “ファジィ・クラスタリングと数量化 3 類の同時分析法”, システム制御情報学会論文誌, Vol.12, No.3, pp.47-54, (1999)

連絡先　〒 599-8531 大阪府堺市学園町 1-1
大阪府立大学大学院工学研究科
電気・情報系専攻経営工学分野
本多 克宏
TEL: 072-254-9355　FAX: 072-254-9915
E-mail: honda@ie.osakafu-u.ac.jp

ファジィクラスタリングとハードクラスタリングの比較

Comparison of Fuzzy and Hard Clustering Algorithms

安河内 武志 Takeshi Yasukochi
筑波大学 システム情報工学研究科 University of Tsukuba

中山 洋一 Yoichi Nakayama
日本電気 (株) NEC

宮本 定明 Sadaaki Miyamoto
筑波大学 機能工学系 University of Tsukuba

Abstract: This paper aims at comparison of fuzzy and hard c-means clustering methods. Fuzzy method has many variations including additional variables while crisp method does not. Some new variations of crisp methods are therefore proposed and efficient algorithms of c-means and c-regressions are studied. Clustering results of c-means and c-regressions are compared.

1 はじめに

クラスタリングにはファジィ理論 [1] を用いたファジィクラスタリングと、ファジィ理論を用いない標準的なクラスタリングであるハードクラスタリング (クリスプクラスタリング) がある。ハードクラスタリングでは、各個体はあるクラスタに帰属するかしないか、の 2 値変数で表されるのに対し、ファジィクラスタリングはその帰属度にあいまいさを持たせたものである。

クラスタリングの技法には c-平均法 [2, 3] や、c-回帰法 [4] などがある。それらの技法はファジィ技法については様々なヴァリエーションが研究されてきた [5]。ところが、ハード技法についてはあまり研究されていない。そこで、本研究ではハード技法のいくつかの拡張と逐次アルゴリズムを提案し、対応するファジィ技法との比較検討を行う。

2 エントロピー正則化法

正則化とは、もとの問題が特異なときに、それを何らかの方法で正則にして近似解を求める考え方である。そして、エントロピー関数による正則化を利用したものがエントロピー正則化によるファジィc-平均法 [5] である。

正則化のための関数をエントロピーとするので、目的関数は

$$J = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ik}\|x_k - v_i\|^2 + \lambda^{-1}\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ik}\log u_{ik} \quad (1)$$

となる。ここで λ は正のパラメータである。また、アルゴリズムは以下のようになる。

FCM1. 初期値を適当に設定する。
FCM2. U を固定して目的関数 J を最小にする最適な V を求める。
FCM3. V を固定して目的関数 J を最小にする最適な U を求める。
FCM4. 解 (U, V) が収束すれば終了。そうでなければ FCM2 へ。

3 KL 情報量 c-平均法

市橋らはエントロピー正則化に KL 情報量を導入 [6] し、次の目的関数を提案している。

$$J = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ik}D_{ik} + \lambda^{-1}\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ik}\log\frac{u_{ik}}{\alpha_i} + \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ik}\log|S_i| \quad (2)$$

ただし、非類似度として以下の式を用いる。

$$D_{ik} = (x_k - v_i)^T S_i^{-1}(x_k - v_i) \quad (3)$$

分散と α を付加したアルゴリズムは U、V、α_i、S_i に関する相互最適化によるが、ここでは省略する。

3.1 非ファジィ化によるクリスプ技法

式 (2) の $\log u_{ik}$ 項を外すことによって、目的関数が u_{ik} に関して線形となり、非ファジィ化される。

$$J = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ik}D_{ik} - \lambda^{-1}\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ik}\log\alpha_i + \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ik}\log|S_i| \quad (4)$$

4 ファジィc-回帰法

ファジィc-回帰（fuzzy c-regression）とは回帰とファジィ分類を同時に行う方法である。いま、データとして $(x_1, y_1), \cdots, (x_n, y_n)$ が与えられていると仮定する。また、$x_k \in R^p$ は説明変数、$y_k \in R$ は目的関数であるとする。そこで、c 個の回帰式

$$y = f_i(x; \beta_i) + e_i,\ i = 1, \cdots, c$$

を考える。$f_i(x; \beta_i)$ として様々な関数をとることが可能であるが、もっとも単純なものは線形の回帰式

$$f_i(x) = \sum_{j=1}^{p} \beta_i^j x^j + \beta_i^{p+1}$$

である。通常の回帰式を求める場合、$c = 1$ であり、

$$\sum_{k=1}^{n} (y_k - f_i(x_k; \beta_i))^2$$

が最小になるように β_i を決定する。ファジィc-回帰では、ファジィ分類を行うと同時に回帰式を求めるので、目的関数は、

$$J_{fcr}(U, \beta) = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ik} D_{ik}(\beta_i) + \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ik} \log u_{ik}$$

と表される。ただし、

$$D_{ik}(\beta_i) = (y_k - f_i(x_k; \beta_i))^2$$

とする。

回帰法についても KL 情報量を導入した以下のような目的関数が考えられる。

$$J = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ik} D_{ik} - \lambda^{-1} \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ik} \log \alpha_i + \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} u_{ik} \log \sigma_i^2 \qquad (5)$$

5 逐次アルゴリズム

5.1 ハード c-平均法の逐次型アルゴリズム

ハードである場合、交互最適化ではなく、個体ごとに所属を更新していく逐次アルゴリズムを考えることができる。ハード c-平均法の逐次型アルゴリズムは次のようになる。

HCM'1. 初期値を適当に設定する。

HCM'2. すべての個体 x_k について次の操作を繰り返す。

HCM'2-1. x_k をもっとも近いクラスタに割り当てる。

HCM'2-2. x_k の所属が移動した場合、クラスタ中心を更新する。

HCM'3. 目的関数が収束すれば終了。そうでなければ HCM'2 へ。

クラスタ中心を更新する場合の式は次のようになる。ここで、個体 x_k が G_q から G_r へ移動したとし、N_q、N_r をそれぞれ G_q、G_r の総個体数とする。また、更新後の変数には肩に' をつける。

$$v_q' = \frac{N_q}{N_q - 1} v_q + \frac{x_k}{N_q - 1} \qquad (6)$$

$$v_r' = \frac{N_r}{N_r + 1} v_r + \frac{x_k}{N_r + 1} \qquad (7)$$

5.2 ハード c-回帰法の逐次型アルゴリズム

ハード c-回帰法に関しても逐次型アルゴリズムを考えることができる。クラスタ中心を求める式は次のようになる。個体 (x_k, y_k) が G_q から G_r へ移動したとし、変化後を β' とすると

$$\beta_r' = \left(\sum_{z \in G_r} z z^T + z_k z_k^T \right)^{-1} \left(\sum_{y,z \in G_r} yz + y_k z_k \right) \qquad (8)$$

ここで、$B_r = \sum_{z \in G_r} z z^T$、$A_{rk} = B_r + z_k z_k^T$ とおくと、

$$A_{rk}^{-1} = B_r^{-1} - B_r^{-1} z_k (1 + z_k^T B_r^{-1} z_k)^{-1} z_k^T B_r^{-1}$$

であるので、これを (8) に代入し、変形すると、

$$\beta_r' = (I - s^{-1} B_r^{-1} z_k z_k^T)(\beta_r + y_k B_r^{-1} z_k) \qquad (9)$$

となる。ただし、$s = 1 + z_k^T B_r^{-1} z_k$、また、$I$ は単位行列である。同様にして、

$$\beta_q' = (I + s^{-1} B_q^{-1} z_k z_k^T)(\beta_q - y_k B_q^{-1} z_k) \qquad (10)$$

となる。ただし、$B_q = \sum_{z \in G_q} z z^T$、$s = 1 - z_k^T B_q^{-1} z_k$、また、$I$ は単位行列である。

β 更新後に B_r、B_q の更新も行う。

$$B_r' = B_r + z_k z_k^T$$

$$B_q' = B_q - z_k z_k^T$$

$$B_r'^{-1} = B_r^{-1} - \frac{1}{1 + z_k^T B_r^{-1} z_k} B_r^{-1} z_k z_k^T B_r^{-1}$$

$$B_q'^{-1} = B_q^{-1} + \frac{1}{1 - z_k^T B_q^{-1} z_k} B_q^{-1} z_k z_k^T B_q^{-1}$$

5.3 クラスターサイズ調整変数と分散

先に述べた逐次型アルゴリズムにサイズ調整変数と分散を付加する。c-平均法、c-回帰法の目的関数はそれぞれ式(4)、式(5)と等しい。

また、サイズ調整変数の更新は次のようになる。

$$\alpha_q' = \alpha_q - \frac{1}{n} \quad , \quad \alpha_r' = \alpha_r + \frac{1}{n}$$

c-平均法については、分散の更新も簡単化することができる。個体 x_k が G_q から G_r へ移動するとする。$B_r = \sum_{G_r} xx^T$ とおくと、

$$S_r = \frac{B_r}{N_r} - v_r v_r^T \tag{11}$$

と表すことができることから、移動後の S_r' は、

$$S_r' = \frac{B_r'}{N_r + 1} - v_r' v_r'^T \tag{12}$$

となる。また、

$$\begin{aligned} S_r'^{-1} &= (\frac{B_r}{N_r} - v_r v_r^T)^{-1} \\ &= N_r B_r^{-1} + \frac{N_r^2}{1 - N_r v_r^T B_r^{-1} v_r} B_r^{-1} v_r v_r^T B_r^{-1} \end{aligned}$$

であるので、

$$\begin{aligned} B_r'^{-1} &= (B_r + x_k x_k^T)^{-1} \\ &= B_r^{-1} - \frac{1}{x_k^T B_r^{-1} x_k + 1} B_r^{-1} x_k x_k^T B_r^{-1} \end{aligned}$$

を使うことにより、$S_r'^{-1}$ を求める。

c-回帰法の分散の更新は求めた β' より計算できる。

6 数値例

この節では、数値例を示すために人工サンプルデータに各アルゴリズムを適用してクラスタリングを行う。なお、クラスタリングを行う際は初期値としてランダムな分割を与えている。以下KL情報量を導入したハード c-平均アルゴリズムは K-HCM、ハード c-回帰アルゴリズムは、K-HCR と書く。また、逐次アルゴリズムについては右肩に' をつける。

図1、図2は直線状の集団のわきに円状の集団があるデータである。直線の個体数は約120で、円状の個体数は約40である。このデータに c-平均法によるアルゴリズムを適用した。

KL情報量を導入したアルゴリズムではファジィ、ハードの両技法についてこのクラスタリングに成功した。逐次計算アルゴリズムと相互最適化アルゴリズムにおいてはクラスタリング結果に大きな違いは見られなかった。

図3、図4は、アジア各国の1975年から1992年までの GDP とエネルギー消費量の関係を示したデータである(以下 GDP データ)。図は横軸が実質 GDP(百億$)、縦軸が総一次エネルギー消費量(千万トン)を表している。

図3は、GDP データに HCR' を適用した結果である。図の直線は回帰直線で、クラスター数 $c = 2$ としている。クラスター数 $c = 2$ とした場合はすべての c-回帰法アルゴリズムでこのような結果が得られた。

次に GDP データの2つのクラスの中間辺りの個体に着目し、3つのクラスに割り当てることを試みた。図4は K-FCR($\lambda = 11$)の時得られた結果を示している。

7 おわりに

本稿では、ハードクラスタリングとファジィクラスタリングの比較検討のため、まずハードクラスタリングの拡張を提案した。また、逐次アルゴリズムを提案することで相互最適化との比較も行った。

メンバーシップ値を含んだ帰属度を [0,1] の値でとるファジィクラスタリングはより詳細な分析が可能であるといえる。しかしながら、ファジィ技法は一般にハード技法に比べより多くの計算時間を必要とするという欠点がある。

以上から、ハードクラスタリングは計算の速さを生かして前処理に、そして詳しい分析にはファジィクラスタリングを用いることで、データ分析を効率よくかつ効果的に行うことができるものと思われる。

参考文献

[1] L.A.Zadeh, Fuzzy sets, *Information and Control*, Vol.8, pp.338-353, 1965.

[2] J.C.Bezdek, *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum, New York, 1981.

[3] F.Höppner, F.Klawonn, R.Kruse, T.Runkler, *Fuzzy Cluster Analysis*, Wiley, Chichester, 1999.

[4] R.J.Hathaway, J.C.Bezdek, Switching regression models and fuzzy clustering, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol.1, No.3, pp.195-204, 1993.

[5] 宮本定明, クラスター分析入門:ファジィクラスタリングの理論と応用, 森北出版, 東京, 1999.

[6] 宮岸聖高, 市橋秀友, 本多克宏, K-L 情報量正則化 FCM クラスタリング法, 日本ファジィ学会誌, vol.13, No.4, pp.406-417, 2001.

連絡先
〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学 機能工学系 宮本研究室
安河内　武志
E-mail: yasko@odin.esys.tsukuba.ac.jp
Tel: 029-853-6553
Fax: 029-853-5207

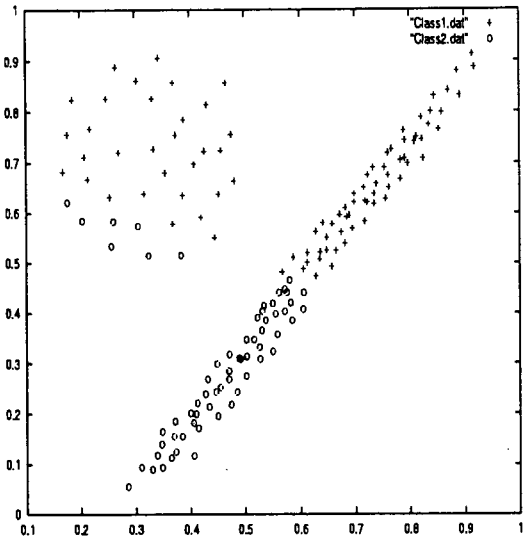


図 1: 人工データに対する HCM' の適用結果

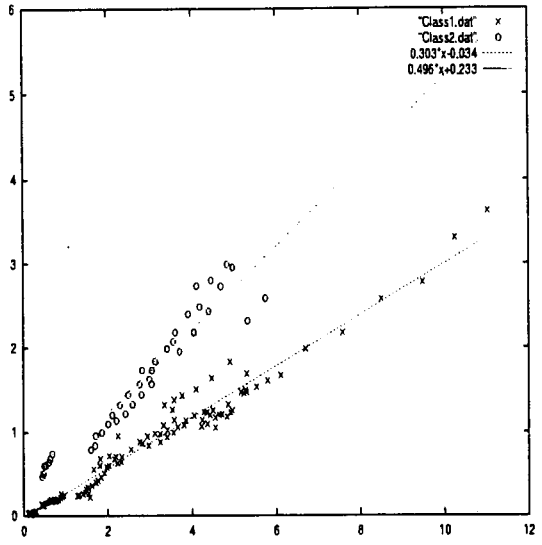


図 3: GDP データに対する HCR' の適用結果 ($c = 2$)

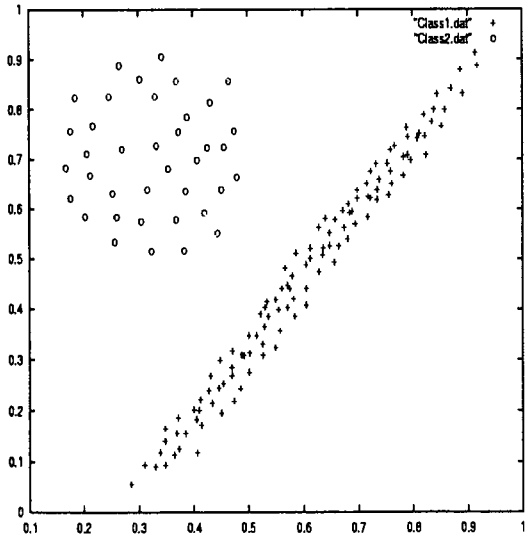


図 2: 人工データに対する K-HCM' の適用結果 ($\lambda = 80$)

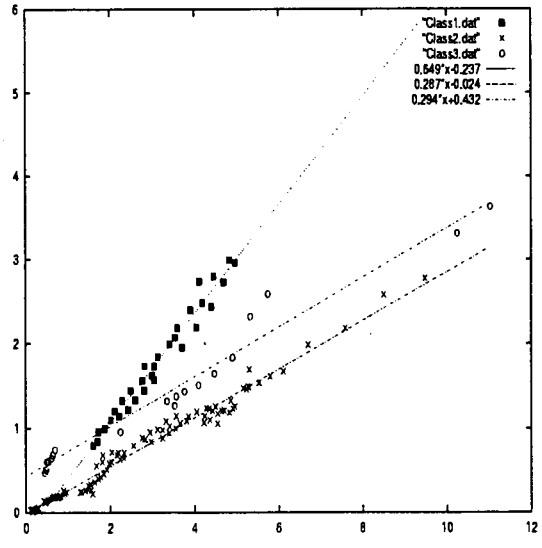


図 4: GDP データに対する K-FCR の適用結果 ($c = 3, \lambda = 11$)

ファジィクラスタリングと統計力学
Statistical mechanical representation of fuzzy clustering

安田 真 Makoto Yasuda 岐阜工業高等専門学校 Gifu National College of Technology
古橋 武 Takeshi Furuhashi 三重大学 Mie University
大熊 繁 Shigeru Okuma 名古屋大学 Nagoya University

Abstract- **In this paper, by calculating the partition function and the free energy, we represent the fuzzy clustering (fuzzy c-means) method form the statistical mechanical points of view, that is, the Boltzmann, Fermi-Dirac and Bose-like non-probabilistic distributions.**

1 はじめに

データのクラスターへの帰属度の評価尺度として (Shannon) エントロピーを導入したファジィ c 平均法 (FCM 法) は古典統計 (Boltzmann 分布) になる [1]. また，ファジィエントロピーを導入した FCM 法は本質的に量子統計 (Fermi- Dirac 分布) に一致する [2]. 本論文では，確率的でない場合も含めて，統計力学とファジィクラスタリングの関係について，これまで得られた知見をまとめる.

2 Boltzmann 分布

p 次元の実空間 $\boldsymbol{R}^p$ のデータ集合 $X=\{\boldsymbol{x}_1,\cdots,\boldsymbol{x}_n\}$ $(\boldsymbol{x}_k=(x_k^1,\cdots,x_k^p))$ を c 個のクラスターに分類する. $V=\{\boldsymbol{v}_1,\cdots,\boldsymbol{v}_c\}(\boldsymbol{v}_i=(v_i^1,\cdots,v_i^p))$ をクラスター中心，$u_{ik}\in[0,1](i=1,\cdots,c;k=1,\cdots,n)$ を帰属度関数とする.

FCM 法において，クラスタリングの目的関数を

$$J=\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c}d_{ik}u_{ik}\ (d_{ik}=\|\boldsymbol{x}_k-\boldsymbol{v}_i\|^2) \tag{1}$$

とし，確率的正規化の制約

$$\sum_{i=1}^{c}u_{ik}=1\ \ \forall k \tag{2}$$

のもとでエントロピー

$$S_{SE}=-\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c}u_{ik}\log u_{ik} \tag{3}$$

を導入する．λ，η_k を未定乗数とする Lagrange 関数は

$$L_{SE}=J-\lambda S_{SE}-\sum_{k=1}^{n}\eta_k\left(\sum_{i=1}^{c}u_{ik}-1\right) \tag{4}$$

となり，$\partial L_{SE}/\partial u_{ik}=0$ は

$$u_{ik}=\frac{\mathrm{e}^{-\beta d_{ik}}}{\sum_{j=1}^{c}\mathrm{e}^{-\beta d_{jk}}}\ \ (\beta=-\frac{1}{\lambda}) \tag{5}$$

を与える [1]. (5) 式で $\beta^{-1}\propto T$(系の温度) とすれば，これは統計力学における Boltzmann(Gibbs) 分布に一致する. (5) 式に対応するファジィクラスタリングの分配関数は

$$Z=\prod_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c}\mathrm{e}^{-\beta d_{ik}} \tag{6}$$

となり，Helmholtz の自由エネルギー $F=-(1/\beta)\log Z$ は

$$F=-\frac{1}{\beta}\sum_{k=1}^{n}\log\left(\sum_{i=1}^{c}\mathrm{e}^{-\beta d_{ik}}\right) \tag{7}$$

と計算される.

3 Fermi-Dirac 分布

(4) 式で，エントロピーをファジィエントロピー

$$S_{FE}=-\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c}\{u_{ik}\log u_{ik}+(1-u_{ik})\log(1-u_{ik})\} \tag{8}$$

に置き換えたものを L_{FE} とすると，$\partial L_{FE}/\partial u_{ik}=0$ は

$$u_{ik}=\frac{1}{\mathrm{e}^{\alpha_k+\beta d_{ik}}+1}\ \ (\beta=-\frac{1}{\lambda},\alpha_k=\frac{\eta_k}{\lambda}) \tag{9}$$

という統計力学では Fermi-Dirac 分布として知られる分布を与える.

そこで，次に，Fermi-Dirac 統計に従う粒子系の分配関数を考える. 独立粒子の集合で，エネルギー準位を ϵ_l，各準位の粒子数を n_l とすると，全エネルギー $\sum_l\epsilon_l n_l$，全粒子数 $\sum_l n_l$ が一定という制約下で，分配関数は

$$Z=\sum_{\sum_l\epsilon_l n_l=E,\sum_l n_l=N}\mathrm{e}^{-\beta\sum_l\epsilon_l n_l} \tag{10}$$

と書かれる．ここで，粒子数 n_l を可変として結果的に総粒子数が N となるように新たなパラメータ α で調節する方法をとると，この新たな分配関数 (大分配関数) は

$$\Xi=\sum_{N=0}^{\infty}(\mathrm{e}^{-\alpha})^N Z_N=\prod_{l}\sum_{n_l=0}^{\infty}(\mathrm{e}^{-\alpha-\beta\epsilon_l})^{n_l} \tag{11}$$

から

$$\Xi = \prod_l (1 + \mathrm{e}^{-\alpha-\beta\epsilon_l}) \tag{12}$$

と計算される．自由エネルギーは

$$\begin{aligned} F &= -k_B T \left(\log\Xi - \alpha \frac{\partial}{\partial\alpha} \log\Xi \right) \\ &= -\frac{1}{\beta} \left\{ \sum_l \log(1 + \mathrm{e}^{-\alpha-\beta\epsilon_l}) + \alpha N \right\} \end{aligned} \tag{13}$$

である．

以上の結果をファジィクラスタリングに当てはめれば，ファジィクラスタリングの大分配関数と自由エネルギーは，それぞれ，

$$\Xi = \prod_{k=1}^{n} \prod_{i=1}^{c} (1 + \mathrm{e}^{-\alpha_k-\beta d_{ik}}) \tag{14}$$

$$F = -\frac{1}{\beta} \sum_{k=1}^{n} \left\{ \sum_{i=1}^{c} \log(1 + \mathrm{e}^{-\alpha_k-\beta d_{ik}}) + \alpha_k \right\} \tag{15}$$

となる [2].

4 Bose-like 分布

2，3章で見たように，ファジィクラスタリングに現れる分布関数には統計力学的に対応する分布関数がある．前章で導入したパラメータ α と α_k は，統計力学では $\sum_l n_l = N$ という粒子数一定の制約，ファジィクラスタリングでは (2) 式を満たすように定められる．したがって，確率的な正規化の制約に総粒子数一定の制約を対応させて考えることが可能であり，(2) 式の制約を課したファジィクラスタリングは統計力学の範疇にある，あるいは，(2) 式がファジィクラスタリングを統計力学に一致させているとも言える．

そこで，本章では (2) 式の制約を課さないファジィクラスタリングについて検討する．統計力学の側から考えれば，これは総粒子数が不定の系に相当し，物理的には (光子として) 常に粒子の出入りがある状態を表すと考えられる．このとき，(10) 式は

$$\begin{aligned} Z &= \sum_{\sum_l \epsilon_l n_l = E} \mathrm{e}^{-\beta \sum_l \epsilon_l n_l} \\ &= \prod_l \frac{1}{1 - \mathrm{e}^{-\beta\epsilon_l}} \end{aligned} \tag{16}$$

となるため，F として

$$F = -k_B T \log Z = \frac{1}{\beta} \sum_l \log(1 - \mathrm{e}^{-\beta\epsilon_l}) \tag{17}$$

を得る．また，平均粒子数は

$$\langle n_l \rangle = \frac{1}{\mathrm{e}^{\beta\epsilon_l} - 1} \tag{18}$$

となる．この分布は，式の上では粒子数不定の場合の Bose 統計とみなすことができる．

以上の結果をファジィクラスタリングの言葉に置き換えると，制約 (2) を除いたファジィクラスタリングの分配関数は，

$$Z = \prod_{k=1}^{n} \prod_{i=1}^{c} \frac{1}{1 - \mathrm{e}^{-\beta d_{ik}}} \tag{19}$$

となり，これから，自由エネルギーは

$$F = \frac{1}{\beta} \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{c} \log(1 - \mathrm{e}^{-\beta d_{ik}}) \tag{20}$$

，帰属度関数は

$$u_{ik} = \frac{1}{\mathrm{e}^{\beta d_{ik}} - 1} \tag{21}$$

と計算される．クラスター中心 $\boldsymbol{v}_i$ は，$\partial F / \partial \boldsymbol{v}_i = 0$ から

$$\boldsymbol{v}_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} \boldsymbol{x}_k u_{ik}}{\sum_{k=1}^{n} u_{ik}} \tag{22}$$

となる．以上の結果は，形式的にではあるが，確率的でないファジィクラスタリングも統計力学的に定式化が可能なことを示唆している．

5 おわりに

統計力学とファジィクラスタリングとの関係についてまとめた．ファジィクラスタリングに現れる分布関数には，統計力学的に対応する分布関数 (Boltzmann 分布，Fermi-Dirac 分布，Bose-like 分布) があり，この意味で，現状知られているファジィクラスタリング手法の多くは統計力学の範疇にあると考えられる．

今後は，4章で述べた分布の性質について調べていきたい．

参考文献

[1]K.Rose, E.Gurewitz, and B.C.Fox. A deterministic annealing approach to clustering, *Pattern Recognition Letters*, pp.589–594(1990)

[2]安田真, 古橋武, 松崎元昭, 大熊繁: 確定的アニーリング法とファジィエントロピーを用いたファジィクラスタリング, 第 17 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.589–592(2001)

連絡先:
〒 501-0495
岐阜県本巣郡真正町
岐阜工業高等専門学校電気情報工学科
安田真
電話: 058-320-1363
Email: yasuda@gifu-nct.ac.jp

ファジィ近傍概念にもとづくクラスタリングのための類似度

Similarity measures for clustering of terms in document set based on fuzzy neighborhoods

片岡 恵理奈
Erina Kataoka
筑波大学 理工学研究科
Master's Program in Science and Engineering
University of Tsukuba

宮本定明
Sadaaki Miyamoto
筑波大学 機能工学系
Institute of Engineering Mechanics and Systems
University of Tsukuba

Abstract: This paper describes similarity measures between two terms in a document set using the concept of a fuzzy neighborhood in order to perform term clustering. Theoretical properties of neighborhood, unnormalized proximity measures, and normalization into similarity measures are studied. An illustrative example is given.

1 はじめに

クラスタリングとは, 解析の対象となるデータを自動的に, いくつかの集まり (cluster) に分類する方法である [1]. クラスタリングでは, 分類にはデータ間の距離の近さ・類似度 (similarity measure) を使用し, 外的基準なしにデータの分類を行う.

クラスタリング技法には, 大きく分けて階層的クラスタリングと非階層的クラスタリングがあり, 本研究では, 階層的クラスタリングを扱う. 階層的クラスタリングとは, 類似度がもっとも近い cluster 同士を結合し, 順に大きな cluster を生成していく手法である.

クラスタリングにおいて, 扱うデータは様々である. 本研究では, 文書 (document) 中の用語 (term) に対するクラスタリングを行うため, それらの近接性の度合いに基づいた類似度を定める [2][3]. これは, 互いが近い場所に出現する用語対ほど類似度が高いという仮定に基づく.

文書中に出現する用語の回数などを用いた文書クラスタリングや用語クラスタリングはこれまで行われているが, それらの方法では文書中で近くに出現する用語対と, 遠くに出現する用語対を区別することはできない. そこで、本稿では用語の近接性に基づく類似度を定義し, 用語のクラスタリングを行うことを目的とする.

2 準備

Document の集合を $\mathcal{D} = \{d_1, d_2, \ldots, d_n\}$, クラスタリングの対象とする term の集合を $\mathcal{T} = \{t_1, t_2, \ldots, t_m\}$, term-document matrix $\mathbf{F} = (f_{ij})$, $(i = 1, \ldots, m,\ \ j = 1, \ldots, n)$ とする. ここで, f_{ij} は document d_j 中に term t_i が出現する回数とする.

しばしば、$\mathbf{F}$ はマルチ集合の用語を用いて記述される. その場合, t の d_j における出現回数を $Count_t(d_i) = f_{ij}$ と記述する. ここで、$Count$ はマルチ集合 t_i を特徴付けるメンバーシップである.

2 つの $\mathcal{T}$ のマルチ集合 t と t' の間の合併, 共通部分, 和, 代数積は次のように定義される.

$$
\begin{aligned}
Count_{t\cup t'}(d) &= \max\{Count_t(d), Count_{t'}(d)\} \\
Count_{t\cap t'}(d) &= \min\{Count_t(d), Count_{t'}(d)\} \\
Count_{t+t'}(d) &= Count_t(d) + Count_{t'}(d) \\
Count_{t\cdot t'}(d) &= Count_t(d) Count_{t'}(d)
\end{aligned}
$$

また, $\mathcal{T}$ のマルチ集合 t の, 基数とノルムを次式で定義する.

$$
\begin{aligned}
|t| &= \sum_{d\in\mathcal{D}} Count_t(d) \\
\|t\| &= \sqrt{[\sum_{d\in\mathcal{D}} Count_t(d)]^2}
\end{aligned}
$$

t と t' の間の類似性の尺度は, これらの定義を用いて表す. 例えば,

$$
\begin{aligned}
S_a(t,t') &= \frac{|t\cap t'|}{|t\cup t'|} \\
S_b(t,t') &= \frac{|t\cdot t'|}{\|t\|\,\|t'\|}
\end{aligned}
$$

これらの類似度は対称性をもっている. また, S_b はコサイン相関として知られている.

対称性のない類似性尺度も定義することができる. 例えば,

$$U_0(t,t') = \frac{|t \cap t'|}{|t|}$$

これに対称性をもたせると,

$$S_c(t,t') = \min\{U_0(t,t'), U_0(t',t)\}$$

これらの類似度は、2 つの単語が同じ文書中に出現すればするほど, それら 2 つの単語の類似性は高いという考えに基づいている.

一般的に, ある文書の中には, 同一の単語が複数回出現する. これらすべてを区別したものを term occurrence と呼ぶ. 文書中には, クラスタリングの対象としない単語も出現する. $Term(t)$ を用いて term と term occurrence との対応を記述する.

Document d に出現する全ての term の集合を $Set(d)$, document d の単語の並び (シーケンス) を $Sqnc(d)$ によって記述する. 例えば, $d_1, d_2 \in \mathcal{D}$ のとき, d_1 が $abcd$, d_2 が $vwxyz$, という順序で出現する単語の並びによって成り立っているとすると,

$$\begin{aligned} Sqnc(d_1) &= abcd \\ Sqnc(d_2) &= vwxyz \end{aligned}$$

また, 2 つのシーケンスの連結を $Sqnc(d)|Sqnc(d')$ で記述する. すなわち,

$$Sqnc(d_1)|Sqnc(d_2) = abcdvwxyz$$

Document の集合全体のシーケンス X は,

$$X = Sqnc(d_1)|Sqnc(d_2)|\cdots|Sqnx(d_n)$$

ここで, $t, t' \in \mathcal{T}$, $Term(v) = Term(w) = Term(y) = t$, $Term(x) = Term(z) = t'$ とすると, $Set(d_2) = t, t'$, $Sqnc(d_2) = ttt'tt'$.

さらに, 自然距離 D を次のように定義する.

$$D(a,b) = \{a \text{ と } b \text{ の間の } term \text{ の数} + 1\}$$

この D を用いると, 例えば, 上述の d において, $D(v,w) = 1$ であり, $D(v,z) = 4$ である.

3 近傍の定義

ある term occeurrence $a \in X$ が与えられたとき, ファジィ近傍 $N(a)$ は以下の性質を備えているものとする.

(i) $\mu_{N(a)}(a) = 1$

(ii) $D(a,b) \leq D(a,c)$ であるとき,

$$\mu_{N(a)}(b) \geq \mu_{N(a)}(c)$$

(iii) $\mu_{N(a)}(b) = \mu_{N(b)}(a)$

(iv) $a \notin Sqnc(d_j)$ であるとき,

$$\mu_{N(a)}(x) = 0, \quad \forall x \in Sqnc(d)$$

これらの性質を満たす近傍として, 本稿では, 次の 3 種類の例を検討する.

1) クリスプな近傍 $N'(a)$: 整数 $L > 0$ を定め,

$$\mu_{N'(a)}(x) = 1 \iff D(a,x) \leq L, \quad a, x \in Sqnc(d_i)$$

すなわち, a と同一 document 中に, L 以下の自然距離で x があれば 1, なければ 0 とする.

2) クリスプな近傍 $N_I(a)$:

$$\mu_{N_I(a)}(x) = 1 \iff a, x \in Sqnc(d_i)$$

すなわち, a と同一 document 中に x があれば 1, なければ 0 とする.

3) ファジィな近傍 $N(a)$: 整数 $L > 0$ を定め

$$\mu_{N(a)}(x) = \begin{cases} 1 - D(a,x)/L, & D(a,x) \leq L, \\ & a, x \in Sqnc(d_i) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

すなわち, a と同一 document 中に, L 以下の近さで x があれば $[0,1]$ の範囲の値をとり, なければ 0 とする.

4 類似度の定義

クラスタリングを行うために, 2 つの term の間の類似度を定める必要がある. このため, まず, 2 つの関数 p_1, p_2 を定義する.

$$\begin{aligned} p_1(t,t') &= \sum_{a \in Term^{-1}(t)} \sum_{b \in Term^{-1}(t')} \mu_{N(a)}(b) \\ p_2(t,t') &= \sum_{a \in Term^{-1}(t)} \max_{b \in Term^{-1}(t')} \mu_{N(a)}(b) \end{aligned}$$

類似度を s とする. 一般にクラスタリングに用いられる類似度は対称 ($s(t,t') = s(t',t)$) であり, かつ $s(t,t) \geq s(t,t')$, all t' を満たしている. これら 2 つの性質が満たされない場合, 類似性の測度の扱いには注意する必要がある.

ところが, p_1 および p_2 は以下のような性質をもっている.

[命題 1] p_2 は $p(t,t) \geq p(t,t'), all\ \ t'$ を満たすが, p_1 は満たさない. また, p_1 は対称 $(p(t,t') = p(t',t))$ だが, p_2 は非対称 $(p(t,t') \neq p(t',t))$ である.

[証明]

$0 \leq \mu_{N(a)}(b) \leq 1 = \mu_{N(a)}(a)$ より,

$$\begin{aligned} p_2(t,t') &= \sum_{a \in Term^{-1}(t)} \max_{b \in Term^{-1}(t')} \mu_{N(a)}(b) \\ &\leq \sum_{a \in Term^{-1}(t)} \max_{b \in Term^{-1}(t)} \mu_{N(a)}(b) \\ &= p_2(t,t) \end{aligned}$$

同様にして, $0 \leq \mu_{N(a)}(b) \leq 1 = \mu_{N(b)}(a)$ より,

$$\begin{aligned} p_1(t,t') &= \sum_{a \in Term^{-1}(t)} \sum_{b \in Term^{-1}(t')} \mu_{N(a)}(b) \\ &= \sum_{b \in Term^{-1}(t')} \sum_{a \in Term^{-1}(t)} \mu_{N(b)}(a) \\ &= p_1(t',t) \end{aligned}$$

また, それぞれ条件を満たさないことについて反例を示すと,

$$\begin{aligned} &d_1, d_2 \in \mathcal{D}\ , \quad t_1, t_2 \in \mathcal{T} \\ &Sqnc(d_1) = t_1 t_2 t_2 \\ &Sqnc(d_2) = t_2 t_1 t_2 \end{aligned}$$

このとき, t_1, t_2 について, p_1 を求めると,

$$\begin{aligned} &p_1(t_1,t_1) = 2\ , \quad p_1(t_1,t_2) = 4, \\ &p_1(t_2,t_1) = 4, \quad p_1(t_2,t_2) = 8 \end{aligned}$$

となり, p_1 は $p(t,t) \geq p(t,t'), all\ \ t'$ を満たしていない.

同様に, p_2 を求めると,

$$\begin{aligned} &p_2(t_1,t_1) = 2, \quad p_2(t_1,t_2) = 2, \\ &p_2(t_2,t_1) = 4, \quad p_2(t_2,t_2) = 4 \end{aligned}$$

となり, p_2 は $p(t,t') = p(t',t)$ を満たしていない. (証明終)

そこで, p_1, p_2 について, これらの問題点を解消するため, 正規化および対象化された類似度への変換を行う.

p_1 について,

$$s_1(t,t') = \frac{p_1(t,t')}{\sqrt{\{\sum_{d \in \mathcal{D}} [\#t(d)]^2\}\{\sum_{d \in \mathcal{D}} [\#t'(d)]^2\}}}$$

p_2 について,

$$\begin{aligned} c(t,t'\ \alpha) &= \alpha \max\{p_2(t,t'), p_2(t',t)\} \\ &\quad + (1-\alpha) \min\{p_2(t,t'), p_2(t',t)\} \\ s_2(t,t';\alpha) &= \frac{c(t,t';\alpha)}{\#t(\mathcal{D}) + \#t'(\mathcal{D}) - c(t,t';\alpha)} \\ &\qquad \text{ただし, } \alpha \in [0,1] \end{aligned}$$

ここで, $\#t(d) = \{d \in \mathcal{D}$ に出てくる term t の数$\}$, $\#t(\mathcal{D}) = \sum_{d \in \mathcal{D}} \#t(d)$ である.

式の形より, 次の命題が得られる.

[命題 2] 近傍 $N_I(a)$ を用いるとき, $s_1(t,t')$ はコサイン相関に一致する.

[命題 3] 条件 (i)〜(iv) を満たす任意の近傍 $N(a)$ について, $0 \leq s_1(t,t') \leq 1, \ \ \forall t,t' \in \mathcal{T}$ を満たす.

[証明] 非負であることについての証明は省略する.

例として挙げた近傍 $N_I(a)$ を用いたとき, p_1 は,

$$p_1(t,t';N_1) = \sum_{d \in \mathcal{D}} \#t(d) \cdot \#t'(d)$$

となる. よって,

$$p_1(t,t';N_I)^2 \leq \{\sum_{d \in \mathcal{D}} [\#t(d)]^2\}\{\sum_{d \in \mathcal{D}} [\#t'(d)]^2\}$$

すべての性質 (i)〜(iv) を満たすファジィ近傍 $N(a)$ について, $\mu_{N(a)} \leq \mu_{N_I(a)}$ が成り立つので,

$$p_1(t,t';N) \leq p_1(t,t';N_I)$$

以上より, $s_1(t,t';N(a)) \leq s_1(t,t';N_I(a)) \leq 1$. (証明終)

[命題 4] 条件 (i)〜(iv) を満たす任意の近傍 $N(a)$ について, s_2 は, $\alpha \in [0,1]$ について単調非減少となる.

[命題 5] $0 \leq \alpha \leq \frac{1}{2}$ のとき,

$$0 \leq s_2(t,t';\alpha) \leq 1, \ \ \forall t,t' \in \mathcal{T}$$

を満たす.

[証明] 非負であることの証明は省略する.

例として挙げた近傍 $N_I(a)$ を用いたとき, p_2 は,

$$\begin{aligned} p_2(t,t';N_1) &= \sum_{d \in \mathcal{D}} \#t(d) \cdot \Delta(\#t'(d)) \\ p_2(t,t;N_1) &= \#t(\mathcal{D}) \end{aligned}$$

となる. ただし, $\Delta(x)$ は x が正のとき 1, 非正値のとき 0 となる関数とする.

$\#t(\mathcal{D}) \leq \#t'(\mathcal{D})$ とすると, $p_2(t,t') \leq p_2(t,t)$ より,

$$\begin{aligned} c(t,t';N_I;\alpha) &\leq c(t,t;\alpha) \\ &= \alpha \#t(\mathcal{D}) + (1-\alpha)\#t'(\mathcal{D}) \end{aligned}$$

よって,

$$
\begin{aligned}
& s_2(t,t';N(a);\alpha) \\
& \quad \leq \quad s_2(t,t';N_I;\alpha) \\
& \quad \leq \quad \frac{\alpha\#t(\mathcal{D})+(1-\alpha)\#t'(\mathcal{D})}{\#t(\mathcal{D})+\#'t(\mathcal{D})\alpha\#t(\mathcal{D})-(1-\alpha)\#t'(\mathcal{D})} \\
& \quad = \quad \frac{\alpha\#t(\mathcal{D})+(1-\alpha)\#t'(\mathcal{D})}{(1-\alpha)\#t(\mathcal{D})+\alpha\#t'(\mathcal{D})}
\end{aligned}
$$

よって s_2 は α について単調非減少となり, $0 \leq \alpha \leq \frac{1}{2}$ のとき , $s_2 \leq 1$ となる. (証明終)

ここで論じた s_1 , s_2 を類似度として利用する.

5 数値例

次の数値を用いて, 簡単な計算例を示す.

$$
\begin{aligned}
& t_1,\ldots,t_4 \in \mathcal{T} \quad d_1,d_2,d_3 \in \mathcal{D} \\
& Sqnc(d_1) = t_1t_2t_1t_3t_1 \\
& Sqnc(d_2) = t_2t_3t_4t_2t_2t_1 \\
& Sqnc(d_3) = t_3t_4t_3
\end{aligned}
$$

F は, 表??のようになっている.

表 1: term-document matrix **F**

F	t_1	t_2	t_3	t_4
d_1	3	1	1	0
d_2	1	3	1	1
d_3	0	0	2	1

クリスプな近傍 $N_I(a)$ を用いたときの結果は表 2, ファジィな近傍 $N(a)$ を用いたときは表 3 のようになっている. なお, $\alpha = 0.5, L = 2$ で計算した.

6 おわりに

本稿では, 文書中の用語に対するクラスタリングを行うため, 同一文書内で互いが近い位置に出現した単語対は互いの類似度が高くなるよう, ファジィ近傍を用いた類似性の尺度を定めた. それらに正規化及び対象化を行い, クラスタリングを行う際の類似度を提案した. また, 類似度に対する理論的考察を行い, 簡単な数値例を示した. 発表時に, クラスタリングを行った例を示す.

なお, 今後の課題として, このモデルに適したクラスタリングアルゴリズムの開発と, 実データへの応用が挙げられる.

表 2: $N_I(a)$ の場合の s_1, s_2

s_1	t_1	t_2	t_3	t_4
t_1	1.00	0.60	0.52	0.22
t_2	0.60	1.00	0.52	0.67
t_3	0.52	0.52	1.00	0.87
t_4	0.22	0.67	0.87	1.00

s_2	t_1	t_2	t_3	t_4
t_1	1.00	1.00	0.60	0.20
t_2	1.00	1.00	0.60	0.50
t_3	0.60	0.60	1.00	0.71
t_4	0.20	0.50	0.71	1.00

表 3: $N(a)$ の場合の s_1, s_2

s_1	t_1	t_2	t_3	t_4
t_1	0.40	0.15	0.13	0.00
t_2	0.15	0.50	0.06	0.11
t_3	0.13	0.06	0.67	0.43
t_4	0.00	0.11	0.43	1.00

s_2	t_1	t_2	t_3	t_4
t_1	1.00	0.23	0.14	0.00
t_2	0.23	1.00	0.07	0.09
t_3	0.14	0.07	1.00	0.33
t_4	0.00	0.09	0.33	1.00

参考文献

[1] 宮本定明, クラスター分析入門, 森北出版, 1999.

[2] Sadaaki Miyamoto, Proximity Measures for Terms Based on Fuzzy Neighborhoods in Document Sets, in preparation.

[3] 宮本定明, 須賀伸介, 大井紘, 阿部治, 勝矢淳雄, 自由連想法により環境意識調査データのクラスタ分析のための近傍法, システムと制御, Vol 32, No.4, pp.255-263, 1988

問い合せ先
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学 機能工学系 宮本研究室
片岡 恵理奈
TEL: 0298-53-6553 FAX: 0298-53-5207
email: erina@odin.esys.tsukuba.ac.jp

Fuzzy c-Means Clustering with Kernel Trick and Regularization by K-L Information
カーネルトリックとK-L情報量正則化を用いるFCMクラスタリング

Hidetomo ICHIHASHI, Katsuhiro HONDA, Toto H. Silitonga
市橋秀友　本多克宏　Toto H. Silitonga

Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University
大阪府立大学　大学院工学研究科

Abstract: By the addition of a regularizer and the kernel trick to a fuzzy counterpart of Gaussian mixture density models (GMM), this paper proposes a clustering algorithm in an extended high dimensional feature space. The algorithm provides a partitioning with flexible shape of clusters in the original input data space.

I Introduction

We proposed a new FCM clustering objective function with an additional term of Kullback-Leibler information and showed that the same algorithm as the GMM Expectation Maximizing algorithm is derived from the FCM with regularization by K-L information or cross entropy when a parameter λ equals 2 [1]. Like the fuzzy c-varieties and fuzzy c-elliptypes clustering algorithms, the GMM method is good only when the dataset contains clusters that are approximately the same shape, i.e., the hyper elliptic. The fuzzy c-spherical shells and their modified methods aim at detection of shell type clusters of the same class of models, for example, all are spherical shells. In the passed several years, a number of powerful kernel-based learning machines [2], e.g., support vector machines (SVMs), kernel Fisher discrimimant (KFD), kernel principal component analysis (KPCA), and kernel fuzzy c-means (KFCM) [3, 4], have been proposed. Tipping and Bishop proposed a way to control the number of parameters in the mixture of probabilistic principal component analysis (PPCA) [5]. We extended this approach to FCV type fuzzy clustering [6]. Although in both the approaches the dimensionality of feature space must be known, by making this parameter an adjustable one, we propose a kernel trick based PPCA like fuzzy clustering method in a high dimensional feature space.

II KLFCM with Kernel Trick

Let us consider that the original input data space will be mapped into a high dimensinal feature space through some nonlinear mapping ϕ. Then the fuzzy covariance matrix for the ith cluster is written in the matrix form as

$$\begin{aligned} S_i &= \frac{\sum_{k=1}^{n} u_{ik}(\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_k)-\boldsymbol{v}_i^{\phi})(\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_k)-\boldsymbol{v}_i^{\phi})^{\top}}{\sum_{k=1}^{n} u_{ik}} \\ &= \frac{1}{n\pi_i}\Phi_i^{\top} M_i \Phi_i \\ &= ((n\pi_i)^{-\frac{1}{2}} M_i^{\frac{1}{2}}\Phi_i)^{\top}((n\pi_i)^{-\frac{1}{2}} M_i^{\frac{1}{2}}\Phi_i) \end{aligned} \quad (1)$$

where $\Phi_i = (\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_1)-\boldsymbol{v}_i^{\phi},...,\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_n)-\boldsymbol{v}_i^{\phi})^{\top}$ and $M_i = \mathrm{diag}(u_1,...,u_n)$. $\boldsymbol{v}_i^{\phi}$ is a cluster centroid in the extended feature space. π_i signifies the volume or ratio of the data involved in the ith fuzzy cluster. The dimension of $\boldsymbol{\phi}$ and $\boldsymbol{v}$ is r in the extended feature space. Eigenvalue decomposition of S_i may be written as

$$S_i = W_i \Delta_i^2 W_i^{\top} \quad (2)$$

where $W_i = (\boldsymbol{w}_{i1},...,\boldsymbol{w}_{ir})$ is a $r \times r$ matrix and $\boldsymbol{w}_{i1},...,\boldsymbol{w}_{ir}$ are eigenvectors associated with positive eigenvalues $(\delta_1^2,...,\delta_p^2)$ of S_i. The vectors are normalized as $\boldsymbol{w}_{il}^{\top}\boldsymbol{w}_{il} = 1$. $\Delta^2 = \mathrm{diag}(\delta_1^2,...,\delta_r^2)$ is a diagonal matrix of the eigenvalues. $\boldsymbol{v}_i^{\phi}$ is a centroid for the ith cluster.

$$\boldsymbol{v}_i^{\phi} = \frac{\sum_{k=1}^{n} u_{ik}\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_k)}{\sum_{k=1}^{n} u_{ik}} \quad (3)$$

By the singular value decomposition

$$(n\pi_i)^{-\frac{1}{2}} M_i^{\frac{1}{2}}\Phi_i = F_i \Delta_i W_i^{\top} \quad (4)$$

we have

$$\Phi_i W_i \Delta_i^{-1} = (n\pi_i)^{\frac{1}{2}} M_i^{-\frac{1}{2}} F_i \quad (5)$$

where F_i is a $n \times r$ matrix. If the lefthand side of Eq.(4) is non-singular, the distance between $\boldsymbol{\phi}_k$ and cluster center $\boldsymbol{v}_i^{\phi}$ can be written by using Eq.(5) as

$$\begin{aligned} d_{ik} &= (\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_k)-\boldsymbol{v}_i^{\phi})^{\top} S_i^{-1}(\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_k)-\boldsymbol{v}_i^{\phi}) \\ &= (\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_k)-\boldsymbol{v}_i^{\phi})^{\top} W_i \Delta_i^{-2} W_i^{\top}(\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_k)-\boldsymbol{v}_i^{\phi}) \\ &= ((\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_k)-\boldsymbol{v}_i^{\phi})^{\top} W_i \Delta_i^{-1}) \end{aligned}$$

$$\times((\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_k)-\boldsymbol{v}_i^{\phi})^{\top}W_i\Delta_i^{-1})^{\top}$$

$$= n\pi_i u_{ik}^{-1}\boldsymbol{f}_{ik}^{\top}\boldsymbol{f}_{ik} \quad (6)$$

where $F_i=(\boldsymbol{f}_{i1},...,\boldsymbol{f}_{in})^{\top}$.

When the explicit form of $\boldsymbol{\phi}$ is not known, for obtaining the values of F_i and Δ_i, let us define an $n\times n$ matrix K_i and rewrite it by using Eq.(4) as

$$\begin{aligned} K_i &= (n\pi_i)^{-1}M_i^{\frac{1}{2}}\Phi_i\Phi_i^{\top}M_i^{\frac{1}{2}} \\ &= ((n\pi_i)^{-\frac{1}{2}}M_i^{\frac{1}{2}}\Phi_i)((n\pi_i)^{-\frac{1}{2}}M_i^{\frac{1}{2}}\Phi_i)^{\top} \\ &= (F_i\Delta_iW_i^{\top})(W_i\Delta_iF_i^{\top}) \\ &= F_i\Delta_i^2F_i^{\top} \quad (7)\end{aligned}$$

Let $\Phi_i^*\Phi_i^{*T}$ be a matrix in terms of dot product $(\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_k)^{\top}\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_l))_{n\times n}$, where $(\ \ )_{n\times n}$ denotes matrix of $n\times n$ dimension. Then, $\Phi_i\Phi_i^{\top}$ can be written as

$$\begin{aligned}\Phi_i\Phi_i^{\top} &= \Phi_i^*\Phi_i^{*T}-\Phi_i^*\Phi_i^{*T}\boldsymbol{u}_i\mathbf{1}_{n\times1}^{\top}-\mathbf{1}_{n\times1}\boldsymbol{u}_i^{\top}\Phi_i^*\Phi_i^{*T} \\ &\quad +(\mathbf{1}_{n\times1}\boldsymbol{u}_i^{\top})\Phi_i^*\Phi_i^{*T}(\boldsymbol{u}_i\mathbf{1}_{n\times1}^{\top}) \quad (8)\end{aligned}$$

$\mathbf{1}_{n\times1}$ denotes the vector of dimension $n\times1$ with all entries equal to 1. $\boldsymbol{u}_i=(u_{i1}/\sum_{k=1}^n u_{ik},...,u_{in}/\sum_{k=1}^n u_{ik})^{\top}$.

Thus, $\Phi_i\Phi_i^{\top}$ can be calculated by replacing the dot product $\Phi_i^*\Phi_i^{*T}$ with a kernel function $k(\boldsymbol{x}_k,\boldsymbol{x}_l)$, such that

$$\Phi_i^*\Phi_i^{*T}=(\boldsymbol{\phi}((\boldsymbol{x}_k)^{\top}\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_l))_{n\times n}=(k(\boldsymbol{x}_k,\boldsymbol{x}_l))_{n\times n} \quad (9)$$

F_i and Δ_i are obtained from the eigen value decomposition of K_i as in Eq.(7). The remaining value that we need for updating $\boldsymbol{u}_i$ is $|S_i|$. If $\mathrm{rank}(S_i)=r$,

$$|S_i|=|W_i||\Delta_i^2||W_i^{\top}|=|\Delta_i^2|=\prod_{l=1}^{r}\delta_{il}^2 \quad (10)$$

From Eq.(4)

$$(n\pi_i)^{-\frac{1}{2}}\Phi_i\Phi_i^{\top}M_i^{\frac{1}{2}}F_i\Delta_i^{-2}=\Phi_iW_i^{\top}\Delta_i^{-1} \quad (11)$$

If n new test points are given, then the right hand side of Eq.(5) is written as

$$\begin{aligned}(n\pi_i)^{\frac{1}{2}}M_i^{-1/2}F_i^{NEW} &= (n\pi_i)^{-\frac{1}{2}}(\Phi_i^{NEW}\Phi_i^{*T} \\ &\quad +\Phi_i\Phi_i^{T}-\Phi_i^*\Phi_i^{*T})M_i^{\frac{1}{2}}F_i\Delta_i^{-2} \quad (12)\end{aligned}$$

where F_i^{NEW} and Φ_i^{NEW} denotes the values corresponding to the new test points $\boldsymbol{x}$'s. We see that from Eq.(13) for a single new test point $\boldsymbol{x}_{k'}$

$$(n\pi_i)^{\frac{1}{2}}u_{ik'}^{-1/2}\boldsymbol{f}_{ik'}=(n\pi_i)^{-\frac{1}{2}}(\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_{k'})\Phi_i^{*T}$$

$$+(\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_1)-\boldsymbol{v}_i^{\phi})\Phi_i^{T}-\boldsymbol{\phi}^*(\boldsymbol{x}_1)\Phi_i^{*T})M_i^{\frac{1}{2}}F_i\Delta_i^{-2} \quad (13)$$

holds. $d_{ik'}$ is calculated from this equation.

III Reduction of parameters

In the feature space extended by some kernel function, r is usually unknown, and the number of observation n may exceed the dimensionality r. Because this kernel approach can find up to n nonzero eigenvalues, reduction of the number of unknown parameters is significant.

Unlike the global nonlinear approaches, GMM or KLFCM is to model nonlinear structure with a collection, or mixture, of local linear sub-models of PCA. When estimating covariance structures in high dimensions, while not over-constraining the model flexibility, Tipping and Bishop proposed a way to control the number of parameters in the mixture of probabilistic principal component analysis (PPCA) [5]. Honda *et al.* extended this approach to FCV type fuzzy clustering [6]. Although in both of the approaches the number r should be known, by making this parameter an adjustable one, we apply the kernel trick to the clustering method in a high dimensional feature space.

Let S_i' denotes an approximation of S_i in Eq.(1) and (2) for $p<r$ as

$$S_i'=W_{pi}(\Delta_{pi}^2-\sigma_i^2I_r)W_{pi}^{\top}+W_i(\sigma_i^2I_r)W_i^{\top} \quad (14)$$

where

$$\begin{aligned}\sigma_i^2 &= \frac{1}{r-p}\sum_{l=p+1}^{r}\delta_{il}^2 \\ &= \frac{1}{r-p}(\mathrm{trace}(\mathrm{K_i})-\sum_{\mathrm{l=1}}^{\mathrm{p}}\delta_{\mathrm{il}}^2) \quad (15)\end{aligned}$$

But unfortunately r is unknown dimensionality of the feature space mapped by an unknown function $\boldsymbol{\phi}$, so we make r an adjustable parameter. The squared distance between $\boldsymbol{\phi}_k$ and cluster center $\boldsymbol{v}_i^{\phi}$ can be approximated as

$$\begin{aligned}d_{ik'} &= (\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_{k'})-\boldsymbol{v}_i^{\phi})^{\top}S_i'^{-1}(\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_{k'})-\boldsymbol{v}_i^{\phi}) \\ &= \sum_{l=1}^{p}\frac{1}{\delta_{il}^2}((\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_{k'})-\boldsymbol{v}_i^{\phi})^{\top}\boldsymbol{w}_{il})\times \\ &\quad ((\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_{k'})-\boldsymbol{v}_i^{\phi})^{\top}\boldsymbol{w}_{il}) \\ &\quad +\frac{1}{\sigma_i^2}\sum_{l=p+1}^{r}((\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_{k'})-\boldsymbol{v}_i^{\phi})^{\top}\boldsymbol{w}_{il})\times \\ &\quad (\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_{k'})-\boldsymbol{v}_i^{\phi})^{\top}\boldsymbol{w}_{il}\end{aligned}$$

$$= n\pi_i u_{ik}^{-1}(\boldsymbol{f}_{ik}'^T \boldsymbol{f}_{ik'}')$$

$$+ \frac{1}{\sigma_i^2}(\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_{k'}) - \boldsymbol{v}_i^{\phi})^\top(\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_{k'}) - \boldsymbol{v}_i^{\phi})$$

$$- n\pi_i u_{ik}^{-1} \boldsymbol{f}_{ik'}'^T \Delta_{pi}^2 \boldsymbol{f}_{ik'}')) \quad (16)$$

where $\boldsymbol{f}_i' = (f_{ik1}, ..., f_{ikp})^\top$, and

$$(\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_{k'}) - \boldsymbol{v}_i^{\phi})^\top(\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_{k'}) - \boldsymbol{v}_i^{\phi}) = \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_{k'})^\top \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_{k'})$$

$$-2\boldsymbol{u}_i^\top \boldsymbol{\Phi}^\top \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}_{k'}) + \boldsymbol{u}_i^\top \boldsymbol{\Phi}^* \boldsymbol{\Phi}^{*T} \boldsymbol{u}_i \quad (17)$$

It should be noted that u_{ik} must be positive in Eq.(6) and (16). Thus we add a very small number such as 1×10^{-7} to u_{ik} in each repetition of update.

We approximate $|S_i|$ by the product of largest p eigenvalues of K_i and $\sigma_i^{2(r-p)}$ where r is some estimated positive integer.

$$|S_i| \simeq (\prod_{l=1}^{p} \delta_{il}^2)\sigma_i^{2(r-p)} \quad (18)$$

When σ_i is set to a small positive number, this method reduces to a FCV type clustering by the property shown in [6]. The membership to cluster u_{ik} and the ratio π_i may be written as

$$u_{ik} = \frac{\pi_i \exp\left(-\frac{1}{\lambda} d_{ik}\right)|S_i|^{-\frac{1}{\lambda}}}{\sum_{j=1}^{c} \pi_j \exp\left(-\frac{1}{\lambda} d_{jk}\right)|S_j|^{-\frac{1}{\lambda}}} \quad (19)$$

$$\pi_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} u_{ik}}{\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{n} u_{jk}} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} u_{ik}. \quad (20)$$

The algorithm is the repetition of these update for all clusters, i.e., $i = 1, ..., c$ and may be described as

Kernel-KLFCM algorithm

Step 1: Initialize $\boldsymbol{u}_i$ with random numbers.

Step 2: Calculate π_i for all i by Eq.(20).

Step 3: Calculate K_i and its eigenvalue decomposition using Eqs.(7)-(9).

Step 4: Calculate u_{ik} by Eqs.(18)-(20).

Step 5: If

$$\max_{c,\ j} |u_{cj}^{NEW} - u_{cj}^{OLD}| < \epsilon$$

is satisfied, then terminate, else goto *Step 2.*

IV Clustering artificial data

To demonstrate the method presented, some clustering results for toy datasets are shown in Figs. 1 to 4. We can intuitively partition the data set into two clusters, center part and surrounding part (Fig.1 Upper). Membership values for the center part cluster is shown (Fig.1 Lower). It should be noted that the 3D graph is depicted by calculating the memberships of new points, which are not used in the clustering process (Figs. 1, 2 and 4 Lower). Not all but a part of the middle cluster is extracted as one of the two clusters (Fig.1). Number of clusters and other parameters specified are given in the caption of the figures. The set of two small clusters are surrounded by an elliptic shell cluster (Fig.2). Although the two clusters are separated as shown by the membership function, they are included in a single cluster. Two small clusters out of three are classified as a cluster and the rest is isolated (Fig.3 Upper). But the three small clusters are separated from the elliptic shell cluster. Similarly one small cluster is separated from the elliptic one (Fig.3 Lower). Fig.4 shows the case where small two clusters are surrounded by a rectangular shell cluster.

References

1. H. Ichihashi and K. Honda: Robust Clustering in Fuzzy c-Means with Regularization by Cross Entropy, *Proc. of 1st International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, Vol.1, pp.471-475 (2002).

2. K-R. Müller, S.Mika, G. Ratsch, K. Tsuda, and B. Schölkopf: An Introduction to Kernel-Based Learning Algorithms, *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol.12, No.2, pp.181-201(2001)

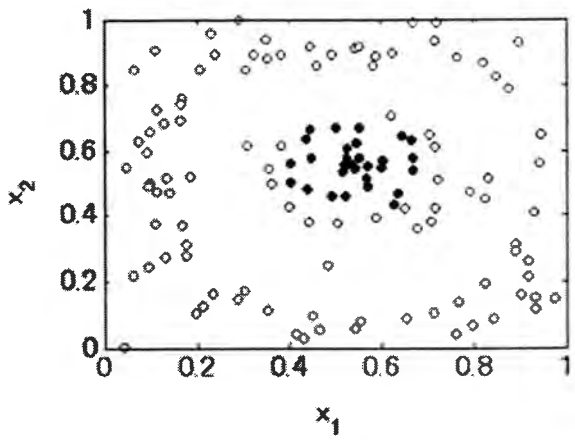
3. D.Suizu, S.Miyamoto: Fuzy c-Means Clustering Using Mapping into High Dimensional Spaces, *Proc. the 18th Fuzzy System Symposium*, pp.123-126(2002)

4. M.Girolami: Mercer Kernel Based Clustering in Feature Space,*I.E.E.E. Transaction on Neural Networks*,

5. M.E. Tipping, C.M. Bishop: Mixtures of probabilistic principal component analyzers, *Neural Computation*, Vol.11, pp.443-482(1999).

6. Y. Mori, K. Honda, A. Kanda, H. Ichihashi: A Unified View of Probabilistic PCA and Regularized Linear Fuzzy Clustering, *Proc. the 2003 International Joint Conference on Neural Networks*

Address correspondence:
Hidetomo ICHIHASHI, Professor, Dr.,
Industrial Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University
1-1 Gakuencho, Sakai, Osaka 599-8531 Japan
Phone:81-722-54-9352 FAX:81-722-54-9915(Dept.)
E-mail ichi@ie.osakafu-u.ac.jp



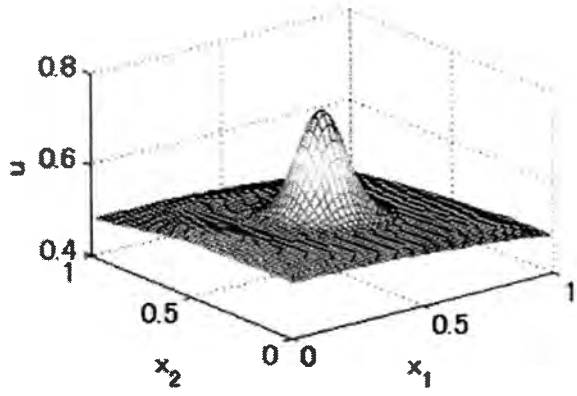
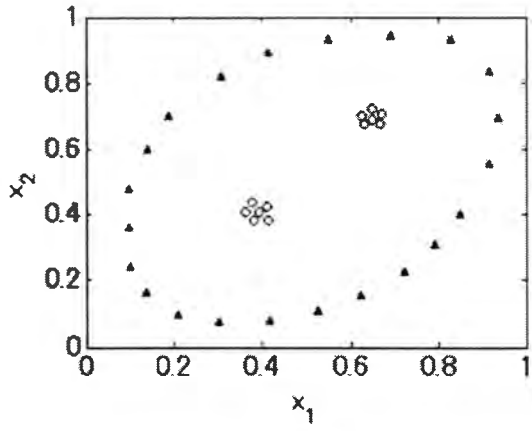


Fig.1 C=2, p=1, r=10, λ=5, γ=70



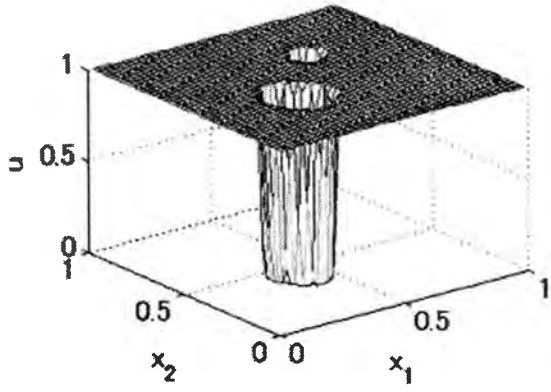
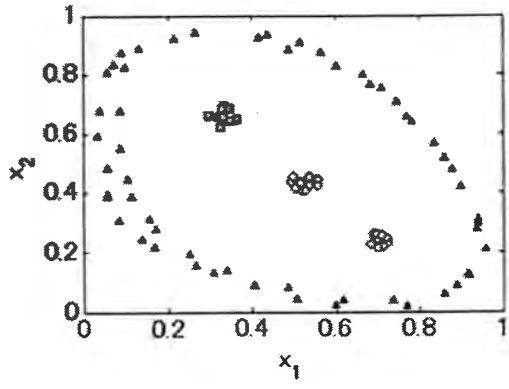


Fig.2 C=2, p=2, r=10, λ=5, γ=70



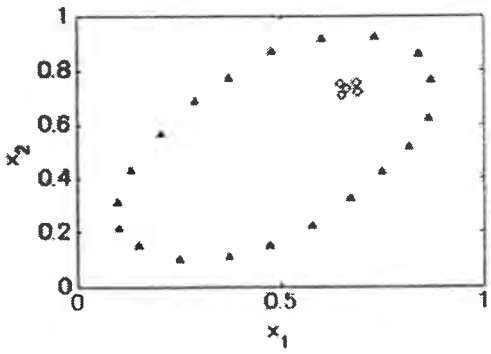
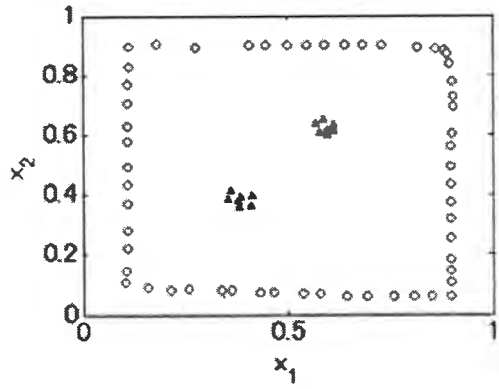


Fig.3 Upper: C=3, p=2, r=10, λ=8, γ=70
Lower: C=2, p=1, r=10, λ=5, γ=70



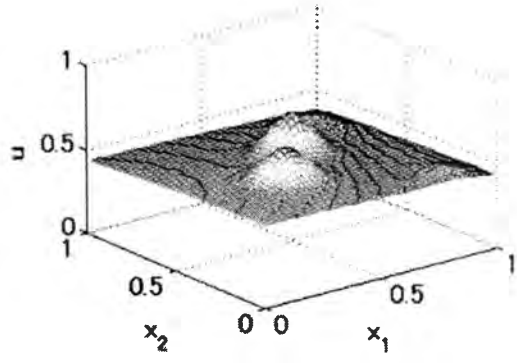


Fig.4 C=2, p=2, r=10, λ=8, γ=70

区分的リアプノフ関数による非線形システムの安定化

Stabilizing control of nonlinear systems based on piecewise Lyapunov functions

谷口 唯成　　菅野 道夫
Tadanari Taniguchi　Michio Sugeno
理化学研究所　脳科学総合研究センター
Brain Science Institute, RIKEN

Abstract This paper proposes a stabilization algorithm for nonlinear systems based on piecewise Lyapunov functions. It first shows the canonical forms of nonlinear systems and then stability conditions based on piecewise Lyapunov functions. The conditions are necessary and sufficient ones. The stabilizing conditions are expressed in terms of bilinear matrix inequalities (BMIs). Based on regional solutions of BMIs, we present a design algorithm for a global stabilizing controller. An example of stabilization of a nonlinear system is shown.

1　緒言

最近，タイプII ファジィシステム，タイプIII ファジィシステム（いわゆるTS システム）を中心にモデルベーズドファジィ制御に関する安定性の議論 [1] が活発である．

本論文はシングルトン後件部を持つファジィルールで記述された非線形システムの区分的リアプノフ関数による安定化制御に関するものである．はじめに，区分的リアプノフ関数による安定解析，安定化条件について簡単に述べる．本手法の安定化条件は双線形行列不等式 (BMI) 問題となっている．一般に BMI 問題は効率よく解くことはできない問題（NP 困難）であることが示されている．本論文では，BMI 条件で記述された安定化条件を解くためのアルゴリズムを提案する．最後に例題に適用して有効性を検討する．

2　区分的リアプノフ関数による非線形システムの安定条件

2.1　標準形

本論文の２次元の区分的リアプノフ関数による非線形システムは状態空間を矩形の領域 R_{ij} に分割する．一般に領域 R_{ij} の端点ベクトル $d(i,j)$ を以下のように表す．

$$d(i,j) \equiv (d_1(i), d_2(j))^T.$$

ここで，$d_1(i) < d_1(i+1)$, $d_2(j) < d_2(j+1)$, i, j はそれぞれ整数である．以下では，任意の領域を $R_{\sigma\tau}$ で表すが，$R_{\sigma\tau}$ は $d(\sigma,\tau)$, $d(\sigma+1,\tau)$, $d(\sigma,\tau+1)$, $d(\sigma+1,\tau+1)$ を端点としてもつ．自由系のタイプII ファジィシステムの If-then ルールは

$$\text{If} \quad x(t) \text{ is } W^{ij}, \quad \text{Then} \quad \dot{x}(t) \text{ is } f(i,j) \qquad (1)$$

と表わされる．ここで $x(t) = (x_1(t), x_2(t))^T$ は２次元状態ベクトル，$f(i,j) = (f_1(i,j), f_2(i,j))^T$ は R_{ij} の端点 $x(t) = d(i,j)$ における $\dot{x}(t)$ の値を表すシングルトンベクトル，$W^{ij} = \left(\omega_1^i(x_1(t)), \omega_2^j(x_2(t))\right)^T$ は $x_1(t)$, $x_2(t)$ に関する正規三角メンバーシップ関数ベクトルであり，ファジィ推論は重み付き平均で求められると仮定する．

推論の結果，$x(t) \in R_{\sigma\tau}$ においてタイプII システム (1) 式のパラメトリック表現は次のように表される．

$$x(t) = \sum_{i=\sigma}^{\sigma+1}\sum_{j=\tau}^{\tau+1} \omega_1^i(x_1(t))\omega_2^j(x_2(t))d(i,j), \qquad (2)$$

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=\sigma}^{\sigma+1}\sum_{j=\tau}^{\tau+1} \omega_1^i(x_1(t))\omega_2^j(x_2(t))f(i,j) \qquad (3)$$

領域 $R_{\sigma\tau}$ のメンバーシップ関数は以下のように記述できる．

$$\omega_1^\sigma(x_1) = (d_1(\sigma+1) - x_1)/(d_1(\sigma+1) - d_1(\sigma)),$$
$$\omega_2^\tau(x_2) = (d_2(\tau+1) - x_2)/(d_2(\tau+1) - d_2(\tau)),$$
$$\omega_1^\sigma + \omega_1^{\sigma+1} = 1,\ \omega_2^\tau + \omega_2^{\tau+1} = 1,\ \omega_1^i, \omega_2^j \in [0,\ 1]$$

(2), (3) 式より ω_1^i または ω_2^j を消去することにより，パラメトリック表現と等価な状態空間表現 [10,11,12] を導くことができる．なお，紙面の都合上省略する．

今システムモデルと同様の領域分割に従って，領域 $R_{\sigma\tau}$ における区分的リアプノフ関数を考える．

$$V(x) = \sum_{i=\sigma}^{\sigma+1}\sum_{j=\tau}^{\tau+1} \omega_1^i\omega_2^j V(i,j) - \omega_1^\sigma\omega_1^{\sigma+1}E_1^{\sigma\tau} - \omega_2^\tau\omega_2^{\tau+1}E_2^{\sigma\tau} \qquad (4)$$

ここで，$V(i,j)$ は $R_{\sigma\tau}$ の端点 $d(i,j)$ における $V(x)$ の値，$E_1^{\sigma\tau}$ と $E_2^{\sigma\tau}$ は $R_{\sigma\tau}$ に依存する $V(\boldsymbol{x})$ の近似パラメータである．(4) 式は $R_{\sigma\tau}$ における任意の２次関数を表すことができる．

区分的リアプノフ関数のパラメトリック表現 (4) 式は次の状態空間表現に等価変換できる．

$$V(x) = \frac{1}{2}x^T P_{\sigma\tau}x + q_{\sigma\tau}^T x + r_{\sigma\tau}$$

ここで，$P_{\sigma\tau}$, $q_{\sigma\tau}$, $r_{\sigma\tau}$ は変数 $V(i,j)$, E_1^{ij}, E_2^{ij} から構成される．詳細については [6] 参照．

ゼロ領域 R_{ij}^o, $i = \sigma-1, \sigma$, $j = \tau-1, \tau$ において $V(x)$ の形を２次形式に制限するために以下のゼロ条件

(ZC) を課す.

$$\begin{aligned}
&\text{ZC1:}\quad d(\sigma,\tau)=0 \text{ において } V(\sigma,\tau)=0\\
&\text{ZC2:}\quad V(\sigma+1,\tau)=E_1^{\sigma\tau}=E_1^{\sigma\tau-1}\\
&\qquad V(\sigma,\tau+1)=E_2^{\sigma\tau}=E_2^{\sigma-1\tau}\\
&\qquad V(\sigma-1,\tau)=E_1^{\sigma-1\tau-1}=E_1^{\sigma-1\tau}\\
&\qquad V(\sigma,\tau-1)=E_2^{\sigma-1\tau-1}=E_2^{\sigma\tau-1}
\end{aligned}$$

さらに領域の境界の連続性を満足するために，全ての領域において，次の連続条件 (CC) を課す.

$$\text{CC:}\quad E_1^{\sigma j}=E_1^{\sigma j+1},\ \forall\sigma,j \quad E_2^{i\tau}=E_2^{i+1\tau},\ \forall\tau,i$$

2.2 安定条件

この節では，区分的リアプノフ関数による非線形システムの安定条件を示す．システム (3) 式が安定であるためには，区分的リアプノフ関数 (4) の $V(x)$ が正定で，$\dot{V}(x)$ が負定である必要がある．紙面の都合上，区分的リアプノフ関数のゼロ領域における正定条件のみ示す．その他の安定条件については [5–8] 参照.

補題 1 以下の条件を満たす $V(i,j)$ とスラック変数 γ_i, $i=1,\cdots,4$ が存在すれば $V(x)$ はその定義域において正定である．ただし $d(\sigma,\tau)=0$ である.

[第 1 象限]

$$\gamma_1>0,$$
$$\gamma_1+\frac{-V(\sigma,\tau+1)-V(\sigma+1,\tau)+V(\sigma+1,\tau+1)}{d_1(\sigma+1)d_2(\tau+1)}>0,$$
$$\begin{pmatrix}\dfrac{2V(\sigma+1,\tau)}{d_1(\sigma+1)^2} & \gamma_1\\ \gamma_1 & \dfrac{2V(\sigma,\tau+1)}{d_2(\tau+1)^2}\end{pmatrix}>0$$

[第 2 象限]

$$\gamma_2>0,$$
$$\gamma_2-\frac{V(\sigma-1,\tau)-V(\sigma-1,\tau+1)+V(\sigma,\tau+1)}{-d_1(\sigma-1)d_2(\tau+1)}>0,$$
$$\begin{pmatrix}\dfrac{2V(\sigma-1,\tau)}{d_1(\sigma-1)^2} & \gamma_2\\ \gamma_2 & \dfrac{2V(\sigma,\tau+1)}{d_2(\tau+1)^2}\end{pmatrix}>0$$

[第 3 象限]

$$\gamma_3>0,$$
$$\gamma_3+\frac{V(\sigma-1,\tau-1)-V(\sigma-1,\tau)-V(\sigma,\tau-1)}{d_1(\sigma-1)d_2(\tau-1)}>0,$$
$$\begin{pmatrix}\dfrac{2V(\sigma-1,\tau)}{d_1(\sigma-1)^2} & \gamma_3\\ \gamma_3 & \dfrac{2V(\sigma,\tau-1)}{d_2(\tau-1)^2}\end{pmatrix}>0$$

[第 4 象限]

$$\gamma_4>0,$$
$$\gamma_4-\frac{V(\sigma,\tau-1)-V(\sigma+1,\tau-1)+V(\sigma+1,\tau)}{-d_1(\sigma+1)d_2(\tau-1)}>0,$$
$$\begin{pmatrix}\dfrac{2V(\sigma+1,\tau)}{d_1(\sigma+1)^2} & \gamma_4\\ \gamma_4 & \dfrac{2V(\sigma,\tau-1)}{d_2(\tau-1)^2}\end{pmatrix}>0$$

注意 1 本論文の安定条件は必要十分条件である．また区分的リアプノフ関数を用いているため矩形の領域ごとにリアプノフ関数を構成できる．そのため，大域的リアプノフ関数による安定条件と比べて安定条件の保守性を回避し，矩形の領域ごとに安定解析が可能である.

3 安定化制御器の設計

この章では，区分的リアプノフ関数による非線形システムの制御器設計について述べる．今，次のような 2 次の非線形システム [9] を考える.

$$\dot{x}=f(x)+g(x)u(x) \tag{5}$$

ここで，$f(x)\in\Re^2$, $g(x)\in\Re^2$, $u(x)\in\Re$ である.

前章で示した自由系のシステムと同様に，(5) 式のパラメトリック表現は次のように表せる.

$$\begin{aligned}
\dot{x}=&\sum_{i=\sigma}^{\sigma+1}\sum_{j=\tau}^{\tau+1}\omega_1^i\omega_2^j f(i,j)\\
&+\sum_{p=\sigma}^{\sigma+1}\sum_{q=\tau}^{\tau+1}\omega_1^p\omega_2^q g(p,q)\sum_{i=\sigma}^{\sigma+1}\sum_{j=\tau}^{\tau+1}\omega_1^i\omega_2^j u(i,j)
\end{aligned} \tag{6}$$

(6) 式の入力項 $g(x)$, $u(x)$ は等価な状態空間表現に置き換えることができる．(6) 式のシステムを安定化する場合，(6) 式を直接扱うことは難しいので p,q を固定した次の 4 つのサブシステムについて考える.

$$\begin{aligned}
\dot{x}&=\sum_{i=\sigma}^{\sigma+1}\sum_{j=\tau}^{\tau+1}\omega_1^i\omega_2^j\left(f(i,j)+g(p,q)u(i,j)\right)\\
&=\sum_{i=\sigma}^{\sigma+1}\sum_{j=\tau}^{\tau+1}\omega_1^i\omega_2^j\hat{f}(i,j)
\end{aligned} \tag{7}$$
$$\hat{f}(i,j)\triangleq f(i,j)+g(p,q)u(i,j)$$

サブシステム (7) 式に対する区分的リアプノフ関数の時間微分は次のように考える.

$$\begin{aligned}
\dot{V}(x)=&\sum_{i=\sigma}^{\sigma+1}\sum_{i=\tau}^{\tau+1}\dot{V}(i,j)-\omega_1^\sigma\omega_1^{\sigma+1}\sum_{j=\tau}^{\tau+1}\omega_2^j E(\cdot,j)\\
&-\omega_2^\tau\omega_2^{\tau+1}\sum_{i=\sigma}^{\sigma+1}\omega_1^i E(i,\cdot)
\end{aligned} \tag{8}$$

ここで，

$$\dot{V}(i,j)=\hat{f}(i,j)^T\left(P_{\sigma\tau}d(i,j)+q_{\sigma\tau}\right),$$
$$E(\cdot,j)=\left(\hat{f}(\sigma+1,j)-\hat{f}(\sigma,j)\right)^T P_{\sigma\tau}\left(d(\sigma+1,j)-d(\sigma,j)\right),$$
$$E(i,\cdot)=\left(\hat{f}(i,\tau+1)-\hat{f}(i,\tau)\right)^T P_{\sigma\tau}\left(d(i,\tau+1)-d(i,\tau)\right)$$

である．サブシステム (7) 式は自由系のシステム (3) 式と同じ構造を持つ．そのため安定化条件は安定条件の $f(i,j)$ を $\hat{f}(i,j)$ に置き換えることで導くことができる.

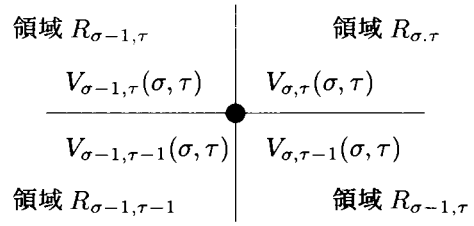


図 1: 共通領域における各領域の V の値

注意 2 (8) 式の $P_{\sigma\tau}$, $q_{\sigma\tau}$ の変数 $V(i,j)$, E_1^{ij}, E_2^{ij} と $\hat{f}(i,j)$ の変数 $u(i,j)$ は双線形の関係である.

一方, (6) 式を安定化する条件は区分的リアプノフ関数 $V(x) > 0$, 全てのサブシステムについて $\dot{V}(x) < 0$, $x \neq 0$ を満足する端点 $V(i,j)$, 変数パラメータ E_1, E_2 と制御器の端点 $u(i,j)$ を導くことと同値である. 安定化条件を行列不等式の一般的な表現では次のようになる.

$$F(x,y) = F_{00} + \sum_{i=1}^{n_x} x_i F_{i0} + \sum_{j=1}^{n_y} y_j F_{0j} + \sum_{i=1}^{n_x}\sum_{j=1}^{n_y} x_i y_j F_{ij} < 0 \qquad (9)$$

ここで, $F_{ij} = F_{ij}^T$ は定数行列, 変数ベクトル x は区分的リアプノフ関数の端点 $V(i,j)$, 変数パラメータ E_1, E_2 とスラック変数, 変数ベクトル y は制御器の端点 $u(i,j)$ である. また, 行列関数 $F(x,y)$ は (6) 式の安定化条件を対角ブロックに配置したものである.

BMI 条件である (9) 式の最適解計算法として, 分枝限定法, 主緩和双対法等などが提案されている. しかし本論文の安定化条件の変数 ($n_x = 160$, $n_y = 24$, $F_{ij} = F_{ij}^T \in \Re^{400\times 400}$) の数が多いため, 実時間内に最適解を算出することは困難である.

そこで本論文では BMI 問題の解法アルゴリズムを提案する. まず始めにそれぞれの領域の BMI で表現された安定化条件に対して, 分枝限定法のアルゴリズム [3,4] から解を求める. 例えば, 領域 R_{ij} の安定化条件における変数は区分的リアプノフ関数の 4 つの端点 $V(i,j)$, 10 個のスラック変数と制御器の 4 つの端点 $u(i,j)$ である. ただしこの手法では 2 次元のシステムの場合, 同一端点であっても領域ごとに異なる最大 4 つの解を有する (図 1) . 次に領域ごとに導出した解に対して, 安定化条件を満足し, かつ領域ごとに異なる解を一致させる制約条件を考慮する. 例えば, 区分的リアプノフ関数の端点における値の制約条件を次のように与える.

$$\begin{aligned} &\min \delta, \\ &\quad |V(\sigma,\tau) - V_{mn}(\sigma,\tau)| < \delta \\ &\quad m = \sigma - 1, \sigma,\ n = \tau - 1, \tau \end{aligned}$$

ここで, $V(\sigma,\tau)$ は 4 領域の共通端点 $d(\sigma,\tau)$ における共通の値, $V_{mn}(\sigma,\tau)$ は領域 R_{mn} において求められた端点 $d(\sigma,\tau)$ における値を表す. 他の変数 E_1, E_2, $u(\sigma,\tau)$ に対しても同様の制約条件を考慮する. 注意 2 で示したように, 安定化条件の変数が双線形の関係にあるため, 変数全てを同時に一致させる計算は実時間内では困難である. そこで, (9) 式の変数 x にあたる $V(i,j)$, E_1, E_2 と変数 y にあたる $u(i,j)$ のどちらか一方を固定し, 一方を端点に共通な値に一致させる制約条件を交互に課して, 逐次的に計算する. これは (9) 式の変数の一方を固定することで, BMI 条件から LMI 条件に帰着させることを意味する. この操作を繰り返すことで, 最終的に全領域の安定化条件を満足する全ての端点における共通解を求める. 以上の手順をまとめると次のようになる.

step 1 定数 $\delta_1(0)$, $\delta_2(0)$, ε_1, $\varepsilon_2(>0)$ を定め, $k := 1$ とする. 各領域 ($R_{\sigma\tau}$) に対して, 分枝限定法を用いて各領域の $F_{\sigma\tau}(x,y) < 0$ の解 x, y を算出する.

step 2 step 1 で求めた y (あるいは x) を固定して (9) 式に代入し, (9) 式を LMI 条件に帰着させ, 制約条件と共に解を求める.

$$\begin{aligned} &\min\ \delta_1(k) \\ &\delta_1(k) < \delta_1(k-1), \\ &F(x,y_0) = F_{00} + \sum_{i=1}^{n_x} x_i F_{i0} < 0 \\ &|V(\sigma,\tau) - V_{mn}(\sigma,\tau)| < \delta_1(k), \\ &|E_1^{\sigma} - E_1^{\sigma\tau}| < \delta_1(k), \quad \sigma \neq \sigma_0 - 1, \sigma_0, \forall\tau \\ &|V(\sigma_0 - 1, \tau_0) - E_1^{\sigma_0 - 1\tau}| < \delta_1(k),\ \tau \neq \tau_0 - 1, \tau_0 \\ &|V(\sigma_0 + 1, \tau_0) - E_1^{\sigma_0\tau}| < \delta_1(k),\ \tau \neq \tau_0 - 1, \tau_0 \\ &|E_2^{\tau} - E_2^{\sigma\tau}| < \delta_1(k), \quad \forall\sigma, \tau \neq \tau_0 - 1, \tau_0 \\ &|V(\sigma_0, \tau_0 - 1) - E_2^{\sigma\tau_0 - 1}| < \delta_1(k),\ \sigma \neq \sigma_0 - 1, \sigma_0 \\ &|V(\sigma_0, \tau_0 + 1) - E_2^{\sigma\tau_0}| < \delta_1(k),\ \sigma \neq \sigma_0 - 1, \sigma_0 \end{aligned}$$

ここで, $d(\sigma_0,\tau_0) = 0$, E_1^{σ} は領域 $R_{\sigma\tau}$ ($\sigma \neq \sigma_0 - 1, \sigma_0, \forall\tau$) における連続条件 (CC) を満たす E_1 の共通解. E_2^{τ} は領域 $R_{\sigma\tau}$ ($\forall\sigma, \tau \neq \tau_0 - 1, \tau_0$) における連続条件 (CC) を満たす E_2 の共通解. y_0 は step 1, 3 における解を表す.

step 3 次に y (あるいは x) を固定して, step 2 と同様な操作を行う.

$$\begin{aligned} &\min \delta_2(k), \\ &\quad \delta_2(k) < \delta_2(k-1) \\ &\quad F(x_0,y) = F_{00} + \sum_{j=1}^{n_y} y_j F_{0j} < 0 \\ &\quad |u(\sigma,\tau) - u_{mn}(\sigma,\tau)| < \delta_2(k) \end{aligned}$$

ここで, $u(\sigma,\tau)$ は共通端点 $d(\sigma,\tau)$ における共通の値, x_0 は step 2 の解を表す.

step 4 $\delta_1(k) < \varepsilon_1$ かつ $\delta_2(k) < \varepsilon_2$ ならば終了．そうでないならば $k = k + 1$ とし，step 2 へ．

提案したアルゴリズムを非線形システムに適用する．

[例題] 以下の非線形システムを考える．

$$\begin{cases} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= (1 - x_1^2)x_2 - x_1 + u \end{cases} \tag{10}$$

(10) 式のタイプ II ファジィシステムを構成するために端点を $d_1 \in [-2\ -1\ 0\ 1\ 2]$，$d_2 \in [-2\ -1\ 0\ 1\ 2]$ とする．構成したタイプ II ファジィシステムに前章のアルゴリズムを適用した結果を示す．ただし，$\delta_1(0) = 0.5$，$\delta_2(0) = 0.5$，$\varepsilon_1 = 1.0 \times 10^{-5}$，$\varepsilon_2 = 1.0 \times 10^{-5}$ とし，$k = 3$ で計算は終了した．表 1 と 2 はそれぞれ区分的リアプノフ関数，制御器のパラメトリック表現を示している．図 2 は区分的リアプノフ関数，図 3 は初期位置 $(x_1(0), x_2(0)) = (-1.8, -0.5), (0.2, 1.0), (1.6, 1.8)$ から制御を行った結果である．

4 結言

本論文では区分的リアプノフ関数による非線形システムの安定化制御器設計手法を提案した．はじめに，区分的リアプノフ関数による非線形システムの標準形，安定条件，安定化条件について述べた．次に BMI 条件で記述された安定化条件の解法アルゴリズムを提案した．最後に非線形システムへの適用を行い有効性を確認した．

表 1: $V(x)$ のパラメトリック表現

$V(d_1(i), d_2(j))$		$d_2(1)$	$d_2(2)$	$d_2(3)$	$d_2(4)$	$d_2(5)$
		-2	-1	0	1	2
$d_1(1)$	-2	9.9994	9.8162	7.7981	6.8710	7.1899
$d_1(2)$	-1	9.9853	7.8374	2.6391	3.2584	5.4459
$d_1(3)$	0	5.0391	1.8045	0	1.7507	9.3007
$d_1(4)$	1	3.1320	3.1755	3.2268	8.1924	9.9076
$d_1(5)$	2	3.4552	5.1521	8.0698	9.9993	9.9739

表 2: $u(x)$ のパラメトリック表現

$u(d_1(i), d_2(j))$		$d_2(1)$	$d_2(2)$	$d_2(3)$	$d_2(4)$	$d_2(5)$
		-2	-1	0	1	2
$d_1(1)$	-2	9.1110	7.6431	5.8414	2.3865	-6.1764
$d_1(2)$	-1	8.4796	7.2975	0.6763	-0.9027	-7.0069
$d_1(3)$	0	8.4996	4.7081	0	-6.1801	-6.7355
$d_1(4)$	1	3.5299	1.6190	-0.9436	-7.6887	-7.9875
$d_1(5)$	2	-9.5992	-5.7535	-8.4086	-4.9244	-3.1446

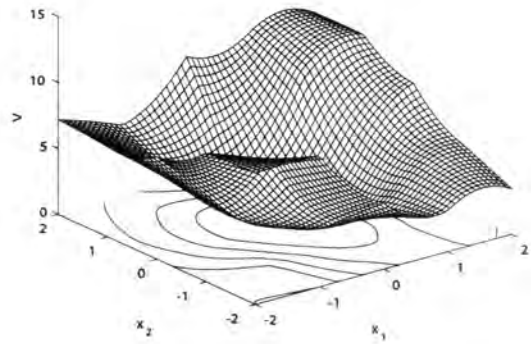


図 2: 区分的リアプノフ関数 $V(x)$

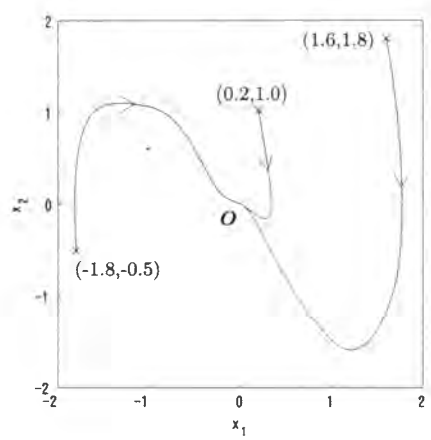


図 3: 制御結果

参考文献

[1] M. Sugeno, "On Stability of Fuzzy Systems Expressed by Fuzzy Rules with Singleton Consequents", *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 7, no. 2, 1999.

[2] S. Boyd, L. E, Ghaoui, E. Feron and V. Balakrishnan, "Linear Matrix inequalities in System and Control Theory", *SIAM*, 1994.

[3] K. C. Goh, M. G. Safonov and G. P. P. Papavassilopoulos, "A Global Optimization Approach for the BMI Problem", *Proc. of CDC*, pp. 2009-2014, 1994.

[4] 高野，渡辺，安田，"大域的 BMI 求解のための分枝限定法" 計測自動制御学会論文集，vol.33, no.7, pp.701-708, 1997.

[5] M. Sugeno and T. Taniguchi, "On Improvement of Stability Conditions for Continuous Mamdani-like Fuzzy Systems", IEEE Tran. Systems, Man, and Cybernetics, Part B (accepted).

[6] 菅野，"非線形システムの区分的パラメトリック近似モデルとリヤプノフ安定条件"，第 31 回制御理論シンポジウム資料, pp.129-134, 2002.

[7] 谷口，菅野，"タイプ 2 ファジィモデルによる非線形システムの解析"，日本ファジィ学会誌. vol.14, no.4, 2002

[8] 谷口，菅野，"Type2 ファジィシステムの安定化制御 "，第 18 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.455-458, 2002

[9] Jean-Jacques E. Slotine and Weiping Li, "Applied Nonlinear Control", Prentice Hall, 1991.

連絡先 〒 351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1
理化学研究所 脳科学総合研究センター
言語知能システム研究チーム　谷口 唯成
tel (048)462-1111, fax (048)467-6450
E-mail taniguti@brain.riken.go.jp

エキスパートからのファジィルールを用いた安定な制御器の設計
A Stable Controller Design with Fuzzy Rules in Accordance with Experts' Knowledge

韓　虎剛
Hugang Han
広島県立大学
Hiroshima Prefectural University

村上　周太
Shuta Murakami
九州工業大学
Kyushu Institute of Technology

Abstract

Although innumerable research has challenged the design of fuzzy control systems from the standpoint of stability, most of them are just considering the fuzzy rules as an approximator to deal with the unknown functions in the plant to be controlled. Also, the fuzzy rules are changed completely from their origins which are obtained based on the views of experts after the parameters in the fuzzy rules are tuned. Actually, the primary idea of fuzzy control is to employ the knowledge of experts to control a plant instead of the algorithm extracted from the mathematical model of the plant. Clearly, if the original fuzzy rules are changed at all, what is the point of fuzzy control? In this paper, we consider a few cases to show how to develop a stable control system which persistently maintains the fuzzy rules in accordance with experts' views.

1 INTRODUCTION

For the last decade or more, a large quantity of research has focused on the adaptive fuzzy control systems, and has achieved success in a sense [1]-[4]. In order to develop such an adaptive fuzzy control system, one of the important approaches was to adopt the Lyapunov synthesis approach, and to consider the fuzzy rules involved in the approach as some approximators to deal with the unknown parts (functions) in the plant to be controlled. Furthermore, the classic adaptive control theory has been merged to compose the update law of parameters involved in the system including the fuzzy rules in the view of "stability" of system to be concerned.

Herein let's consider a question: "What is the initial purpose for using fuzzy control?" One, of the key reasons is that, instead of the computational controllers like a PID obtained from the mathematical models of the plants to be controlled, the control strategy is described in the human-being-oriented form (*i.e.*, if-then rule) obtained by experienced experts. In other words, experts can take reasonable control actions, even in the time-varying conditions of the process, their nonlinearities, and existing disturbances. This means that knowledge about the plant and the control process is well represented in the if-then rules.

Apparently, in an adaptive fuzzy control system, if the fuzzy rules are only considered as the (fuzzy) approximators and finally their parameters are tuned completely differently from their *original faces*, then there are two questions that arise: (1) Why fuzzy rules? If we just want to approximate some unknown functions in the plant, some other soft computing methods like neural networks seem more attractive; and (2) Why fuzzy control? If the experienced fuzzy rules are almost all changed in the control process, where is the knowledge of experts going? Moreover, we should note that in the case of (1), we tune the parameters in the fuzzy approximators only from the standpoint of system stability, and as a result, the fuzzy approximators, in most cases, are not *real* approximators of their corresponding functions at all, because the errors between the both are sometimes very huge. Therefore, once we say fuzzy control, it seems that we should keep the original fuzzy rules. In this way, however, how to maintain the stability of the whole control system is a question we have to answer.

In this paper, we consider a few cases to show how to develop a stable fuzzy control system where the experts' know-how about the plant and the control process is utilized wherever possible.

2 PROBLEM STATEMENT

This paper focuses on the design of adaptive fuzzy control algorithms for a class of nonlinear systems whose equation of motion can be expressed in the canonical form:

$$x^{(n)} = f(X(t)) + b(X(t))u(t) \tag{1}$$

where $X^T(t) = [x(t), \dot{x}(t), \ldots, x^{(n-1)}(t)]$ is the state vector, $u(t)$ is the control input, f is an unknown linear or nonlinear function of X, and b is the control gain. It should be noted that more general classes of nonlinear systems could be transformed into this structure [5]. For the sake of simplicity throughout the remainder of this paper, we will omit time t unless a confusion arises.

The control objective is to force the output x to follow a specified desired trajectory. Let x_d be the desired trajectory and define the tracking error,

$$\tilde{x} = x - x_d \tag{2}$$

The problem is thus to design a controller u for (1) which ensures that $\tilde{x} \to 0$ as $t \to \infty$ while maintaining

the stability of all signals involved in the system. Here in this paper, we take $b = 1$ for the sake of stressing a clear design procedure.

Now, we adopt the variable structure theory to construct our adaptive fuzzy control system. The sliding mode hyperplane is firstly defined as

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \tilde{x} \quad \text{with } \lambda > 0 \tag{3}$$

where λ defines the bandwidth of the error dynamics of the system. The equation defines a time-varying hyperplane in R^n on which the tracking error $\tilde{x}$ decays exponentially to zero, so that perfect tracking can be asymptotically obtained by maintaining this condition. In this case, the control objective becomes the design of controller to force $s \to 0$ as $t \to \infty$.

The time derivative of the error metric can be written as

$$\dot{s} = f + u - x_d^{(n)} + \Lambda^T \tilde{X} \tag{4}$$

where $\Lambda^T = [0, \lambda^{n-1}, (n-1)\lambda^{n-2}, \ldots, (n-1)\lambda]$, $\tilde{X}^T = [\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, \cdots, \tilde{x}^{(n-1)}]$. Referring to system (1), it naturally suggests that when f is known, a controller of form,

$$u = -ks - f + x_d^{(n)} - \Lambda^T \tilde{X} \tag{5}$$

leads to $\dot{s}s = -ks^2$, and hence, $\tilde{x} \to 0$ as $t \to \infty$, where $k > 0$. However, as mentioned, the function f is unavailable. Therefore, the problem is how u can be determined when a system involves such an unknown function. Here, let's classify what cases can exist in such a system before we determine the controller. Generally, there are three cases: the first case is that we do not have any information available about the functions so that we need to approximate them from scratch; the second case is that we already have good knowledge about the functions, which is referred to as a *well-tuned-fuzzy-approximator* in this paper; and the third case is that there is a so-called *well-tuned-fuzzy-controller* given by experts about the control process. For the latter two cases, the knowledge about the functions and the control process, clearly, should be utilized as much as possible in the development of the control system. In the next section, we will give details to show how to develop a stable controller in the three cases.

3 STABLE FUZZY CONTROLLERS

3.1 No knowledge available

It is an obstacle to have such an unknown function f on the process of system development. In order to deal with it, one way is to approximate the unknown functions. Thinking of the approximator, a lot of literature employ the fuzzy approximator. Here we adopt this idea for the time being. Let us denote $f^*(X) = W_f^{*T} G_f(X)$ to be the fuzzy approximator of the unknown function f [4]. Then, there is a small positive value ε_f^* such that, the error,

$$\varepsilon_f = f - f^* \tag{6}$$

which is referred to as *reconstruction error*, satisfies the following inequality,

$$|\varepsilon_f| < \varepsilon_f^* \tag{7}$$

Apparently, the *optimal* vector W_f^* is unknown while $G_f(X)$ is an available vector function in the fuzzy approximator $f^*(X) = W_f^{*T} G_f(X)$, therefore, as usual, its estimate, denoted as $\hat{f}(X) = \hat{W}_f^T G_f(X)$ is adopted, and will be tuned based on the error dynamics s.

Now, we are ready to develop our control system. Inspired by the above control structure in (5), our controller is now described as

$$u = u_{fd} + u_{et} + u_{ec} \tag{8}$$

where u_{fd} is a linear feedback component described as

$$u_{fd} = x_d^{(n)} - \Lambda^T \tilde{X} - ks \tag{9}$$

u_{et} is an estimate component for the unknown function f and described as

$$u_{et} = -\hat{f} = -\hat{W}_f^T G_f(X) \tag{10}$$

where $\hat{W}_f$ is a tunable parameter vector and tuned by adaptive law,

$$\dot{\hat{W}}_f = \Gamma_f G_f(X) s \tag{11}$$

where $\hat{W}_f$ is the estimate of W_f^*, and Γ_f is an appropriate symmetric positive definite matrix which determines the adaptation rate. And u_{ec} is a complement component, which complements the error between f and $\hat{f}$, described as

$$u_{ec} = -\hat{\varepsilon}_f \text{sgn}(s) \tag{12}$$

where $\hat{\varepsilon}_f$ is the estimate of ε_f^*. $\hat{\varepsilon}_f$ also has a purpose of avoiding *a prior* knowledge about the reconstruction error. $\hat{\varepsilon}_f$ is estimated by,

$$\dot{\hat{\varepsilon}}_f = \gamma_f |s| \tag{13}$$

where γ_f is the adaptation rate. A block diagram of this controller structure is depicted in Fig.1, where the block labeled "Filter" is an operation system which generates $x_n^{(n)}, \tilde{X}$, and s form signals x_d, and x.

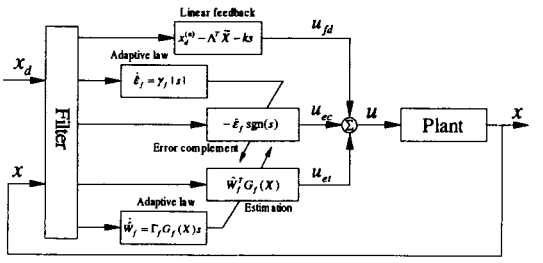


Figure 1: Closed-loop control system without knowledge available

We start the system stability analysis by defining the Lyapunov function candidate:

$$V = \frac{1}{2}\left(s^2 + \tilde{W}_f \Gamma_f^{-1} \tilde{W}_f + \gamma_f \tilde{\varepsilon}_f^2\right) \tag{14}$$

where,

$$\tilde{W}_f = \hat{W}_f - W_f^* \tag{15}$$
$$\tilde{\varepsilon}_f = \hat{\varepsilon}_f - \varepsilon_f^* \tag{16}$$

From (4), (6) and (8), $\dot{s}$ can be rewritten as

$$\begin{aligned} \dot{s} &= -ks + f - \hat{f} - \hat{\varepsilon}_f \mathrm{sgn}(s) \\ &= -ks + \varepsilon_f + f^* - \hat{f} - \hat{\varepsilon}_f \mathrm{sgn}(s) \\ &= -ks + \tilde{f} + \varepsilon_f - \hat{\varepsilon}_f \mathrm{sgn}(s) \end{aligned} \tag{17}$$

Taking the derivative of both sides of (14), and substituting (11), (13), and (17) into it, we have

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \tilde{W}_f^T \Gamma_f^{-1} \dot{\hat{W}}_f + \gamma_f^{-1} \tilde{\varepsilon}_f \dot{\hat{\varepsilon}}_f \\ &= -ks^2 + \tilde{f}s + \varepsilon_f s - \hat{\varepsilon}_f |s| - \tilde{f}s - \tilde{\varepsilon}_f s \\ &\leq -ks^2 + |\varepsilon_f||s| - \hat{\varepsilon}_f |s| - \tilde{\varepsilon}_f s \\ &\leq -ks^2 \end{aligned} \tag{18}$$

It means all signals $(s, \hat{W}_f, \hat{\varepsilon}_f)$ are bounded, and $s \to 0$ as $t \to \infty$; Furthermore, tracking error $\tilde{x} \to 0$ as $t \to \infty$.

Q.E.D.

Remark 1 It should be noted that the bound of ε_f^* does not need to be known in the approach above. In this way, in the approximation of f the necessity to assume *a prior* knowledge of the bound on the reconstruction error can be removed. Of course, if the bound ε_f^* is given, then the complement component (12) can be replaced by

$$u_{ec} = -\varepsilon_f^* \mathrm{sgn}(s)$$

Consequently, the estimate $\hat{\varepsilon}_f$ (13) is no longer needed, and stability is surely guaranteed.

Remark 2 The parameters in the fuzzy approximator are completely tuned by adaptive law (11) only based on the needs of the system stability. In other words, the fuzzy approximator does not involve any knowledge from the experts, and consequently the approximateness is sometimes very poor though the control performance is good. Therefore, strictly speaking, in our view the control system, even if it involves fuzzy rules, is no longer a fuzzy control system, but an adaptive control system.

3.2 Well-tuned-fuzzy-approximator

When we try to develop a controller for system (1), somehow we have to deal with the unknown function f. The second case is that some experts have enough knowledge about the unknown function. It means the experts can relatively accurately describe the function by fuzzy rules. Therefore, in this case the well-tuned-fuzzy-approximator should be utilized as much as possible. In other words, we do not need to approximate the unknown function from scratch at all.

Here in this subsection, suppose that we have the well-tuned-fuzzy-approximator, in symbol $\mathcal{F}$, for the unknown function f. Let ε_f be the error between f and $\mathcal{F}$ as follows.

$$\varepsilon_f = f - \mathcal{F} \tag{19}$$

which is referred to as *approximator error*. It is reasonable to suppose that there exists a small positive value ε_f^* as well so that

$$|\varepsilon_f| \leq \varepsilon_f^* \tag{20}$$

and referring to the controller in the previous subsection, it is natural to compose the controller in this case as

$$u = u_{fd} + u_{fa} + u_{ec} \tag{21}$$

where u_{fd}, and u_{ec} are the same as (9), and (12), respectively, and u_{fa} is the well-tuned-fuzzy-approximator $\mathcal{F}$:

$$u_{fa} = -\mathcal{F} \tag{22}$$

Clearly, the parameters in $\mathcal{F}$ do not need to be tuned at all. A block diagram of this controller structure is depicted in Fig.2.

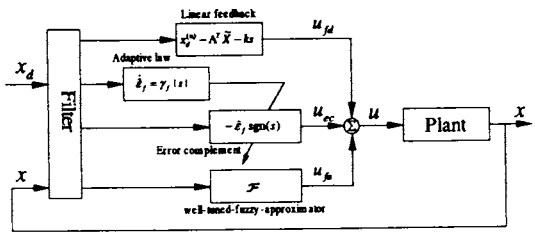


Figure 2: Closed-loop control system with the well-tuned-fuzzy-approximator

The control system stability analysis can be done in the same way as in the previous subsection 3.1.

Remark 3 As an approximator of an unknown function, $\mathcal{F}$ is not just being described in the form of fuzzy rules, but also in other forms like neural networks. If $\mathcal{F}$ is not a fuzzy approximator, then the system above is not called a *fuzzy* control system any more. Actually, it seems that there are only a few cases where we can get the fuzzy approximators for the specific functions in the control system.

3.3 Well-tuned-fuzzy-controller

Generally, a fuzzy control system can be depicted as Fig.3 where the block Filter generates input signals like tracking error or its difference from x_d, and x, and the block $\mathcal{FC}$ represents the fuzzy controller, which generates control moments u to the plant from all the input signals.

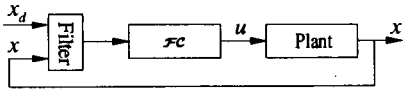


Figure 3: The general fuzzy control system

In quite a few cases, experts or operators may have very good knowledge on the control process in terms of fuzzy rules, *i.e., well-tuned-fuzzy-controller*, to effectively control a specific plant. Therefore, the well-tuned-fuzzy-controller should be involved in the development of the control system as much as possible if it is available.

Here, in this subsection, suppose that we have the well-tuned-fuzzy-controller $\mathcal{FC}$. From (5), the controller is composed of $-ks - f + x_d^{(n)} - \Lambda^T \tilde{X}$ $(\equiv u_T)$, and here the control input (Fig.3) is determined by $\mathcal{FC}$ $(\equiv u_{\mathcal{F}})$. This means $u_{\mathcal{F}}$ is a kind of description (approximation) of u_T, and not just for the unknown function f. Define the error between $u_{\mathcal{F}}$ and u_t as follows:

$$\varepsilon_u = u_{\mathcal{F}} - u_T \tag{23}$$

Because $u_{\mathcal{F}}$ can effectively control the plant as well, it is reasonable to suppose that there exists a positive value ε_u^* so that

$$|\varepsilon_u| \leq \varepsilon_u^* \tag{24}$$

Referring to (21), the controller involving the well-tuned-fuzzy-controller $\mathcal{FC}$ is composed of

$$u = u_{fd} + u_{\mathcal{F}} + u_{ec} \tag{25}$$

where u_{fd} is the linear feedback component described as

$$u_{fd} = -\kappa s, \qquad \kappa > 0 \tag{26}$$

And u_{ec} is the complement component, which complements the error between $u_{\mathcal{F}}$ and u_T, described as

$$u_{ec} = -\hat{\varepsilon}_u \mathrm{sgn}(s) \tag{27}$$

where $\hat{\varepsilon}_u$ is the estimate of ε_u^* that is estimated by,

$$\dot{\hat{\varepsilon}}_u = \gamma_u |s| \tag{28}$$

where γ_u is the adaptation rate. A block diagram of this controller structure is depicted in Fig.4.

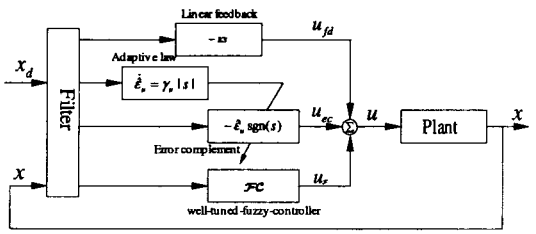


Figure 4: Closed-loop control system with the well-tuned-fuzzy-controller

The stability of the closed-loop system described by (1)-(3), and (25)-(28) is established in the following theorem. The proof is similar to the stability analysis in subsection 3.1 and omitted here because of the shortage of space.

Theorem 1 *If the plant (1) is controlled by (25)-(27) with the adaptive law (28), then tracking error (2) will be shrunk to zero while maintaining all signals involved in the system bounded.*

Remark 4 At first glance, Figs. 2 and 4 have the same structure. However, there are two points that deserve our attention. The first one is that the linear feedback component u_{fd} in Fig.4 consists only of s while combining with $s, x_d^{(n)}$, and $\tilde{X}$ in Fig.2, in which $x_d^{(n)}$, and $\tilde{X}$ are included in $\mathcal{FC}$ in Fig.4. The second one is that $\mathcal{FC}$ in Fig.4 is an independent controller, which can effectively control the plant in practice, and u_{fd}, and u_{ec} are just auxiliary components in case of system stability being threatened, while $\mathcal{F}$ in Fig.2 is just an estimator, which deals with the unknown function f in the plant.

4 CONCLUSION

Directly employing the experienced experts' knowledge about the control process is the most important reason why fuzzy control has been greatly welcomed practically and theoretically for more than two decades. However, in most cases the adaptive fuzzy control systems proposed so far laid stress on system stabilities via the relevant parameters' tuning, rather than the involvement of experts' knowledge. In this paper, we gave details showing how to develop an adaptive control system in which experts' knowledge is taken into account wherever possible.

References

[1] C.-Y. Su & Y. Stepanenko, "Adaptive control of a class of nonlinear systems with fuzzy logic," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 2, pp. 258-294, 1994.

[2] M. M. Polycarpou, "Stable adaptive neural control scheme for nonlinear systems," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 41, no. 3, pp. 447-451, 1996.

[3] M. M. Polycarpou & M. J. Mears, "Stable adaptive tracking of uncertain systems using nonlinear parametrized online approximators," *Int. J. Control*, vol. 73, no. 3, pp. 363-384, 1998.

[4] H. Han, C.-Y. Su & Y. Stepanenko, "Adaptive control of a class of nonlinear systems with nonlinearly parameterized fuzzy approximators," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 315-323, 2001.

[5] R. M. Sanner & J.-J. E. Slotine, "Gaussian networks for direct adaptive control," *IEEE Trans. on Neural networks*, vol. 3, no. 6, pp.837-863, 1992.

[連絡先] 〒 727-0023 広島県庄原市七塚町 562 番地
広島県立大学 経営情報学科
韓　虎剛
Tel./Fax: (08247)4-1706
Email: hhan@bus.hiroshima-pu.ac.jp

スイッチングリアプノフ関数に基づく制御器設計

Nonlinear Control based on Switching Lyapunov Function

大竹 博　　田中 一男

Hiroshi Ohtake and Kazuo Tanaka

電気通信大学 知能機械工学科

Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems

The University of Electro-Communications

Abstract This paper presents a controller design condition based on a switching Lyapunov function for a class of nonlinear systems. In our previous papers [1, 2], we proposed a switching fuzzy model and a switching Lyapunov function for open-loop systems. The switching Lyapunov function is constructed by mirroring structure of the switching fuzzy model. In this paper, stabilization conditions to design a switching fuzzy controller are derived. To avoid discontinuity of the switching control inputs, we derive a continuity condition of control inputs. A design example illustrates the utility of this approach.

1 はじめに

近年，ファジィモデルに基づく制御に関する多くの研究成果が報告されている [3, 4, 5, 6, 7, 8]．ファジィモデルに基づく制御では，システムのファジィモデルを構築するために主に 2 つの方法がある [8]．1 つは sector nonlinearity の考え方を用いてシステムを厳密にファジィモデルで表現する方法，もう 1 つは local approximation によってシステムを近似的に構築する方法である．どちらもシステムの複雑さによってファジィモデルの規則数が爆発的に増加してしまい，制御器設計が困難になる．規則数の増加を抑制するために，筆者らはスイッチングファジィモデルを提案した [1]．このスイッチングファジィモデルには 2 つの特徴がある．1 つは，分割された領域内でローカルに表現された高木・菅野 (T-S) ファジィモデルを領域ごとにスイッチすること，もう 1 つは従来のファジィモデルに比べて規則の同時発火数を減らすことができることである．

一方，ファジィ制御系の安定解析では 2 次形式リアプノフ関数を用いることが多い．しかし，2 次形式リアプノフ関数に基づく安定条件は保守性が強くなることが指摘されており，保守性を緩めるための研究が行われている [10, 11]．筆者らは文献 [2] において，スイッチングファジィモデルに対応したスイッチングリアプノフ関数を提案している．開ループシステムに対して，スイッチングリアプノフ関数に基づく安定条件が 2 次形式リアプノフ関数に基づく安定条件よりも保守性が緩くなることを示した．

本論文ではスイッチングファジィ制御器の設計条件を導出する．スイッチングファジィ制御器はスイッチングファジィモデルと同様に，分割された領域内でローカルに構成されたファジィ制御器を領域ごとにスイッチする．しかし，このような制御入力はスイッチするたび，不連続な切り替えが生じる．これは実機に適用する段階で問題になる可能性がある．本論文では制御入力の連続性を考慮した制御器設計法も合わせて提案する．例題によってスイッチングファジィ制御器の有効性を示す．

2 スイッチングファジィモデルの構築 [2]

スイッチングファジィモデルを式 (1) に示す．このファジィモデルは領域 q ごとにローカルな T-S ファジィモデルを持ち，それらをスイッチさせることで全体のモデルを表す．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\sum_{q=1}^{Q}\sum_{i=1}^{r} v_q(\boldsymbol{x}(t))h_{qi}(\boldsymbol{x}(t))\left(\boldsymbol{A}_{qi}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{B}_{qi}\boldsymbol{u}(t)\right) \quad (1)$$

ここで，

$$v_q(\boldsymbol{x}(t))=\begin{cases}1, & \boldsymbol{x}(t)\in \text{Region } q,\\ 0, & \boldsymbol{x}(t)\notin \text{Region } q,\end{cases}$$

である．q 番目の領域は

$$R_q(s_{1q}, s_{2q}, \cdots, s_{nq}),$$

$$s_{kq}=\begin{cases}1 & x_k(t)\geq 0\\ 0 & x_k(t)<0,\ k=1,2,\cdots,n,\end{cases}$$

のように表現できる．つまり，それぞれの領域は象限に対応している．本章ではスイッチングファジィモデルの構築法 [2] について簡単に示す．

次のような非線形システムを考える．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\begin{bmatrix} f_1(\boldsymbol{x}(t))\\ f_2(\boldsymbol{x}(t))\\ \vdots\\ f_n(\boldsymbol{x}(t))\end{bmatrix}+\begin{bmatrix} g_{11}(\boldsymbol{x}(t)) & g_{21}(\boldsymbol{x}(t)) & \cdots & g_{\eta 1}(\boldsymbol{x}(t))\\ g_{12}(\boldsymbol{x}(t)) & g_{22}(\boldsymbol{x}(t)) & \cdots & g_{\eta 2}(\boldsymbol{x}(t))\\ \vdots & & & \\ g_{1n}(\boldsymbol{x}(t)) & g_{2n}(\boldsymbol{x}(t)) & \cdots & g_{\eta n}(\boldsymbol{x}(t))\end{bmatrix}\boldsymbol{u}(t) \quad (2)$$

ここで，$\boldsymbol{x}(t)=[x_1(t)\ x_2(t)\ \cdots\ x_n(t)]^T$ は状態変数ベクトル，$\boldsymbol{u}(t)=[u_1(t)\ u_2(t)\ \cdots\ u_\eta(t)]^T$ は入力ベクトルである．$f_j(\boldsymbol{x}(t))$ と $g_{ej}(\boldsymbol{x}(t))$ はそれぞれスカラな線形もしくは非線形関数であり，$j=1, 2, \cdots, n$, $e=1, 2, \cdots, \eta$ である．それぞれの $f_j(\boldsymbol{x}(t))$ および $g_{ej}(\boldsymbol{x}(t))$ に対して sector nonlinearity[2] を適用することにより，次のようなスイッチングファジィモデルを得る．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\begin{bmatrix} f_1(\boldsymbol{x}(t))\\ f_2(\boldsymbol{x}(t))\\ \vdots\\ f_n(\boldsymbol{x}(t))\end{bmatrix}+\begin{bmatrix} g_{11}(\boldsymbol{x}(t)) & g_{21}(\boldsymbol{x}(t)) & \cdots & g_{\eta 1}(\boldsymbol{x}(t))\\ g_{12}(\boldsymbol{x}(t)) & g_{22}(\boldsymbol{x}(t)) & \cdots & g_{\eta 2}(\boldsymbol{x}(t))\\ \vdots & & & \\ g_{1n}(\boldsymbol{x}(t)) & g_{2n}(\boldsymbol{x}(t)) & \cdots & g_{\eta n}(\boldsymbol{x}(t))\end{bmatrix}\boldsymbol{u}(t)$$

$$= \sum_{q=1}^{Q} v_q(\boldsymbol{x}(t)) \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{\rho_1} h_{qi1}(\boldsymbol{x}(t))\boldsymbol{a}_{qi1}\boldsymbol{x}(t) \\ \quad + \sum_{i=1}^{\gamma_1} w_{qi1}(\boldsymbol{x}(t))\boldsymbol{b}_{qi1}\boldsymbol{u}(t) \\ \sum_{i=1}^{\rho_2} h_{qi2}(\boldsymbol{x}(t))\boldsymbol{a}_{qi2}\boldsymbol{x}(t) \\ \quad + \sum_{i=1}^{\gamma_2} w_{qi2}(\boldsymbol{x}(t))\boldsymbol{b}_{qi2}\boldsymbol{u}(t) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{\rho_n} h_{qin}(\boldsymbol{x}(t))\boldsymbol{a}_{qin}\boldsymbol{x}(t) \\ \quad + \sum_{i=1}^{\gamma_n} w_{qin}(\boldsymbol{x}(t))\boldsymbol{b}_{qin}\boldsymbol{u}(t) \end{bmatrix},$$

$$= \sum_{q=1}^{Q} \sum_{i_1=1}^{\rho_1} \sum_{i_2=1}^{\rho_2} \cdots \sum_{i_n=1}^{\rho_n} \sum_{i_{(n+1)}=1}^{\gamma_1} \sum_{i_{(n+2)}=1}^{\gamma_2} \cdots \sum_{i_{(2n)}=1}^{\gamma_n} v_q(\boldsymbol{x}(t)) h_{qi_1 1}(\boldsymbol{x}(t)) \times h_{qi_2 2}(\boldsymbol{x}(t)) \times \cdots \times h_{qi_n n}(\boldsymbol{x}(t)) w_{qi_{(n+1)} 1}(\boldsymbol{x}(t)) \times w_{qi_{(n+2)} 2}(\boldsymbol{x}(t)) \times \cdots \times w_{qi_{(2n)} n}(\boldsymbol{x}(t)) \times \left\{ \begin{bmatrix} \boldsymbol{a}_{qi_1 1} \\ \boldsymbol{a}_{qi_2 2} \\ \vdots \\ \boldsymbol{a}_{qi_n n} \end{bmatrix} \boldsymbol{x}(t) + \begin{bmatrix} \boldsymbol{b}_{qi_{(n+1)} 1} \\ \boldsymbol{b}_{qi_{(n+2)} 2} \\ \vdots \\ \boldsymbol{b}_{qi_{(2n)} n} \end{bmatrix} \boldsymbol{u}(t) \right\}$$

$$= \sum_{q=1}^{Q} \sum_{i=1}^{r} v_q(\boldsymbol{x}(t)) \hat{h}_{qi}(\boldsymbol{x}(t)) \left(\boldsymbol{A}_{qi}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}_{qi}\boldsymbol{u}(t)\right)$$

ここで,

$$\rho_j = \begin{cases} 1, & f_j \text{ が線形}, \\ 2, & f_j \text{ が非線形}, \end{cases}$$

$$\beta_{ej} = \begin{cases} 1, & g_{ej} \text{ が定数}, \\ 2, & g_{ej} \text{ が } \boldsymbol{x}(t) \text{ の関数}, \end{cases}$$

$$\gamma_j = \prod_{e=1}^{\eta} \beta_{ej},$$

$$r = \rho_1 \times \rho_2 \times \cdots \times \rho_n \times \gamma_1 \times \gamma_2 \times \cdots \times \gamma_n,$$

$$\boldsymbol{a}_{qi_1 1} = [a_{1l(1,q,i_1)i_1 1}\ a_{2l(2,q,i_1)i_1 1}\ \cdots\ a_{nl(n,q,i_1)i_1 1}],$$

$$\boldsymbol{a}_{qi_2 2} = [a_{1l(1,q,i_2)i_2 2}\ a_{2l(2,q,i_2)i_2 2}\ \cdots\ a_{nl(n,q,i_2)i_2 2}],$$

$$\vdots$$

$$\boldsymbol{a}_{qi_n n} = [a_{1l(1,q,i_n)i_n n}\ a_{2l(2,q,i_n)i_n n}\ \cdots\ a_{nl(n,q,i_n)i_n n}],$$

$$l(j,q,i_k) = 2^{(2-s_{jq}-i_k)^2},$$

$$\boldsymbol{b}_{qi_{(n+1)} 1} = [b_{q1i_{(n+1)} 1}\ b_{q2i_{(n+1)} 1}\ \cdots\ b_{q\eta i_{(n+1)} 1}],$$

$$\boldsymbol{b}_{qi_{(n+2)} 2} = [b_{q1i_{(n+2)} 2}\ b_{q2i_{(n+2)} 2}\ \cdots\ b_{q\eta i_{(n+2)} 2}],$$

$$\vdots$$

$$\boldsymbol{b}_{qi_{(2n)} n} = [b_{q1i_{(2n)} n}\ b_{q2i_{(2n)} n}\ \cdots\ b_{q\eta i_{(2n)} n}],$$

$$b_{qeij} = \begin{cases} \max\limits_{\boldsymbol{x}(t)\in R_q} g_{ej}(\boldsymbol{x}(t)), \\ \min\limits_{\boldsymbol{x}(t)\in R_q} g_{ej}(\boldsymbol{x}(t)), \end{cases}$$

$$\sum_{i=1}^{r} \hat{h}_{qi}(\boldsymbol{x}(t)) := \sum_{i_1=1}^{\rho_1} \sum_{i_2=1}^{\rho_2} \cdots \sum_{i_n=1}^{\rho_n} \sum_{i_{(n+1)}=1}^{\gamma_1} \sum_{i_{(n+2)}=1}^{\gamma_2} \cdots \sum_{i_{(2n)}=1}^{\gamma_n} \times h_{qi_1 1}(\boldsymbol{x}(t)) h_{qi_2 2}(\boldsymbol{x}(t)) \times \cdots \times h_{qi_n n}(\boldsymbol{x}(t)) \times w_{qi_{(n+1)} 1}(\boldsymbol{x}(t)) w_{qi_{(n+2)} 2}(\boldsymbol{x}(t)) \times \cdots \times w_{qi_{(2n)} n}(\boldsymbol{x}(t)).$$

Q は領域の総数を表す．各領域のファジィモデルは r 個の規則を持つ．

Remark 1 $f_j(\boldsymbol{x}(t))$ が σ_j 個の非線形項を持つ ($f_j(\boldsymbol{x}(t))$ が線形関数の場合は $\sigma_j = 0$) と仮定する．このとき，通常の *T-S* ファジィモデルでは一般に $2^{\sum_{j=1}^{n} \sigma_j} + \prod_{j=1}^{n} \gamma_j$ 個の規則が同時に発火する *[2]*．これに対して，スイッチングファジィモデルでは，r 個の規則が同時に発火する．スイッチングファジィモデルの同時発火数は非線形項の数 σ_j に対して独立である．スイッチングファジィモデルの規則同時発火数は通常のファジィモデルに比べて同じ，もしくは，少なくすることができる．

3 制御器設計

スイッチングファジィモデル (1) に対する制御器を設計するために，並列分散的補償 (PDC)[3, 4] の考え方を用いて，次のような制御器を考える．

$$\boldsymbol{u}(t) = -\sum_{q=1}^{Q} \sum_{i=1}^{r} v_q(\boldsymbol{x}(t)) \hat{h}_{qi}(\boldsymbol{x}(t)) \boldsymbol{F}_{qi} \boldsymbol{x}(t). \tag{3}$$

PDC ファジィ制御器の設計は，各制御規則の後件部のフィードバックゲイン $\boldsymbol{F}_{qi}$ を決定することである．式 (3) を式 (1) に代入することにより，スイッチングファジィ制御系は次のようになる．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \sum_{q=1}^{Q} \sum_{i=1}^{r} \sum_{j=1}^{r} v_q(\boldsymbol{x}(t)) \hat{h}_{qi}(\boldsymbol{x}(t)) \hat{h}_{qj}(\boldsymbol{x}(t)) \times \left(\boldsymbol{A}_{qi} - \boldsymbol{B}_{qi}\boldsymbol{F}_{qj}\right) \boldsymbol{x}(t). \tag{4}$$

$\boldsymbol{F}_{qi}$ は Theorem 1 に示す制御器設計条件 (6), (7), (8), (9) を解くことによって求めることができる．

スイッチングリアプノフ関数 [2] はスイッチングファジィモデル (1) の構造を反映し，次のように定義される．

$$V(\boldsymbol{x}(t)) = \begin{cases} \boldsymbol{x}^T(t)\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{x}(t), & \boldsymbol{x}(t) \in \text{Region 1}, \\ \boldsymbol{x}^T(t)\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{x}(t), & \boldsymbol{x}(t) \in \text{Region 2}, \\ \quad\vdots & \\ \boldsymbol{x}^T(t)\boldsymbol{P}_Q\boldsymbol{x}(t), & \boldsymbol{x}(t) \in \text{Region } Q. \end{cases} \tag{5}$$

筆者らは，すでに $\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{0}$ のときのスイッチングファジィモデルに対する安定条件を導出している [2]．本章では，スイッチングリアプノフ関数に基づく制御器設計条件を導出する．

Theorem 1 *(6), (7), (8), (9)* を満足する行列 $\boldsymbol{P}_q$ と $\boldsymbol{F}_{qi}$ が存在するならば，スイッチングファジィモデル *(1)* はスイッチングファジィ制御器 *(3)* によって漸近安定化することができる．

$$\boldsymbol{P}_q > \boldsymbol{0},\ \forall q, \tag{6}$$

$$\boldsymbol{A}_{qi}^T\boldsymbol{P}_q + \boldsymbol{P}_q\boldsymbol{A}_{qi} - \boldsymbol{F}_{qi}^T\boldsymbol{B}_{qi}^T\boldsymbol{P}_q - \boldsymbol{P}_q\boldsymbol{B}_{qi}\boldsymbol{F}_{qi} < \boldsymbol{0},\ \forall i, q, \tag{7}$$

$$\boldsymbol{A}_{qi}^T\boldsymbol{P}_q + \boldsymbol{P}_q\boldsymbol{A}_{qi} + \boldsymbol{A}_{qj}^T\boldsymbol{P}_q + \boldsymbol{P}_q\boldsymbol{A}_{qj} - \boldsymbol{F}_{qj}^T\boldsymbol{B}_{qi}^T\boldsymbol{P}_q - \boldsymbol{P}_q\boldsymbol{B}_{qi}\boldsymbol{F}_{qj} - \boldsymbol{F}_{qi}^T\boldsymbol{B}_{qj}^T\boldsymbol{P}_q - \boldsymbol{P}_q\boldsymbol{B}_{qj}\boldsymbol{F}_{qi} < \boldsymbol{0}\ \forall i, q,\ \ i < j. \tag{8}$$

ここで，$\boldsymbol{P}_q$ は領域の境界上における連続性を満足するように次のような内部構造を持つ．

$$\boldsymbol{P}_q = \begin{bmatrix} P_{11\zeta(1,q)} & P_{12\psi(1,2,q)} & \cdots & P_{1n\psi(1,n,q)} \\ P_{12\psi(1,2,q)} & P_{22\zeta(2,q)} & \cdots & P_{2n\psi(2,n,q)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{1n\psi(1,n,q)} & P_{2n\psi(2,n,q)} & \cdots & P_{nn\zeta(n,q)} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\zeta(k,q) = 2 - s_{kq} = 1 \text{ or } 2,$$

$$\psi(k,w,q) = -s_{kq} - 2s_{wq} + 4 = 1,2,3 \text{ or } 4.$$

(証明略)

残念なことに，制御器設計条件 (7) と (8) は $\boldsymbol{P}_q$ と $\boldsymbol{F}_{qi}$ に対して LMI にはなっていない．平方完成 [11] を行うことによって，これらの条件を LMI に変形することはできる．しかし，一般にこの平方完成 [11] によって得られた LMI 条件は保守的になってしまう．そこで，本研究では，次のような設計手法を提案する．また，設計手法 II では，制御入力の連続性を考慮に入れた設計手法を提案する．

3.1 設計手法 I

各領域におけるローカルな線形モデル $(\boldsymbol{A}_{qi}, \boldsymbol{B}_{qi})$ に対して線形制御理論を適用し，それぞれのローカルなフィードバックゲイン $\boldsymbol{F}_{qi}$ をはじめに決定する．これにより，制御器設計条件 (6)-(9) は $\boldsymbol{P}_q$ に対しての LMI となり，これらの条件は Matlab などの数値計算ソフトウェアによって解くことができるようになる．もし，条件が解けなければ，再び，各領域におけるローカルな線形モデルに対して線形制御理論を適用し，別の $\boldsymbol{F}_{qi}$ を求める．

筆者らが行った限りでは，設計手法 I は平方完成を用いた手法よりも制御器を設計しやすいという結果を得ている．しかし，このようにして求めた制御器では，領域が切り替わる際に制御入力がたびたび不連続になる．これは実機に適用する段階で問題になる可能性がある．次に示す設計手法 II では，制御入力の連続性を保証することができる．

3.2 設計手法 II

はじめに，ローカルな線形モデル $(\boldsymbol{A}_{1i}, \boldsymbol{B}_{1i})$ および $(\boldsymbol{A}_{Qi}, \boldsymbol{B}_{Qi})$ に対して，それぞれに線形制御理論を適用し，ローカルなフィードバックゲイン $\boldsymbol{F}_{1i}$ および $\boldsymbol{F}_{Qi}$

$$\boldsymbol{F}_{1i} = \begin{bmatrix} f_{1i11} & f_{1i12} & \cdots & f_{1i1n} \\ f_{1i21} & f_{1i22} & \cdots & f_{1i2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{1im1} & f_{1im2} & \cdots & f_{1imn} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{F}_{Qi} = \begin{bmatrix} f_{Qi11} & f_{Qi12} & \cdots & f_{Qi1n} \\ f_{Qi21} & f_{Qi22} & \cdots & f_{Qi2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{Qim1} & f_{Qim2} & \cdots & f_{Qimn} \end{bmatrix},$$

を決定する．ここで，1 番目と Q 番目の領域は原点対称な領域である．1 番目と Q 番目の領域はそれぞれ，$R_1(s_{11}, s_{21}, \cdots, s_{n1})$, $s_{k1} = 1, \forall k$ と $R_Q(s_{1Q}, s_{2Q}, \cdots, s_{nQ})$, $s_{kQ} = 0, \forall k$ で表される．次に任意の z 番目の領域

$$R_z(s_{1z}, s_{2z}, \cdots, s_{nz}), \quad s_{kz} = 1 \text{ or } 0,$$

に注目し，この領域のフィードバックゲイン $\boldsymbol{F}_{zi}$,

$$\boldsymbol{F}_{zi} = \begin{bmatrix} f_{zi11} & f_{zi12} & \cdots & f_{zi1n} \\ f_{zi21} & f_{zi22} & \cdots & f_{zi2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{zim1} & f_{zim2} & \cdots & f_{zimn} \end{bmatrix},$$

について考える．もし，z 番目の領域と 1 番目の領域の境界上の $\boldsymbol{x}(t)$ に対して式 (10) が成り立ち，z 番目の領域と Q 番目の領域の境界上の $\boldsymbol{x}(t)$ に対して式 (11) が成り立つならば，制御入力の連続性は保証される．

$$\boldsymbol{F}_{zi}\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{F}_{1i}\boldsymbol{x}(t) \quad (10)$$

$$\boldsymbol{F}_{zi}\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{F}_{Qi}\boldsymbol{x}(t) \quad (11)$$

もし，$\boldsymbol{F}_{zi}$ が次の条件を満足するなら，式 (10), (11) は満たされる．

$$f_{zi\ell k} = \begin{cases} f_{1i\ell k}, & s_{kz} = s_{k1}, \\ f_{Qi\ell k}, & s_{kz} = s_{kQ}. \end{cases} \quad (12)$$

式 (12) は制御入力の連続性条件である．$\boldsymbol{F}_{1i}$ と $\boldsymbol{F}_{Qi}$ から，それら以外のフィードバックゲイン $\boldsymbol{F}_{zi}, \forall z, i$ を決定することができる．これにより，制御器設計条件 (6)-(9) は $\boldsymbol{P}_q$ に対しての LMI になる．

4 設計例

次のような非線形システムを考える．

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2(t) \\ -x_1^3(t) - x_2^3(t) + 5x_1^2(t)x_2(t) + 5x_1(t)x_2^2(t) \\ -3x_1(t)x_2(t) - x_1(t) - x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -0.7 + x_1(t)x_2(t) \end{bmatrix} u(t), \quad (13)$$

$$-d \le x_1 \le d, \ -d \le x_2 \le d.$$

$d = 0.5$ のときについて考える．誌面の都合上，非線形システム (13) に対するスイッチングファジィモデル (1) の詳細は省略する (詳しくは文献 [12] を参照)．

4.1 設計手法 I

はじめに，ローカルな線形モデル $(\boldsymbol{A}_{qi}, \boldsymbol{B}_{qi})$ に対して線形制御理論を適用することによって，次のようなフィードバックゲイン $\boldsymbol{F}_{qi}$ を得る．

$$\boldsymbol{F}_{11} = \begin{bmatrix} -3.472 & -2.789 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{F}_{12} = \begin{bmatrix} -1.241 & -0.558 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{F}_{13} = \begin{bmatrix} -2.232 & -1.793 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{F}_{14} = \begin{bmatrix} -0.798 & -0.359 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{F}_{21} = \begin{bmatrix} -2.926 & -3.934 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{F}_{22} = \begin{bmatrix} -6.786 & -2.500 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{F}_{23} = \begin{bmatrix} -2.156 & -2.899 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{F}_{24} = \begin{bmatrix} -5.000 & -1.842 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{F}_{31} = \begin{bmatrix} -14.237 & -5.985 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{F}_{32} = \begin{bmatrix} -12.803 & -9.845 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{F}_{33} = \begin{bmatrix} -10.490 & -4.410 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{F}_{34} = \begin{bmatrix} -9.433 & -7.254 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{F}_{41} = \begin{bmatrix} 0.319 & 1.002 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{F}_{42} = \begin{bmatrix} -5.685 & -5.003 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{F}_{43} = \begin{bmatrix} 0.205 & 0.644 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{F}_{44} = \begin{bmatrix} -3.655 & -3.216 \end{bmatrix}.$$

安定条件 (6), (7), (8), (9) を解くことによって次のような正定対称行列が得られる．

$$\boldsymbol{P}_1 = \begin{bmatrix} 18.992 & 3.918 \\ 3.918 & 4.919 \end{bmatrix} > 0, \ \boldsymbol{P}_2 = \begin{bmatrix} 9.144 & 2.328 \\ 2.328 & 4.919 \end{bmatrix} > 0,$$

$$\boldsymbol{P}_3 = \begin{bmatrix} 18.992 & 1.090 \\ 1.090 & 3.175 \end{bmatrix} > 0, \ \boldsymbol{P}_4 = \begin{bmatrix} 9.144 & 2.077 \\ 2.077 & 3.175 \end{bmatrix} > 0.$$

図 1, 2, 3 に初期値が $\boldsymbol{x}(0) = [-0.4 \ \ -0.4]^T$ のときの制御結果，そのときのスイッチングリアプノフ関数の軌跡および制御入力を示す．設計した制御器によって非線形システム (13) は $-0.5 \le x_1 \le 0.5$, $-0.5 \le x_2 \le 0.5$ の範囲で安定化することができる．しかし，図 3 より，制御入力が不連続になっ

ている．これを避けるために，次に制御入力の連続性を考慮した制御器設計を行う．

4.2 設計手法 II

はじめに，線形モデル $(\boldsymbol{A}_{1i}, \boldsymbol{B}_{1i})$ および $(\boldsymbol{A}_{4i}, \boldsymbol{B}_{4i})$ に対して線形制御理論を適用し，フィードバックゲイン $\boldsymbol{F}_{1i}$, $\boldsymbol{F}_{4i}$ を求める．

$$\boldsymbol{F}_{11}=\begin{bmatrix} -3.472 & -2.789 \end{bmatrix}, \boldsymbol{F}_{12}=\begin{bmatrix} -1.241 & -0.558 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{F}_{13}=\begin{bmatrix} -1.645 & -1.321 \end{bmatrix}, \boldsymbol{F}_{14}=\begin{bmatrix} -0.588 & -0.264 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{F}_{41}=\begin{bmatrix} 0.319 & 1.002 \end{bmatrix}, \boldsymbol{F}_{42}=\begin{bmatrix} -5.685 & -5.003 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{F}_{43}=\begin{bmatrix} 0.151 & 0.475 \end{bmatrix}, \boldsymbol{F}_{44}=\begin{bmatrix} -2.693 & -2.370 \end{bmatrix}.$$

次に，Region 2, Region 3 のフィードバックゲインを連続条件 (12) を適用することによって次のように決定する．

$$\boldsymbol{F}_{21} = \begin{bmatrix} 0.319 & -2.789 \end{bmatrix}, \boldsymbol{F}_{22} = \begin{bmatrix} -5.685 & -0.558 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{F}_{23} = \begin{bmatrix} 0.151 & -1.321 \end{bmatrix}, \boldsymbol{F}_{24} = \begin{bmatrix} -2.693 & -0.264 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{F}_{31} = \begin{bmatrix} -3.472 & 1.002 \end{bmatrix}, \boldsymbol{F}_{32} = \begin{bmatrix} -1.241 & -5.003 \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{F}_{33} = \begin{bmatrix} -1.645 & 0.475 \end{bmatrix}, \boldsymbol{F}_{34} = \begin{bmatrix} -0.588 & -2.370 \end{bmatrix}.$$

安定条件 (6), (7), (8), (9) を解くことによって次のような正定対称行列が得られる．

$$\boldsymbol{P}_1=\begin{bmatrix} 18.535 & 3.542 \\ 3.542 & 6.233 \end{bmatrix} > 0, \boldsymbol{P}_2=\begin{bmatrix} 14.091 & 2.957 \\ 2.957 & 6.233 \end{bmatrix} > 0,$$
$$\boldsymbol{P}_3=\begin{bmatrix} 18.535 & 3.140 \\ 3.140 & 7.544 \end{bmatrix} > 0, \boldsymbol{P}_4=\begin{bmatrix} 14.091 & 3.091 \\ 3.091 & 7.544 \end{bmatrix} > 0.$$

図 4, 5, 6 に初期値が $\boldsymbol{x}(0) = [-0.4 \quad -0.4]^T$ のときの制御結果，そのときのスイッチングリアプノフ関数の軌跡および制御入力を示す．設計した制御器によって非線形システム (13) は $-0.5 \leq x_1 \leq 0.5$, $-0.5 \leq x_2 \leq 0.5$ の範囲で安定化することができる．さらに，図 6 より，制御入力が連続になっている．

5 まとめ

本論文ではスイッチングリアプノフ関数に基づくスイッチングファジィ制御器の設計条件を導出した．スイッチングファジィ制御器はスイッチングファジィモデルと同様に，分割された領域内でローカルに構成されたファジィ制御器を領域ごとにスイッチする．しかし，このような制御入力はスイッチする際にたびたび，不連続なものになる．これを避けるために，本論文では制御入力の連続性を考慮した制御器設計法も合わせて提案した．例題によってスイッチングファジィ制御器の有効性を示した．今後は本手法を複雑システムに適用する．

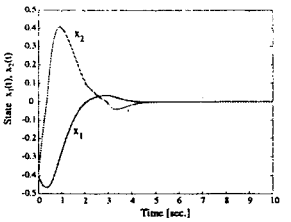


図 1: 制御結果 (設計手法 I)

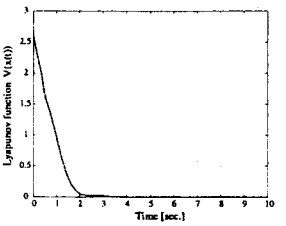


図 2: リアプノフ関数の軌跡 (設計手法 I)

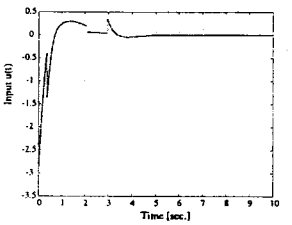


図 3: 制御入力 (設計手法 I)

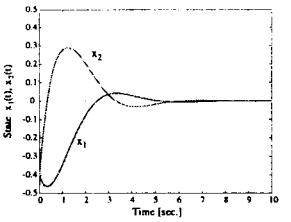


図 4: 制御結果 (設計手法 II)

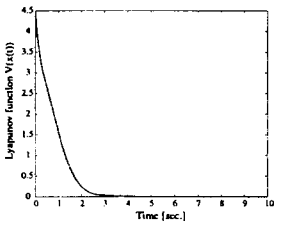


図 5: リアプノフ関数の軌跡 (設計手法 II)

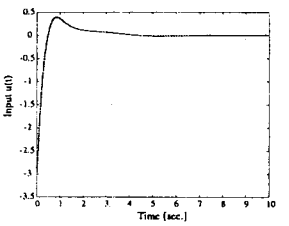


図 6: 制御入力 (設計手法 II)

参考文献

[1] H. Ohtake et. al., "Fuzzy Modeling via Sector Nonlinearity Concept," *Proceeding of Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference*, pp.127-132, Vancouver, 2001.

[2] H. Ohtake et. al., "A Construction Method of Switching Lyapunov Function for Nonlinear Systems," *Proceeding of 2002 FUZZ-IEEE*, pp.221-226, Hawaii, 2002.

[3] K. Tanaka, and M. Sugeno, "Stability Analysis and Design of Fuzzy Control System," *FUZZY SETS AND SYSTEM*, vol.45, no.2. pp.135-156, 1992.

[4] H. O. Wang et. al., "An Approach to Fuzzy Control of Nonlinear Systems: Stability and Design Issues," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol.4, no.1, pp.14-23, 1996.

[5] K. Tanaka et. al., "Fuzzy Regulators and Fuzzy Observers: Relaxed Stability Conditions and LMI based Designs," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol.6, no.2, pp.250-265, 1998.

[6] D. Filev, "Gain scheduling based control of a class of TSK systems" in Fuzzy Control, Synthesis and Analysis, edited by S. Farinwata, D. Filev and R. Langari John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England, pp.321-334, 2000.

[7] S. K. Hong and R. Langari, "Robust Fuzzy Control of Magnetic Bearing System Subject to Harmonic Disturbances," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol.8, no.2, pp.366-371, Mar., 2000.

[8] K. Tanaka and H. O, Wang, *Fuzzy Control Systems Design and Analysis*, JOHN WILEY & SONS, INC., 2000.

[9] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol.15, pp.116-132, 1985.

[10] M. Johansson, "Piecewise Linear Control Systems," Ph.D. Thesis, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1999.

[11] K. Tanaka et. al., "A Multiple Lyapunov Function Approach to Stabilization of Fuzzy Control Systems", IEEE Trans. on Fuzzy Systems, accepted.

[12] H. Ohtake et. al., "Switching Fuzzy Control for Nonlinear Systems," *Proceeding of ISIC 2003*, accepted.

問い合わせ先

〒 182-8585　東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
電気通信大学 知能機械工学科
田中研究室 大竹 博
Tel: 0424-43-5431
E-mail: hohtake@rc.mce.uec.ac.jp

Acrobatic Control of a Pendubot

Wei Li and Kazuo Tanaka
Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems
The University of Electro-Communications

Abstract This paper presents the acrobatic control of an underactuated two-link robot called the Pendubot. We propose two controllers, one for holding the first link to stand at given unstable position other than upright, another one for keeping first link swinging periodically, while the second link maintain standing vertically in both cases. A nonlinear model following control approach [1] is used in the design. The performance of the proposed controllers is showed in simulation results.

1 Introduction

The two-link underactuated robotic mechanism called the pendubot is widely used for research in nonlinear control and for education in various concepts like nonlinear dynamics, robotics and control system design [2]. Numerous control strategies have been proposed to bring the mechanism to the upright position, such as partial feedback linearization techniques by Spong and Block [3] and energy-based approach by [2].

But till now, we have not found any approach with new control objectives. Thus we propose two:

A: keep the first link stable at a given position other than upright while the second link maintain standing vertically

B: keep the first link swinging while the second link maintain standing vertically

For each objective respectively, we linearize original model locally in fuzzy partition spaces [1], construct fuzzy model, and design controller on basis of nonlinear model following control. In each case, simulation results are given, showing the effectiveness of the proposed nonlinear controller.

2 Pendubot System Dynamics

The pendubot system consists of two link, with an actuator at the shoulder (link 1) and no actuator at the elbow (link 2). The link 2 moves freely around link 1 [2].

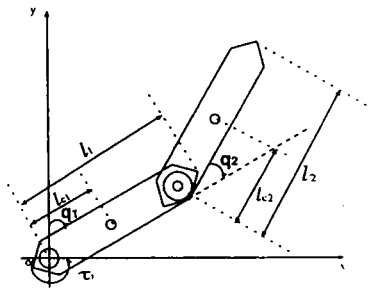


Figure 1: The pendubot system.

m_1, m_2 are the masses of link 1 and link 2. q_1 the angle that link 1 makes with the horizontal, q_2 the angle that the link 2 makes with link 1. l_1 and l_2 the lengths of link 1 and link 2. l_{c1}, l_{c2} the distance to the center of mass of link 1 and link 2. I_1 and I_2 the moments of inertia of link 1 and link 2 about their centroids.

Then introducing the following five parameters

$$\begin{cases} \theta_1 = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1 \\ \theta_2 = m_2 l_{c2}^2 + I_2 \\ \theta_3 = m_2 l_1 l_{c2} \\ \theta_4 = m_1 l_{c1} + m_2 l_1 \\ \theta_5 = m_1 l_{c2} \end{cases} \quad (1)$$

Considering standard assumption, i.e. no friction, we have the nonlinear equations of motion as

$$\ddot{q}_1 = \frac{1}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\cos^2 q_2}[\theta_2\theta_3 \sin q_2(\dot{q}_1+\dot{q}_2)^2 + \theta_3^2 \cos q_2 \sin(q_2)\dot{q}_1^2 + \theta_2\theta_4 g \sin q_1 - \theta_3\theta_5 g \cos q_2 \sin(q_1+q_2) - \theta_2\tau_1] \quad (2)$$

$$\ddot{q}_2 = \frac{1}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\cos^2 q_2}[-\theta_3(\theta_2+\theta_3\cos q_2)\sin q_2(\dot{q}_1+\dot{q}_2)^2 - (\theta_1+\theta_3\cos q_2)\theta_3 \sin q_2 \dot{q}_1^2 - (\theta_2+\theta_3\cos q_2)(\theta_4 g \sin q_1 - \tau_1) + (\theta_1+\theta_3\cos q_2)\theta_5 g \sin(q_1+q_2)] \quad (3)$$

In this paper, we suppose link 1 and link 2 are the same, and set parameters as $m = 1$, $l = 1$, $l_{c1} = 0.5$, $g = 9.8$ and $I = \frac{1}{12}ml^2 = \frac{1}{12}$.

3 Nonlinear Model Following Control

Our control objective is not the regulation problem, which is one of the most important problems in control engineering. In this paper, we use the approach, named nonlinear model following control [1], to deal with the interesting nonstandard control problem.

Generally, the original system can be represented as

$$\dot{q}(t) = \sum_{i=1}^{r} h_i(q(t))(A_i q(t) + B_i u(t)), \quad (4)$$

where $\sum_{i=1}^{r} h_i(q(t)) = 1$.

Considering the simple situation that reference system has same membership as original one, we can have the reference system equations as

$$\dot{q}_R(t) = \sum_{i=1}^{r} h_i(q_R(t)) D_i q_R(t) \quad (5)$$

Assume that $e(t) = q(t) - q_R(t)$, then from (4) and (5), the error system is

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{q}(t) - \dot{q}_R(t) \\ &= \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i(q(t))h_j(q_R(t))[(A_i q(t) + B_i u(t)) \\ &\quad - D_j q_R(t)] \end{aligned} \quad (6)$$

Consider the input as follows:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{u}(t) &= -\sum_{i=1}^{r} h_i(q(t))\boldsymbol{F}_i\boldsymbol{q}(t) \\ &\quad + \sum_{i=1}^{r} h_i(q_R(t))\boldsymbol{K}_i\boldsymbol{q}_R(t). \end{aligned} \tag{7}$$

Substituting (7) into (6), the overall control system is represented as

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{e}}(t) &= \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i(q(t))h_j(q(t))(\boldsymbol{A}_i - \boldsymbol{B}_i\boldsymbol{F}_j)\boldsymbol{q}(t) \\ &\quad -\sum_{i=1}^{r}\sum_{k=1}^{r} h_i(q(t))h_k(q_R(t)) \\ &\qquad \times(\boldsymbol{D}_k - \boldsymbol{B}_i\boldsymbol{K}_k)\boldsymbol{q}_R(t) \end{aligned} \tag{8}$$

It can be rewritten as

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{e}}(t) &= \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\sum_{k=1}^{r} h_i h_j h_k \left[\frac{\boldsymbol{A}_i - \boldsymbol{B}_i\boldsymbol{F}_j + \boldsymbol{A}_j - \boldsymbol{B}_j\boldsymbol{F}_i}{2}\boldsymbol{q}(t)\right. \\ &\qquad \left. +(\boldsymbol{D}_k - \boldsymbol{B}_i\boldsymbol{K}_k)\boldsymbol{q}_R(t)\right] \end{aligned} \tag{9}$$

If $\frac{\boldsymbol{A}_i - \boldsymbol{B}_i\boldsymbol{F}_j + \boldsymbol{A}_j - \boldsymbol{B}_j\boldsymbol{F}_i}{2} = \boldsymbol{D}_k - \boldsymbol{B}_i\boldsymbol{K}_k$ $i, j, k = 1, 2\cdots r$,
and it is stable matrix, then $\lim_{t\to\infty} \boldsymbol{e}(t) = 0$. From the above, we define the design problems as:

Find $\boldsymbol{X} > \boldsymbol{I}$ and $\boldsymbol{M}_i$, $\boldsymbol{N}_k$ $(i, j, k = 1, 2, \cdots, r)$ satisfying

minimize β

subject to $\boldsymbol{X} > \boldsymbol{I}$, $\beta > 0$,

$$\begin{aligned} &-\boldsymbol{A}_i\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}\boldsymbol{A}_i^T - \boldsymbol{A}_j\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}\boldsymbol{A}_j^T \\ &\quad +\boldsymbol{B}_j\boldsymbol{M}_i + \boldsymbol{M}_i^T\boldsymbol{B}_j^T + \boldsymbol{B}_i\boldsymbol{M}_j + \boldsymbol{M}_j^T\boldsymbol{B}_i^T \geq 0, \\ &\quad (\textit{for } i < j \;\; s.t \;\; h_i \cap h_j \neq \phi) \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \beta\boldsymbol{I} & [(\boldsymbol{A}_i\boldsymbol{X} - \boldsymbol{B}_i\boldsymbol{M}_j + \boldsymbol{A}_j\boldsymbol{X} - \boldsymbol{B}_j\boldsymbol{M}_i) \\ & -2(\boldsymbol{D}_k\boldsymbol{X} - \boldsymbol{B}_i\boldsymbol{N}_k)]^T \\ * & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} > 0,$$

where $\boldsymbol{X} = \boldsymbol{P}^{-1}$, $\boldsymbol{M}_i = \boldsymbol{F}_i\boldsymbol{X}$, $\boldsymbol{N}_k = \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{X}$. In this way, we can calculate the feedback gains $\boldsymbol{F}$, $\boldsymbol{K}$.

We should carefully choose $\boldsymbol{D}$, so that it is possible to satisfy those conditions simultaneously.

4 Controller Design for Objective A

As shown in (2) and (3), the pendubot system has strong nonlinearity. So we choose local approximation [1] to obtain a fuzzy model in fuzzy partition spaces. The spirit of the approach is to approximate nonlinear terms by judiciously choosing linear terms. This procedure leads to reduction of the number of model rules, which directly results in simplification of analysis and design LMI conditions.

When q_1 is near zero, the nonlinear equations can be simplified as

$$\ddot{q}_1 = \frac{1}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\cos q_2^2}[(\theta_2\theta_4 - \theta_3\theta_5)g\,q_1 - \theta_3\theta_5 g\,q_2 - \theta_2\,\tau_1] \tag{10}$$

$$\begin{aligned} \ddot{q}_2 &= \frac{1}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\cos q_2^2}\{[(\theta_1 + \theta_3)\theta_5 g - (\theta_2 + \theta_3)\theta_4 g]\,q_1 \\ &\quad +(\theta_1 + \theta_3)\theta_5 g\,q_2 + (\theta_2 + \theta_3)\,\tau_1\} \end{aligned} \tag{11}$$

When q_1 is near $\pm\pi/9$, the nonlinear equations can be simplified as

$$\begin{aligned} \ddot{q}_1 &= \frac{1}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\gamma^2}[(\theta_2\theta_4 - \theta_3\theta_5\gamma)\frac{9}{\pi}\alpha g\,q_1 - \theta_3\theta_5\gamma\frac{9}{\pi}\alpha g\,q_2 \\ &\quad -\theta_2\,\tau_1] \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \ddot{q}_2 &= \frac{1}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\gamma^2}\{[(\theta_1 + \theta_3\gamma)\theta_5 - (\theta_2 + \theta_3\gamma)\theta_4]\frac{9}{\pi}\alpha g\,q_1 \\ &\quad +(\theta_1 + \theta_3\gamma)\theta_5\frac{9}{\pi}\alpha g\,q_2 + (\theta_2 + \theta_3\gamma)\,\tau_1\} \end{aligned} \tag{13}$$

where $\alpha = \sin(20°)$ and $\gamma = \cos(20°)$.

Note (10) - (13) are linear systems. Suppose $\boldsymbol{q}(t) = [q_1(t), \dot{q}_1(t), q_2(t), \dot{q}_2(t)]$, we have fuzzy model as

Model Rule 1 : *IF* $q_1(t)$ *is about* 0,
THEN $\dot{\boldsymbol{q}}(t) = \boldsymbol{A}_1\boldsymbol{q}(t) + \boldsymbol{B}_1\tau_1(t)$.

Model Rule 2 : *IF* $q_1(t)$ *is about* $\pm\pi/9$,
THEN $\dot{\boldsymbol{q}}(t) = \boldsymbol{A}_2\boldsymbol{q}(t) + \boldsymbol{B}_2\tau_1(t)$.

$$\boldsymbol{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\theta_2\theta_4 - \theta_3\theta_5}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2}g & 0 & \frac{-\theta_3\theta_5}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2}g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{(\theta_1+\theta_3)\theta_5 - (\theta_2+\theta_3)\theta_4}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2}g & 0 & \frac{(\theta_1+\theta_3)\theta_5}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2}g & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\theta_2\theta_4 - \theta_3\theta_5\gamma}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\gamma^2}\frac{9}{\pi}\alpha g & 0 & \frac{-\theta_3\theta_5\gamma}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\gamma^2}\frac{9}{\pi}\alpha g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{(\theta_1+\theta_3\gamma)\theta_5 - (\theta_2+\theta_3\gamma)\theta_4}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\gamma^2}\frac{9}{\pi}\alpha g & 0 & \frac{(\theta_1+\theta_3\gamma)\theta_5}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\gamma^2}\frac{9}{\pi}\alpha g & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-\theta_2}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2} \\ 0 \\ \frac{\theta_2 + \theta_3}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-\theta_2}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\gamma^2} \\ 0 \\ \frac{\theta_2 + \theta_3}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\gamma^2} \end{bmatrix}$$

and $\alpha = sin(20°), \gamma = cos(20°)$.

The membership functions for Rule 1 and Rule 2 can be shown in Figure 2.

Suppose $\boldsymbol{q}_R(t) = [q_{R1}(t)\ \dot{q}_{R1}(t)\ q_{R2}(t)\ \dot{q}_{R2}(t)]^T$, the reference fuzzy model is:

Reference Rule 1 : *IF* $q_{R1}(t)$ *is about* 0,
THEN $\dot{\boldsymbol{q}}_R(t) = \boldsymbol{D}_1\boldsymbol{q}_R(t)$,

Reference Rule 2 : *IF* $q_{R1}(t)$ *is about* $\pm\pi/9$,
THEN $\dot{\boldsymbol{q}}_R(t) = \boldsymbol{D}_2\boldsymbol{q}_R(t)$.

$$\boldsymbol{D}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 10 & 10 & 10 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -10.3 & -25 & -10.3 & -25 \end{bmatrix}$$

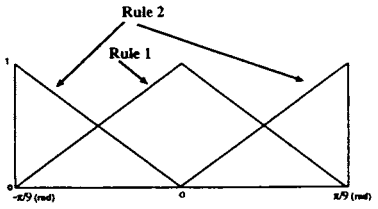


Figure 2: Membership functions of two-rule model

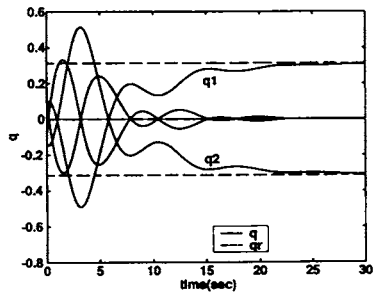


Figure 3: State responses for original system (2),(3).

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 15 & 5 & 15 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -21.74 & -12.05 & -21.74 & -12.05 \end{bmatrix}$$

Reference system has similar membership functions,

$$N_1(q_{R1}(t)) = \frac{9}{\pi}|q_{R1}(t)|, N_2(q_{R1}(t)) = 1 - N_1(q_{R1}(t)).$$

In this example, we set $[q_{R1}(0)\ \dot{q}_{R1}(0)\ q_{R2}(0)\ \dot{q}_{R2}(0)]$ $= [18^o\ 0\ -18^o\ 0]$ and perform simulation in MATLAB, using the original nonlinear system.

Figure 3 shows that $q(t)$ approach $q_R(t)$ after 30 seconds, with $e(t) \to 0$. Also, $q_1(t) + q_2(t) = 0^o$, which means the second link stands upright.

The constraint for $q(0)$ is that $q_1(0) \in [-20^o, 20^o]$ and $q_1(0) + q_2(0) \simeq 0$.

Notice that one property of this reference system is, as long as $\dot{q}_{R1}(0)$ and $\dot{q}_{R2}(0)$ are zero, $q_{R1}(t)$ and $q_{R2}(t)$ will keep initial values without changing. So by setting values of $q_{R1}(0)$ and $q_{R2}(0)$ between $[-20^o, 20^o]$, $q_1(\infty)$ can be altered, then we can obtain various control objectives.

In this work the stable range for q_1 is between $[-20^o, 20^o]$. In a larger range, such as $[-45^o, 45^o]$, the LMI variable X is too big to solve due to MATLAB predefined computation precision. But theoretically, q_1 can be kept stable at any angle in $(-180^o, 180^o]$.

5 Controller Design for Objective B

In the last section, we only study static situations. In order to let link 1 swing, we now take $\dot{q}_1(t)$ into account and add more fuzzy rules.

As illustrated in Figure 1, for keeping the second link upright at any time, we have equation $q_{R1}(t) + q_{R2}(t) = 0$ as a constraint, which also means that $\dot{q}_{R1}(t) + \dot{q}_{R2}(t) = 0$ and $\ddot{q}_{R1}(t) + \ddot{q}_{R2}(t) = 0$ hold.

Following the procedure stated in the last section, we can have the following fuzzy model:

Model Rule 1 : *IF* $q_1(t)$ *is* 0, *and* $\dot{q}_1(t)$ *is* c_1,
THEN $\dot{q}(t) = A_1 q(t) + B_1 \tau_1(t)$,

Model Rule 2 : *IF* $q_1(t)$ *is* 0, *and* $\dot{q}_1(t)$ *is* c_2,
THEN $\dot{q}(t) = A_2 q(t) + B_2 \tau_1(t)$,

Model Rule 3 : *IF* $q_1(t)$ *is* $\pm\theta$, *and* $\dot{q}_1(t)$ *is* c_1,
THEN $\dot{q}(t) = A_3 q(t) + B_3 \tau_1(t)$,

Model Rule 4 : *IF* $q_1(t)$ *is* $\pm\theta$, *and* $\dot{q}_1(t)$ *is* c_2,
THEN $\dot{q}(t) = A_4 q(t) + B_4 \tau_1(t)$.

Where c_1, c_2, θ are constants, $c_1 > 0$, $c_2 < 0$, $|c_1| \neq |c_2|$. And,

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\theta_2\theta_4 - \theta_3\theta_5}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2} g & 0 & \frac{(c_1^2\theta_3^2 - \theta_3\theta_5 g)}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{(\theta_1+\theta_3)\theta_5 - (\theta_2+\theta_3)\theta_4}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2} g & 0 & \frac{(\theta_1+\theta_3)(\theta_5 g - c_1^2\theta_3)}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\theta_2\theta_4 - \theta_3\theta_5\cos\theta}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\cos^2\theta} \frac{\sin\theta}{\theta} g & 0 & \frac{c_1^2\theta_3^2 - \theta_3\theta_5 g}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\cos^2\theta} \frac{\sin 2\theta}{2\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{\sin\theta}{\theta} \frac{g}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\cos^2\theta} [(\theta_1 + \theta_3\cos\theta)\theta_5 - (\theta_2 + \theta_3\cos\theta)\theta_4] & 0 & \frac{\sin\theta}{\theta} \frac{}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\cos^2\theta} [(\theta_1 + \theta_3\cos\theta)(\theta_5 g - c_1^2\theta_3)] & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-\theta_2}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2} \\ 0 \\ \frac{\theta_2 + \theta_3}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2} \end{bmatrix} \quad B_3 = B_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-\theta_2}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\cos^2\theta} \\ 0 \\ \frac{\theta_2 + \theta_3\cos\theta}{\theta_1\theta_2 - \theta_3^2\cos^2\theta} \end{bmatrix}$$

By substituting c_1 with c_2, we can get A_2 and A_4.

It is considerably important to choose c_1, c_2. The bigger $\dot{q}_1$ is, the higher the swinging frequency becomes, and the harder control turns to be. So we prefer small values. In this paper, $c_1 = 0.5$, $c_2 = -0.4$, $\theta = 10^o$. Note that $|q(0)|, |q_R(0)| \leq min|c_1|, |c_2|$.

See Figure 4 for the illustration of membership functions of $q_1(t)$ and $\dot{q}_1(t)$.

Then consider the following reference fuzzy model:

Reference Rule 1 : *IF* $q_{R1}(t)$ *is* 0, *and* $\dot{q}_{R1}(t)$ *is* c_1,
THEN $\dot{q}_R(t) = D_1 q_R(t)$,

Reference Rule 2 : *IF* $q_{R1}(t)$ *is* 0, *and* $\dot{q}_{R1}(t)$ *is* c_2,
THEN $\dot{q}_R(t) = D_2 q_R(t)$,

Reference Rule 3 : *IF* $q_{R1}(t)$ *is* $\pm\theta$, *and* $\dot{q}_{R1}(t)$ *is* c_1,
THEN $\dot{q}_R(t) = D_3 q_R(t)$,

Reference Rule 4 : *IF* $q_{R1}(t)$ *is* $\pm\theta$, *and* $\dot{q}_{R1}(t)$ *is* c_2,
THEN $\dot{q}_R(t) = D_4 q_R(t)$.

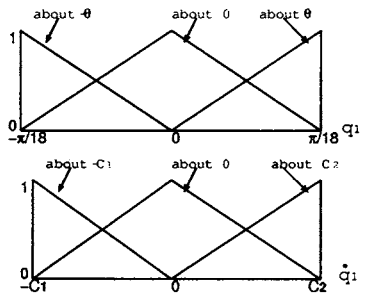


Figure 4: Membership functions of $q_1(t)$ and $\dot{q}_1(t)$

$$\boldsymbol{D}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 10.0 & 3.0 & 10.25 & 3.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -10.3 & -7.5 & -10.55 & -7.5 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{D}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 10.0 & 6.0 & 10.16 & 6.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -10.3 & -15 & -10.46 & -15 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{D}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 10.0 & 8.0 & 10.25 & 8.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -10.15 & -19.82 & -10.4 & -19.82 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{D}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 10.0 & 8.0 & 10.0 & 8.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -10.15 & -19.82 & -10.31 & -19.82 \end{bmatrix}$$

Reference system has similar membership function,

$N_1=(1-\frac{|q_{R1}|}{\theta})\frac{\dot{q}_{R1}-c_2}{c_1-c_2}$, $N_2=(1-\frac{|q_{R1}|}{\theta})(1-\frac{\dot{q}_{R1}-c_2}{c_1-c_2})$,

$N_3=\frac{|q_{R1}|}{\theta}\frac{\dot{q}_{R1}-c_2}{c_1-c_2}$, $N_4=\frac{|q_{R1}|}{\theta}(1-\frac{\dot{q}_{R1}-c_2}{c_1-c_2})$.

In this example, $\boldsymbol{q}(0) = [5^o, 0, -5^o, 0]$, $\boldsymbol{q}_R(0) = [5^o, 0.1, -5^o, -0.1]$.

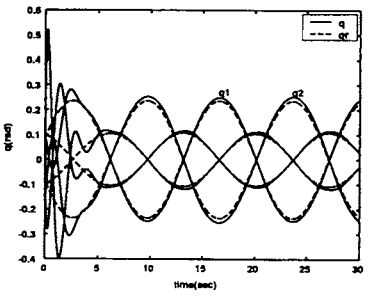


Figure 5: State responses for original system (2),(3).

Figures show that state responses of pendubot system approach those of reference system in 10 seconds.

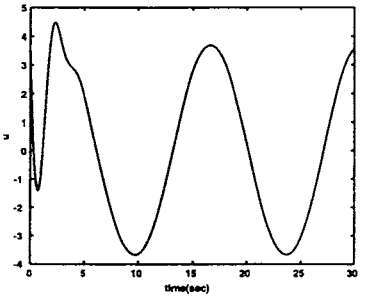


Figure 6: Control input.

Meanwhile, the input of original system is within reasonable range. Again, the designed fuzzy controller works effectively.

Frequency and amplitude of state responses depend on the initial states of $\boldsymbol{q}_R$. So by setting values of $\boldsymbol{q}_R(0)$, we can obtain various system response. However, considering pendubot as a physical system, we should choose those initial values, which satisfy certain dynamic constraints.

6 Conclusions

Simulations indicate designed controllers can achieve acrobatic control of pendubot satisfactorily. Here, some important issues are in order.

The particularity of these two control objectives is that, the controlled system is unstable, shown in Figures 3 and 5. So when choosing D_i, we adopt Relaxed Stability Condition, simply requiring real parts of eigenvalues of D_i are negative.

In objective A, we have the constraints $q_{R1}(t) + q_{R2}(t) = 0$ and $\dot{q}_{R1}(t) = 0$, which means $\ddot{q}_{Ri}(t) \equiv 0$. This condition simply states that $\dot{q}_{Ri}(t)$ should keep unchanged. Comparatively, in objective B, $\dot{q}_{R2}(t) = F(\theta, c_1)q_{R2}(t)$, $F(\theta, c_1)$ is the constant determined by θ and c_1, $F(\theta, c_1) < 0$. That means, the response of $q_{R2}(t)$ must be sinusoidal. So, to our knowledge, we can't utilize same reference system for both objectives.

In the LMIs, the smaller β is, the bigger feedback gain $\boldsymbol{F}$ and $\boldsymbol{K}$ would be. So on condition that control accuracy is satisfied, we can choose a not so small β to get reasonable feedback gains and control input.

References

[1] K. Tanaka and H. O. Wang, *Fuzzy Control Systems Design and Analysis*, JOHN WILEY & SONS, INC., 2000.

[2] Isabelle Fantoni, Rogelio Lozano, and Mark W. Spong, "Energy Based Control of the Pendubot," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 45, no. 4, pp. 725, April 2000

[3] M. W. Spong and D. J. Block, "The pendubot: A mechatronic system for control research and education," in 34th IEEE Conf. Decision and Control, 1995.

大空間空調におけるファジイ制御の特性を利用した制御法の開発
A development on control method of air-conditioning in large-space using the characteristics of fuzzy-control

松下 哲也
Tetsuya Matsushita
電気通信大学
University of Electro-Communications

植田 俊克
Toshikatsu Ueda
新菱冷熱工業株式会社
Shinryou Corporation

島野 淳
Atsushi Shimano
電気通信大学
University of Electro-Communications

本多 中二
Nakaji Honda
電気通信大学
University of Electro-Communications

Abstract : The placement of sensors for controlling a heating and air-conditioning system in a large indoor space is usually restricted; therefore, it is difficult to obtain reliable temperature and velocity distributions of the air in some areas. In order to overcome such problems, a load presumption type air-conditioning system based on linear-models is proposed. In this paper,we introduced a control method for air air-conditioning problem. This is fuzzy-control based on the difference in a temperature between a value presumed on linear-models and a value of target. In this paper,we aim at developing on control method of air-conditioning using the characterustucs of fuzzy-control.

1 はじめに

ドームやホールといった多目的に利用される大空間では温度分布が不均一であることや，気流による不快感が問題となることがある．また，用途ごとに人体負荷分布が大きく異なるので，気流や温度分布を考慮した空調あるいは空調制御を行うことが望ましい．しかし，センサーの設置位置や個数が限定されるため，センサー位置の温度を代表温度とする従来の制御では，センサーの設置されていない部分を適正な状態で制御するのは困難である．

そこで，あらかじめ居住域の温度分布を推定し，任意の場所を制御対象とする制御法が求められる．こういった大空間の空調制御の手法としては，文献 [1] で線形モデル（以下 LM）を用いて空調域の温度を推定し，その推定値と目標値の偏差から空間の室温を PID により制御する手法（以下 LM-PID 制御）が提案された．

本研究では，制御部を PID 制御器の代わりにファジイ制御器を用いることにより，人体負荷の増減による空調特性を考慮に入れた制御を実現する．大空間における空調は，人体負荷の増減による影響が大きく，増加時と減少時では制御規則が変わる．PID 制御ではこの違いを制御に反映するのは難しいが，ファジイ制御では，それぞれに適用される制御規則を調整することによって違いを制御に反映することができる．本研究では人体負荷増減時の空調の特性を反映させた制御法を開発し，数値流体解析（以下 CFD）を用いたシミュレーションによって検証を行い有効性を示す．

2 LM-ファジイ制御

2.1 制御系の構成

図 1 に LM-ファジイ制御系のブロック図を示す．制御手順は以下のとおりである．

1. センサー温度 T_r と吹き出し温度 T_0 を測定する．
2. センサー位置と T_r,T_0 から人体負荷 q を推定する (LM1)．
3. T_0 と推定人体負荷 $\hat{q}$ から空調域温度 T_a を推定する (LM2)．
4. 設定温度 Tset と推定空調域温度 $\widehat{T_a}$ の偏差から吹き出し温度を決定する．

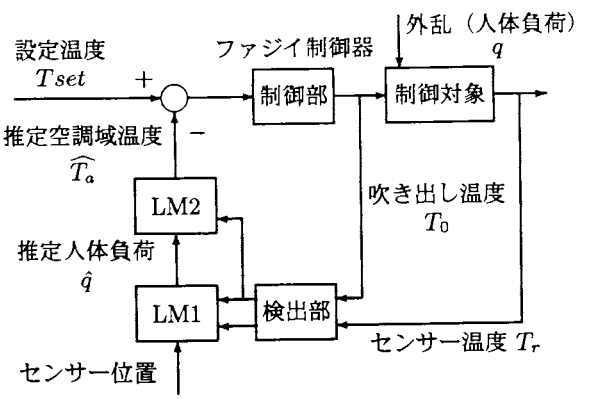


図 1: 制御系のブロック図

2.2 線形モデル（LM）

図1のLM1，LM2は，あらかじめ表1に示す条件で，CFDによる定常状態の計算でデータを作成した後，重回帰分析によりモデリングを行った．LM1では吹出し温度，センサー温度およびセンサー位置を入力データに，人体負荷を出力データとする．一方，LM2は吹出し温度と人体負荷を入力データとし，制御対象となる居住域の平均温度（空調域温度）を出力データとする．

表 1: CFD 計算条件

空間寸法	50 [m] (x) × 5 [m] (y) × 20 [m] (z)
吹出し風速	5.0 [m/s]
吹出し温度	14, 17, 20, 23, 26 [°C], 5 通り
x 方向座標	0.5 ～ 49.5 [m], 1.0 [m] きざみ 50 地点
y 方向座標	0.25 ～ 4.75 [m], 0.5 [m] きざみ 10 地点
人体負荷	0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 [人/m^2], 6 通り
負荷分布	モード A, モード B, モード C

2.3 制御対象空間

図2に制御対象とした空間を示す．制御対象領域は，吹出し噴流の対称性を考慮し，吹出口1個の空調空間の半分とした．高さ $10m$ の位置から冷風を吹き出し，天井部で吸い込む空調方式とし，温度センサー位置はスタンド中央部とした．乱流モデルは $k-\varepsilon$ モデルを用い，風速の境界条件は，床，天井，吹出口設置壁を対数則，それ以外は鏡面境界とした．制御対象である空間は気積が大きいので，温度分布のむらがあったり，熱の伝搬に時間遅れが生じる．そのため，センサー温度が必ずしも空調域の温度を代表としないので，センサー温度のみを頼りにした制御では，空調域を適正な温度に維持することができない難しさがある．

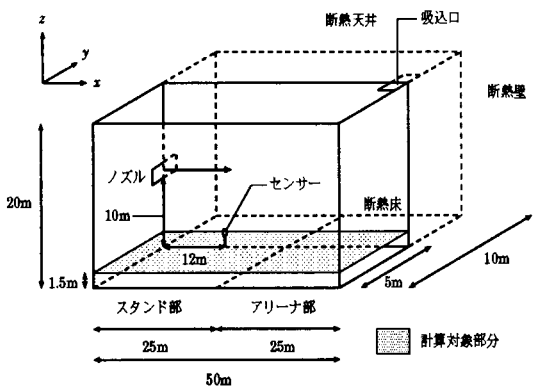
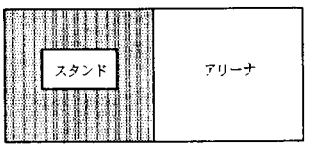


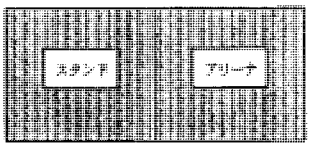
図 2: 制御対象空間

2.4 人体負荷分布

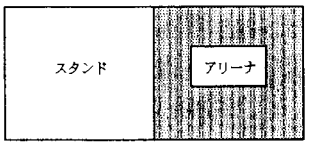
人体負荷分布は図3に示す3種のモードとする．モードAはスタンド部のみ人体負荷の発生する競技観戦時，モードBはスタンドとアリーナ双方に人体負荷の発生する大集会時，モードCはアリーナのみ人体負荷の発生する小規模な集会を想定している．負荷はA < B < Cの順でセンサーから離れており，この順にむだ時間が長くなる．むだ時間が長くなると，操作の結果がすぐに現れないためにオーバーシュートやハンティングを起こしやすく，制御が不安定になりやすい．



(a) モード A



(b) モード B



(c) モード C

図 3: 人体負荷分布（網掛けは人員有を示す）

2.5 人体負荷変動

人体負荷は，図4に示すように時間とともに変動する．

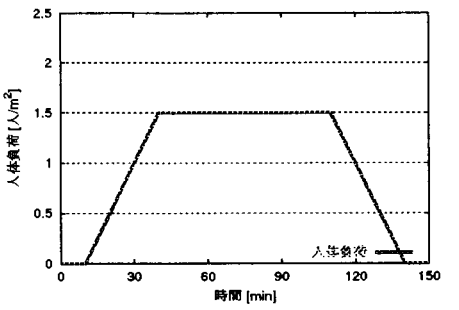


図 4: 人体負荷変動

2.6 ファジイ制御器における制御規則の設定

文献 [2] で挙げられた基本的な制御規則に,「応答の立ち上がり」「オーバーシュートの改善」「制定時間の向上」を取り入れ，設計した制御規則を表 2 に示す．計算簡略化のため後件部変数は非ファジイ値とした．

表 2: LM-ファジイ制御規則

		Δe						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e	NB				−1.2	−0.7		
	NM				−0.7			
	NS				−0.3			0.7
	ZE	−1.2	−0.7	−0.3	0.0	0.3	0.7	1.2
	PS	−0.7			0.3			
	PM				0.7			
	PB			0.7	1.2			

2.7 シミュレーション結果

図 2 に示した空間を対象とした LM-ファジイ制御による室温の空調制御を，CFD を用いてシミュレーションを行った．また，設定温度は夏期を想定し，26 °C とした．また，すべてのケースでサンプリング時間を 120 秒，不感帯幅を 0.03 °C としている．なおシミュレーションの際，センサー時定数，バルブ開閉時間，躯体蓄熱等の時間遅れ要素は考慮していない．ファジイ制御器の制御規則は表 2 によるものとする．モードA～Cの制御結果をそれぞれ図 5～図 7 に示す．

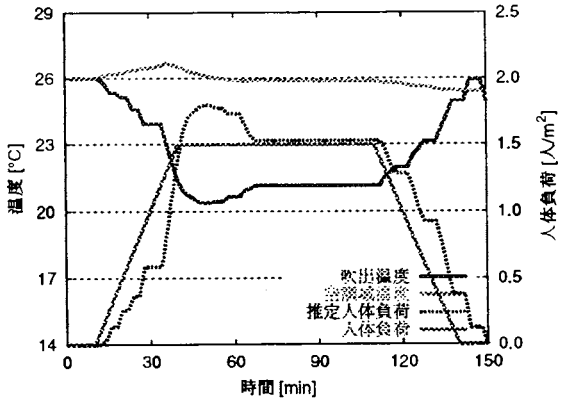


図 5: モードA

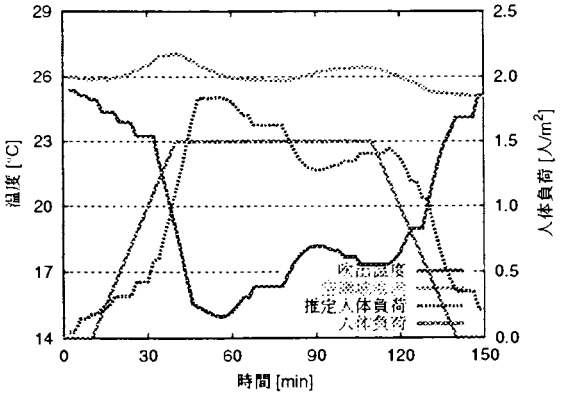


図 6: モードB

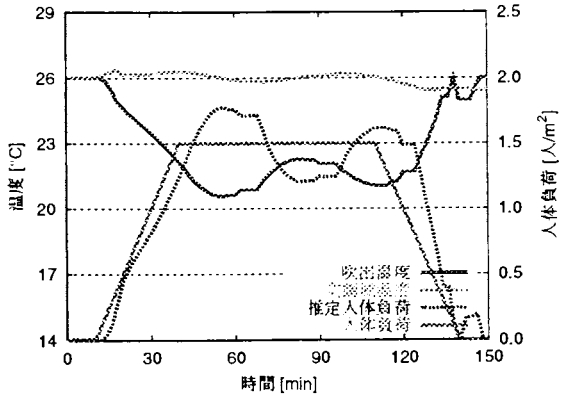


図 7: モードC

3 制御規則の調整

3.1 調整方法

シミュレーション結果を見ると，わずかながら変動はあるもののモードAとモードCは制御できていると言える．しかしモードBに関しては，人体負荷の増減に伴い大きく変動しているのがわかる．これは，モードBの人体負荷分布域がモードAやモードCと比べて倍に広がったことにより，人体負荷の増減が空調制御に及ぼす影響が大きくなり，変動が大きくなったものだと考えられる．これにより，人体負荷の増加に伴う空調域温度の上昇を抑えきれていない．

これらの問題を解決するために，全体的にゲインを増やし，比例制御にあたる Δe のゲインを増やすことにより即効性を高めた．また，人体発熱量の影響により人体負荷増加時の温度上昇は抑えにくい．これより，人体負荷増加時に適用されるファジイ制御規則のゲインも増やしている．さらに，オーバーシュートを抑えるために制御規則を追加した．このように改善したファジイ制御規則を表 3 に示す．

表 3: 調整後の LM-ファジイ制御規則

		Δe						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e	NB				−1.5	−1.0		
	NM				−1.0			
	NS			−1.5	−0.6			1.2
	ZE	−2.5	−1.5	−1.2	0.0	0.8	1.2	2.0
	PS	−1.5			0.6	1.2		
	PM				1.0			
	PB			0.8	1.5			

3.2 シミュレーション結果

ファジイ制御規則表 3 用いてシミュレーションを行った．ファジイ制御規則以外の条件はすべて 2.7 節と同じである．制御結果を図 8〜図 10 に示す．ファジイ制御規則を調整し非線形にすることで，モードBで見られた人体負荷増加時の空調域温度の変動は抑えられた．

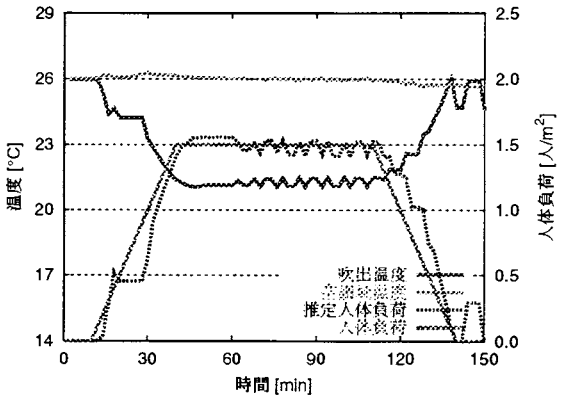


図 8: モードA

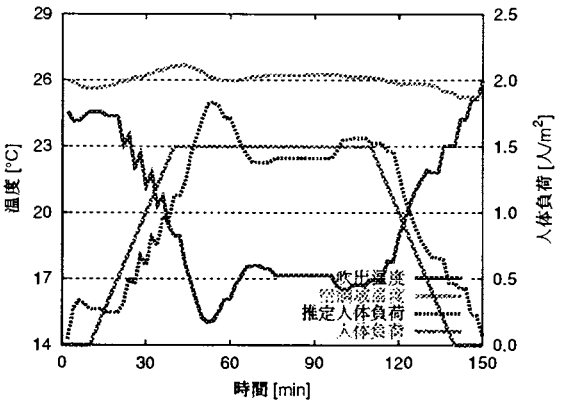


図 9: モードB

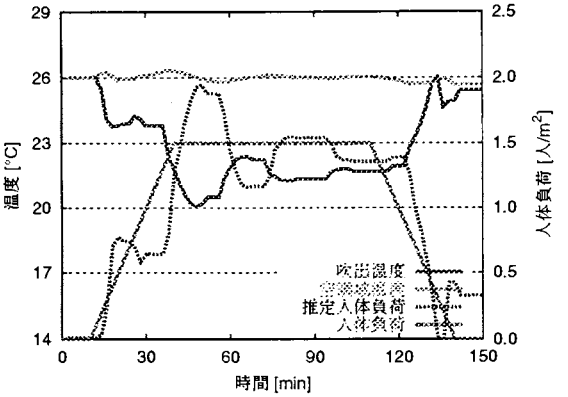


図 10: モードC

4 おわりに

多目的用途の大空間において，人体負荷の増減による空調特性を考慮に入れた制御手法を開発することを目的として，制御部を PID 制御器の代わりにファジイ制御器を用い，制御規則を調整することを提案した．その結果，制御対象である空調域温度の安定性に期待できることがわかった．しかし，吹出温度が 26 °C に達した時に線形モデルがうまく推定できていないことがわかった．

今後は，吹出温度が 26 °C に達した時の推定ができるような非線形性を考慮した推定モデルの再設計を考えている．また，複数の吹出口がある場合の相互干渉の影響を考慮したモデルを作成し，実際の空間に近づけていく予定である．

参考文献

[1] 植田俊克・島野淳・本多中二・鈴木正美：空調空間の温度分布を考慮した大空間空調制御に関する研究（その 2），空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，(2002)

[2] 菅野道夫: ファジイ制御，日刊工業新聞社 (1988)

[3] 竹内倶佳・萩野剛二郎: 制御工学，培風館 (1996)

問い合わせ先
〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
電気通信大学 システム工学科 本多研究室
松下 哲也
TEL: 0424-43-5277 FAX: 0424-43-8020
E-mail: tetsu@fs.se.uec.ac.jp

脳波認識に基づく電動車椅子の制御

Electroencephalogram-based Control of an Electric Wheelchair

松永　和之，田中　一男

Kazuyuki Matsunaga and Kazuo Tanaka

電気通信大学 知能機械工学科

Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems

The University of Electro-Communications

Abstract This paper describes electroencephalogram(EEG)-based control of an electric wheelchair. The control purpose is to achieve direction control of an electric wheelchair only by EEG. We develop two algorithms for detecting direction thinking ('going left' or 'going right') and apply it to direction control of an electric wheelchair. The first algorithm is based on CPM (correlation pattern matching) method using FFT. The second algorithm is based on CPM method using correlation exponent. Our experimental results demonstrate the possibility of achieving direction control of an electric wheelchair only by EEG.

1　はじめに

現在，重度障害者など意思を外部に伝えることが困難な人のために，さまざまな生体信号を利用した意思伝達システムが提案されている．とりわけ，脳波を利用したシステムは最上位の生体信号の活用という点で期待されている．

我々は脳波の工学的利用の観点から，左右思考の認識に関する解析手法 [1],[2] を提案し，移動ロボット操作に適用した [3]．本研究では新たな解析手法として，脳波の電極間の相関係数によるパターンマッチング法 (Correlation Pattern Matching;CPM 法 [3]) に，脳波の解析でよく用いられる FFT を組み合わせた手法と，相関指数を組み合わせた手法を提案し，左右思考の判別を試みた．実験の結果は低い判別率だったものの，この実験を踏まえた上で行った電動車椅子の方向制御実験では，高い判別率を得ることができた．

2　脳波データの収集方法

全体のシステム構成を図 1 に示す．脳波は頭部につけられた電極から生体アンプを介し，A/D 変換ボードを通して PC に取り込まれる．電極は認識や感覚に深く関係しているとされている頭頂部・後頭部を中心に選択し，国際 10/20 法に基づき，図 2 のように A1，A2(耳たぶ) を基準に 13 点に取り付けた．実験は 8 人の被験者に，円が中心から左，または右に進んでいる状態を想像してもらい，このときの脳波 (サンプリングの単位時間:1 秒，サンプリング周波数:1024Hz) を，左右 100 回ずつ計測した．1 秒を 1 個のデータとすることで，左思考データ 100 個，右思考データ 100 個を得た．

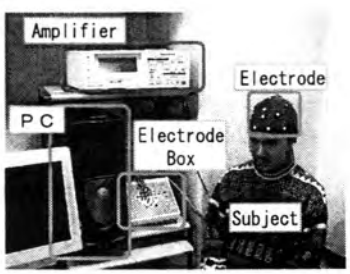


図 1: 脳波計測システム

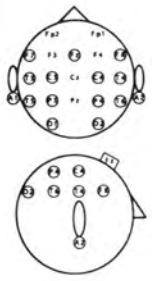


図 2: 電極の位置

3　FFT を用いた CPM 法

脳波を FFT により周波数領域に変換し，この変換後のデータに対して，相関係数パターンマッチング法 (CPM 法)[3] を適用する手法を提案し，左右思考の判別を試みた．

k 個目のデータ ($k = 1, 2, \cdots, 100$) に対して，各電極の FFT の結果を

$$F_1[n], F_2[n], \cdots, F_{13}[n] \quad n = 1, 2, \cdots, 38$$

とすると，電極 1，2 の相関係数は

$$R_{(1,2)} = \frac{\sum_{n=1}^{38}(F_1[n] - \overline{F_1})(F_2[n] - \overline{F_2})}{(38-1)S_{F1}S_{F2}} \tag{1}$$

になる．ここで，$\overline{F_1}, \overline{F_2}$ は平均値，S_{F1}, S_{F2} は標準偏差である．この計算をすべての組み合わせについて行うと，相関係数行列が得られ，このうち，重複するものと対角要素を除いて，

$$P(k) = (R_{(1,2)}, R_{(1,3)}, \cdots, R_{(12,11)}, R_{(12,13)}) \tag{2}$$
$$k = 1, 2, \cdots, 100$$

と並べなおしたものを k 個目のデータに対するパターンとする．以後，左思考と右思考のデータを用いて作成したパターンをそれぞれ $Pl(k)$，$Pr(k)$ で示し，区別する．

実験によって得られた左右 100 個ずつのパターンのうち，50 個ずつのパターンを用いて判別の基準となる認識パターンを作成する．左思考の認識パターン $\mathcal{P}l$, 右思考の認識パターン $\mathcal{P}r$ は，

$$\mathcal{P}l = \frac{1}{50}\sum_{k=1}^{50} Pl(k), \quad \mathcal{P}r = \frac{1}{50}\sum_{k=1}^{50} Pr(k) \tag{3}$$

のように $Pl(k)$ および $Pr(k)$ の平均を求めることで作成する．

つぎに，式 (3) にしたがって作成した認識パターンを用いて，左思考か右思考かわからない未知パターン $\mathcal{P}n$ を判別する方法を述べる．判別方法は未知パターンと左右の認識パターンのユークリッド距離をとり，近いほうの認識パターンの思考を未知パターンの思考とする．つまり，

$$\mathcal{L}l = \sqrt{(\mathcal{P}n - \mathcal{P}l)(\mathcal{P}n - \mathcal{P}l)^T}$$
: 左認識パターンとの距離

$$\mathcal{L}r = \sqrt{(\mathcal{P}n - \mathcal{P}r)(\mathcal{P}n - \mathcal{P}r)^T}$$
: 右認識パターンとの距離

のようにユークリッド距離を計算し，これをもとに，以下のように左右の思考を判別する．

$\mathcal{L}l < \mathcal{L}r \rightarrow \mathcal{P}n$ は左思考

$\mathcal{L}l > \mathcal{L}r \rightarrow \mathcal{P}n$ は右思考

このような判別方法を用いて，認識パターンの作成に用いなかった残りの左右 50 個ずつのパターンを未知パターン $\mathcal{P}n$ として，左右の思考の判別を行った．被験者 8 人に対する判別結果は左思考 61%，右思考 60%であった．

4 相関指数を用いたCPM法

つぎに，脳波のカオス性に着目した相関指数を利用したCPM 法を提案し，左右の判別を試みた．

m 次元に埋め込まれた L 個のベクトル $\boldsymbol{x}_i(\in \boldsymbol{R}^m)$ について，相関積分 $C(\epsilon)$ を

$$C(\epsilon) = \lim_{L\to\infty} \frac{1}{L^2} \sum_{j=1}^{L} \sum_{i=1(i\neq j)}^{L} H(\epsilon - ||\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_j||) \quad (4)$$

$$H(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t \geq 0 \\ 0 & \text{if } t < 0 \end{cases} \quad (5)$$

としたとき，相関積分 $C(\epsilon)$ と相関指数 ν には，$C(\epsilon) \propto \epsilon^{\nu}$ という関係が成り立つ．したがって，$C(\epsilon) = k\epsilon^{\nu}$($k$ は定数) とおけるので，対数を取って整理すると，$\log(C(\epsilon)) = \nu\log(\epsilon) + \log(k)$ となる．これより ν は，横軸に $\log(\epsilon)$，縦軸に $\log(C(\epsilon))$ をとった図の傾きになる．図 3 は差分を取って傾きを求めたものである．なお，埋め込み次元 m の増加に伴って，相関指数 ν の値は飽和していくが，その飽和した ν の値が相関次元である．

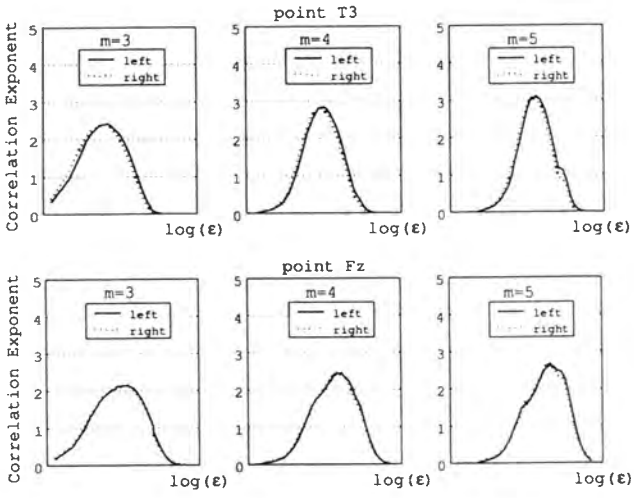


図 3: 電極 T3 および Fz で計測した脳波の相関指数

式(4)から求めた相関指数の各電極のデータを，$C_1[n], C_2[n], \cdots, C_{13}[n] \quad n = 1, 2, \cdots, 192$ とし，F を C に置きかえて，3 章と同様な手順で認識パターンを作成する．被験者 A の認識パターンを図 4 に示す．

作成した認識パターンを用いて，3 章と同様の判別方法により，左右の思考の判別を行った．被験者 8 人に対する判別結果は左思考 47%，右思考 67%となり，低い判別率であった．

5 電動車椅子への応用

3 章，4 章の結果より，提案した 2 つの解析手法の判別率は低いものだった．実験に対する慣れの問題，イメージトレーニング（左右思考の練習）の方法，判別結果の被験者へのフィードバック教示，などの検討が必要であると思われた．そこで，この点を改善した脳波の計測方法を考えた上で，FFT を用いた CPM 法により左右思考を判別することで，電動車椅子を目標位置へ制御する実験を行った．実験のシステム，フィールドを図 5，図 6 に示す．結論のみを述べると，最終的に判別率は 80%程度に向上し，十分に高い値を得ることができた．実験の詳細については文献 [4] で述べる．

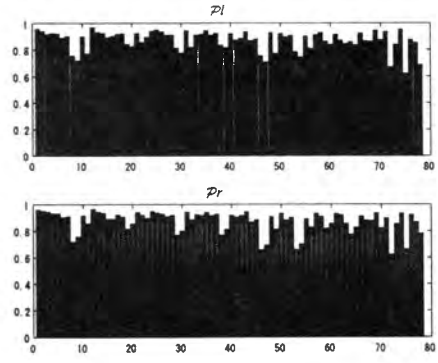


図 4: 認識パターン

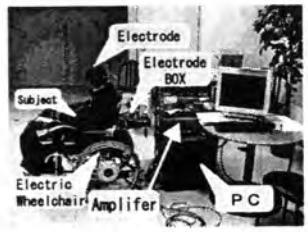


図 5: 実験システム

図 6: 実験のフィールド

6 結論

本研究では，脳波の電極間の周波数領域における相関係数に着目した解析と，カオス性に着目した解析による左右の判別方法を提案し，これを左右 2 方向の方向制御に適用した．結果は低い判別率であったが，脳波の計測方法を改善して行った電動車椅子の方向制御実験では，80%程度の十分に高い判別率を得ることができた．

今後は，より高い判別率の得られる解析手法，実験方法を検討し，電動車椅子の制御 [4] へ適用する．

参考文献

[1] 堀 滋樹, 金森直希, 田中一男: “遺伝的アルゴリズムによる脳波識別パターン作成の試み”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 38, No.10, pp.1041-1043 (2002)

[2] N. Kanamori, et al. Electroencephalographm-based Control of a Mobile Robot, Proc. of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, July, accepted (2003)

[3] 田中一男，久保康樹，松永和之，堀滋樹，脳波認識によるロボット操作，第 18 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.467-470 (2002)

[4] 松永和之，田中一男，電動車椅子の脳動制御，第 21 回日本ロボット学会学術講演会 (2003)

問い合わせ先

〒 182-8585　東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
電気通信大学 知能機械工学科　松永　和之
Tel 0424-43-5431
E-mail: matunaga@rc.mce.uec.ac.jp

学習型フーリエ変換システムを用いた振動解析制御
—ファジィネットワークシステムを用いた数値実験—
Vibrational Analysis & Control Which Use The Learning Type Fourier Transform System: Numerical Experiments Which Use The Fuzzy Network System

○松浦克昌[1]　　鈴木仁美[1]
Katsumasa Matsuura　　Hitomi Suzuki
[1] 筑波大学図書館情報学系　Institute of Library and Information Science, University of Tsukuba
[1] (株)データ通信システム　Data Communication System Co.,Ltd

Abstruct: The research regarding the construction of the learning type fourier transform system which uses fuzzy network is already reported, but in this research this system is applied to the numerical experimental model of the shaking table which was constructed on the computer, reliability of the system is examined. Here first, the fundamental examination regarding the conversion precision of the learning type fourier transform system is done. Next, synthesis of excitation ripple mark such as the random ripple mark which uses the system and excitation experiment of the shaking table model which uses this synthetic wave are done, furthermore analysis of the accelerating response magnification ratio which uses the system is done, comparison with the theoretical value is done.

1．まえがき

任意波形のフーリエ変換はサンプリング点毎の学習済み点入力NN(ニューラルネットワーク)に波形を入力し、個々ＮＮの出力を重ね合わせて波形全体の変換を得る。非常に非効率的な手法ではあるが、学習型 NN によるフーリエ変換機能の獲得は個々NN の学習による変換精度を確保できれば手法的に完成である。この手法の原理特許は平成２年（１９９０年）に出願され、平成３年に公開されているが、現在は公知である[1]。１９９０年開催の「SYNAPSE 千里国際ニューラルネットシンポジューム」パネル展示では１６点波形の場合の正逆フーリエ変換システムを試作し、その可能性を示した[2]。この研究は人工知能学会全国大会でも発表されたが[3]、学習に時間がかかるなどの非効率性を差し置いても、まだこの時点では学習精度は満足できるレベルには達していなかった。１つの進歩は点入力ＮＮを点入力ファジィシステムにすることで起こった。この結果は平成６年（１９９４年）情報処理学会第４９回全国大会で発表されたが、これによって学習精度が大幅に向上し、学習時間も大幅に短縮した[4]。この結果ファジィシステムを用いた大規模学習型フーリエ変換システムが現コンピュータ環境で可能となった。１９９８年、学習型ファジィシステム網を用いた５００点フーリエ変換装置を試作し、第４１回自動制御連合講演会で発表した[5]。この結果は期待通りの高精度を得られたが、本研究ではこの学習型フーリエ変換システムを用いて振動解析制御が行えるかという検証を行う。コンピュータ上に正逆フーリエ変換システムと振動台運動モデルを構築し、振動台加振波の合成や応答波形のスペクトル分析をシステムを用いて行うとともに、加速度応答倍率の理想値との比較などにより、システムの信頼性を示す。

2．学習型フーリエ変換（ＦＴ）システム

サンプリング周波数 f_s でＴ秒間切り出された離散波形の正フーリエ変換ＤＦＴおよび複素フーリエスペクトルから波形への逆フーリエ変換ＩＦＴは離散波形あるいはスペクトルの１本毎の変換に分解でき、１本づつの変換結果の重ね合わせにより、全体の変換が得られる。学習型ＦＴの根幹はこの重ね合わせの特徴を利用することである。離散波形やスペクトルの１本毎に点入力ＦＴファジィシステムを配置し、学習する。個々のシステムの学習は絶対値１以下の任意入力に対する教師信号（Ｎ個の変換値）を用いて行われる。Ｎはサンプリング点数。学習後の個々ファジィシステムの点入力には変換対象の任意波形あるいはスペクトルを配分し、個々システムのＮ個の出力を重ね合わせて全体の変換を得る。

2．1　点入力ＦＴファジィシステム

grade g(i)	i	if SP(j)	then r(i, n) n = 0	1	2	3 15
g(0)	0	NB	r(0,0)	r(0,1)	r(0,2)	r(0,3) . r(0,15)
g(1)	1	NM	r(1,0)	r(1,1)	r(1,2)	r(1,3) . r(1,15)
g(2)	2	NS	r(2,0)	r(2,1)	r(2,2)	r(2,3).. r(2,15)
g(3)	3	ZR	r(3,0)	r(3,1)	r(3,2)	r(3,3).. r(3,15)
g(4)	4	PS	r(4,0)	r(4,1)	r(4,2)	r(4,3). r(4,15)
g(5)	5	PM	r(5,0)	r(5,1)	r(5,2)	r(5,3 .r(5,15)
g(6)	6	PB	r(6,0)	r(6,1)	r(6,2)	r(6,3) .r(6,15)
output X(n)			X(0)	X(1)	X(2)	..... X(15)

図１

図１は点入力 SP(j)を NB～PB の７ラベルを用いたif-then ルールで前提評価し、各ラベル適合度 g(i)を得るとともに、各ルールの N=16 個の結論 r(i,n)を未知とし、

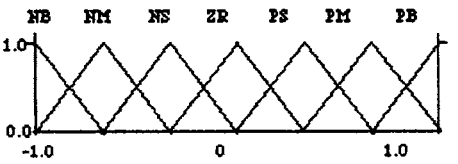


図２

これを学習するファジィシステムの一例である。図２はメンバシップ関数。各ルールのファジィ推論はｉ番目 if-then ルールの適合度 g(i)を重みと考え、そのルールの結論 r(i,n)をストロークとしてこれらの積で与える。この場合各ルールとも n=0～N-1 の N 個の推論結果を得る。デファジィ化による出力 XJ(n)は同じｎに対してｉ=0～6の７ルールの重心演算を行う。

$$XJ(n)=\sum_{i=0}^{6}[g(i)\cdot r(i,n)]/\sum_{i=0}^{6}g(i) \qquad (1)$$

２．２　点入力ＦＴファジィシステムの学習

図１は点入力 SP(j)、出力 XJ(n)である。これは点入力 IFT のファジィシステムを示す。入出力を入れ替えれば点入力 DFT システムになる。ここで、点入力 SP(j)は複素フーリエスペクトル S(k)の１本のスペクトルである。実数、虚数スペクトル Re(S(k))、Im(S(k))は SP(j=2k)、SP(j=2k+1)に対応する。S(k)の本数 K は N の半分であるが、実数、虚数スペクトルを独立に考えれば IFT 対象のスペクトルの本数は N になる。

図１の入出力関係は(1)式で与えられるから、この出力に教師信号 Tch(n)を対応させて、最急降下法を用いて未知量 r(ｉ,n)を学習する。点入力 IFT の場合の Tch(n)は

j=2k の場合　Tch(n)=Re(S(k))・cos(2πkn/N)　(2)

j=2k+1 の場合　Tch(n)=－Im(S(k))・sin(2πkn/N)

最急降下法では誤差エネルギ E(n)=(Tch(n)－XJ(n))²／2 の出力全体 N 点の総和 Esum：

$$Esum=\sum_{1}^{P}E(p)\ ,\quad E(p)=\sum_{0}^{N-1}E(n) \qquad (3)$$

が０になるよう r(i,n)を調整する。この学習では任意スペクトルに対応するため、(2)式の Re(S(k))、Im(S(k))は絶対値が１以下の任意を網羅するよう数点(P)が与えられる。(3)式はこの任意値学習の条件を全て含んだ形の誤差エネルギを表現する。これを０に近づける r(i,n)の調節式は

$$\Delta r(i,n)=\beta\cdot g(i)[Tch(n)-XJ(n)] \qquad (4)$$

$$r(i,n)^{new}=r(i,n)^{old}+\Delta r(i,n) \qquad (5)$$

βは学習定数であり、通常はβ<1.

２．３　点入力ＦＴファジィシステムの重ね合わせ

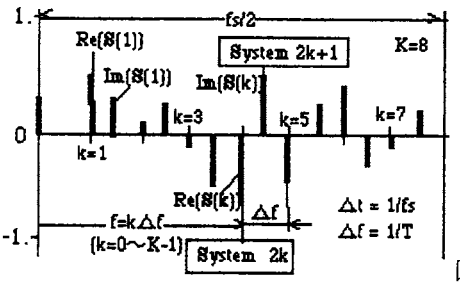


図３

図３は複素フーリエスペクトルの一例を示す。K=0,1,2,…,K-1 の K 本の複素フーリエスペクトルが実数スペクトル Re(S(k)、虚数スペクトル Im(S(k)の順に 2K 本並ぶ。このスペクトル全体の IFT は

$$x(n)=\sum_{-(K-1)}^{(K-1)}S(k)e^{j2\pi kn/N}/T \qquad (6)$$

と与えられる。ただし、n=0,1,2,…,N-1。x(n)は IFT 離散波形の n 番目波形変位を示す。(6)式は両側スペクトルの IFT 表現であるが、これを図３のごとく片側スペクトルの IFT 表現に変換すると、

x(k,n)=Re(S(k))cos(2πkn/N)－Im(S(k))sin(2πkn/N)

$$x(n)=x(0,n)/T\ +\ (2/T)\sum_{k=1}^{K-1}x(k,n) \qquad (7)$$

ここで (7)式 x(k,n)の右辺第１項は(2)式教師信号第１式に等しく、第２項は第２式に等しい。このことは 2K 個ある学習型点入力 IFT ファジィシステムの偶数番目、奇数番目の出力を全て重ね合わせれば複素フーリエスペクトルの IFT が得られることになる。ただしこの重ね合わせには注意が必要である。点入力 IFT ファジィシステムの数は j=0,1,2,…,2K-1 の 2K 個ある。(7)式第２式のごとく k=0 即ち j=0,1 の時は 1/T を出力に掛けて IFT を得る。一方 k>0 の時は 2/T を出力に掛けて IFT を得る。結局、IFT 対象スペクトルの S(0)を最初に 1/2 しておけば学習型システムの出力全体を重ね合わせた後に 2/T を掛けて対象スペクトルの IFT を得ることができる。

３．学習型 FT を用いた振動解析制御

３．１　数値実験システムの概要

本研究で開発した数値実験システムは VB6.0 を用いて構築し、１フォーム上中央にピクチャボックスを配し、その周りに波形処理と振動台数値実験モデル関連オブジェクト群を配して１つのプロジェクトを構築している。波形処理システムでは既開発の学習型正逆 FT システムをこのプロジェクトに移植し、波形の作成や分析に適用し、適用に当たっての問題点を検討し、解決する。振動台数値実験システムにおいては作成された加振波を用いて１自由度振動台モデルを加振し、その加速度応答倍率を学習型 DFT システムを用いて観測するとともに、理想値との比較を自動的に行い、作画する。

３．２　離散波形の作成プログラム

波形のデータ点数を N、切り出し時間 T とするとサンプリング周波数 f s=N/T となり、時間分解能Δt=T/N、周波数分解能Δf=1/T、ナイキスト周波数= f s/2、複素フーリエスペクトル本数 K=N/2 を得る。

（１）時間領域での波形作成

時間領域での周波数ωの振動 x(t)を一般的に書くと

x(t)=Amp・cos(ωt－phase)＋x0

=Acos(ωt)＋Bsin(ωt)＋x0　(8)

Amp は振幅、phase は位相遅れ、A、B は余弦波、正弦波振幅、x0 は直流分。これを離散波形の形に変換すると、t=n・Δt、ω=2πf、f=k・Δf として

x (n)=Amp・cos(2πk・n/N－phase)＋x0　(9)

ここで、n=0,1,2,…,N-1(k=0,1,2,…,K-1)。

例として、N=50、T=1s、f=2Hz、Amp=0.8、x0=-0.2、phase=π/4 の場合はΔt=0.02、Δf=1Hz となり、k=2。図４はこの場合の時間波形を示す。また学習型 DFT でこ

の波形を分析した結果も示す。

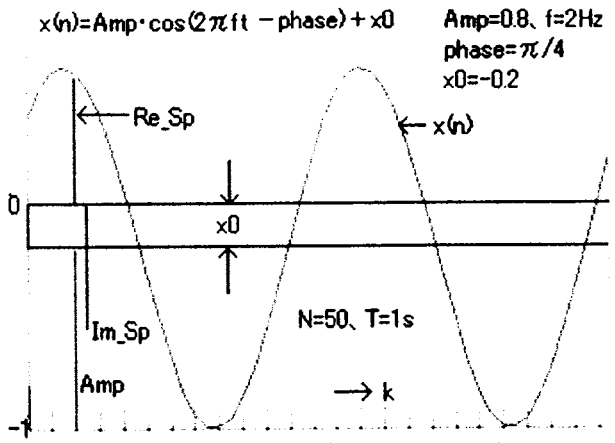


図4　時間領域での波形作成とそのスペクトル

(9)式は次数k単独周波数の時間領域波形を示すが、複数周波数の場合は各成分周波数の次数kを陽に x(k,n)と記述して、x(k,n)を重ね合わせてx(n)を得る。

（2）周波数領域での波形作成

図4の波形は振幅、直流分とも設定値と1対1で対応し、矛盾が無い。これはここに示したスペクトルがフーリエ級数次元での表示Sp(k)になっているためである。複素フーリエスペクトルS(k)との関係は

k=0：　ReS(k)=T・ReSp(k)、ImS(k)=0

k>0：　ReS(k)=(T/2)・ReSp(k)　　(10)

ImS(k)=-(T/2)・ImSp(k)

なお、フーリエ級数次元とはスペクトルの次元だけはフーリエ級数であり、波形と設定値の対応がよいが、実態は複素フーリエスペクトルである。フーリエ級数は周波数分解能が波形の基本周期に固定されるが、フーリエ変換ではデータの切り出し時間長で周波数分解能が決まり、調節可能なところが特徴と言える。

（3）ランダム波の合成と学習誤差

フーリエ級数次元のk次スペクトルSp(k)を

$$Sp(k)=Amp(k)\cdot e^{i\,(phase(k))} \qquad (11)$$

と与えると、振幅Amp(k)と位相遅れphase(k)でk次周波数成分を設定できるため便利である。直流分をx0とすると(10)式を考慮して複素フーリエスペクトルS(k)は

k>0：ReS(k)=(T/2)・Amp(k)・cos(phase(k))

ImS(k)=-(T/2)・Amp(k)・sin(phase(k))

k=0：ReS(0)=T・x0　、ImS(0)=0　　(12)

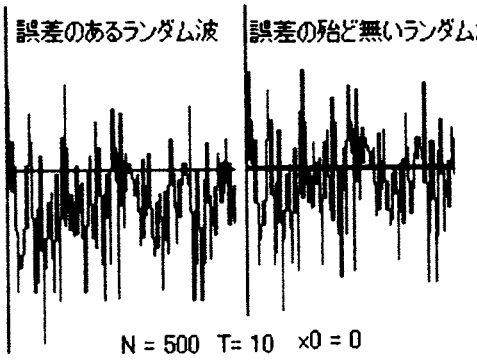


図5

となる。これをIFTすれば時間領域波形x(n)を得る。図5はN=500、T=10、Amp=0.015帯域内一定、phase=0～2π帯域内ランダム、直流分x0=0としたときのIFTランダム波の比較を示す。左右の違いは学習型FTシステムにおける個々点入力FTシステムの学習時誤差エネルギ打ち切り値を左側0.001、右側0.00001とした点だけである。x0=0であるから、左図の直流分と感じられる分が誤差蓄積分である。このシステムではデータ点数Nの増大は誤差蓄積を招く。学習精度を上げることが重要といえる。

3．3　振動台モデルと運動方程式

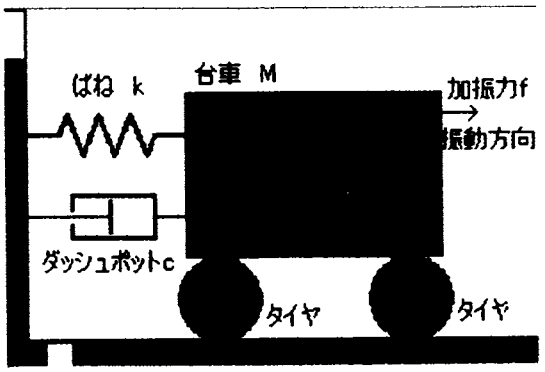


図6

図6の振動台モデルを3．2節で作成した加振波を用いて加振し、振動台の応答加速度を学習型DFTシステムで解析する一連の数値実験を通して学習型FTシステムの信頼性について見当する。先ず、図6の系の運動方程式は台車質量M,減衰係数c、ばね係数k、加振力fとして、

$$f = M\ddot{x} + c\dot{x} + kx \qquad (13)$$

この式の両辺をMで割り、F=f／Mとして整理すると

$$F = \ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n{}^2 x \qquad (14)$$

$\omega_n=\sqrt{k/M}$ は固有振動数、$\zeta=c/(2\sqrt{Mk})$ は減衰比。

3．4　振動台モデルの数値加振実験と応答波形

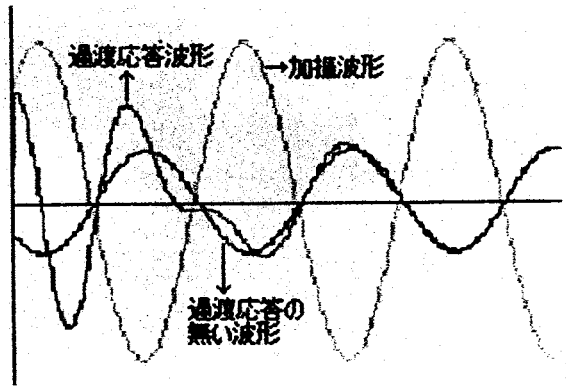


図7

図7はN=500,T=1,Amp=0.5,freq=5、x0=0、phase=π/4の加振波形を作成(k=5)し、この波形で振動台モデルを励振した時の応答波形を併記したものである。この場合の振動台モデルは固有振動数f_n=10Hz($\omega_n=2\pi f_n$)で加振周波数freq=5Hzの2倍、減衰比率ζ=0.15とした。過渡応答波形は加振直後の振動台モデルの応答波形である。静止状態から急に加振が始まったために、系の固有振動が発生、加振応答波に重畳され、複雑な運動が生じる。過渡応答の無い波形は

同じ加振波形で2回連続加振し、固有振動が十分減衰した2回目の応答波形を観測したものである。なお、ここでの数値積分はRunnge Kutta法を用いて行っている。

3．5　加速度応答倍率

(14)式で加振加速度 F=Amp・cos ωtとすると

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n{}^2 x = Amp\cos\omega t \qquad (15)$$

この式の定常解(強制振動解)を次式で与える。

$$x = x_c \cos\ \omega t + x_s \sin\ \omega t \qquad (16)$$

これを(15)式に代入し、x_c、x_sを求めると

$$x_c = \frac{Amp(\omega_n{}^2 - \omega^2)}{(\omega_n{}^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2}$$

$$x_s = \frac{2\zeta\omega_n\omega \times Amp}{(\omega_n{}^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2} \qquad (17)$$

また、(16)式を2回時間微分し、加速度の大きさを導くと

$$\ddot{x} = -\omega^2(x_c\cos\omega t + x_s\sin\omega t)$$

$$|\ddot{x}| = \omega^2\sqrt{x_c{}^2 + x_s{}^2} \qquad (18)$$

を得る。ここで、$\lambda = \omega / \omega_n$と置くと加速度応答倍率

$$\frac{|\ddot{x}|}{Amp} = \frac{\lambda^2}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \qquad (19)$$

を得る。これが加速度応答倍率の理想値である。

3．6　加速度応答倍率理想値と実験値の比較

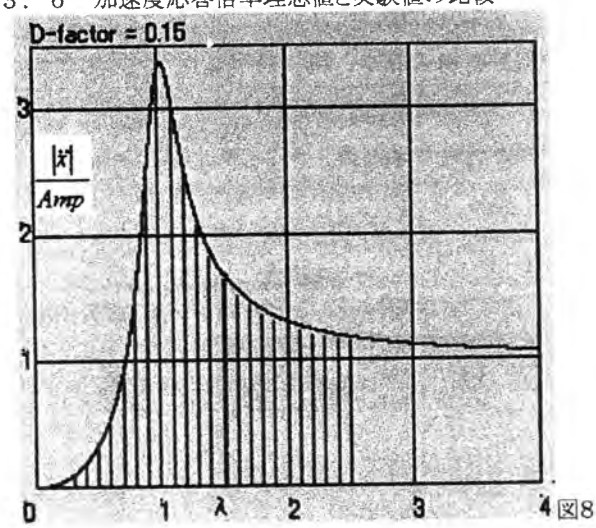


図8

図8は固有振動数 N_freq=10Hz(ω_n=20π/s)、減衰比率ζ=0.15 の振動台モデルを N=500、T=1、Δt=0．002、amp=0.1、x0=0、phase=π/4 の条件で加振周波数を変え、余弦波加振した場合の加速度応答倍率実測値を棒グラフで示したもので、曲線は(19)式の理想値を示す。加振周波数 freq は 1～25Hz まで 1Hz 間隔で変え、加速度応答波形振幅比(棒グラフの高さ)は過渡応答の無い波形振幅で評価した。この振幅評価は学習型 DFT システムを用いて行った。

3．7　ランダム加振波を用いた加速度応答倍率数値実験

図9は固有振動数 N_freq=10Hz(ω_n=20π/s)、減衰比率=0.15 の振動台モデルを N=500、T=1、x0=0、amp=0.015 帯域

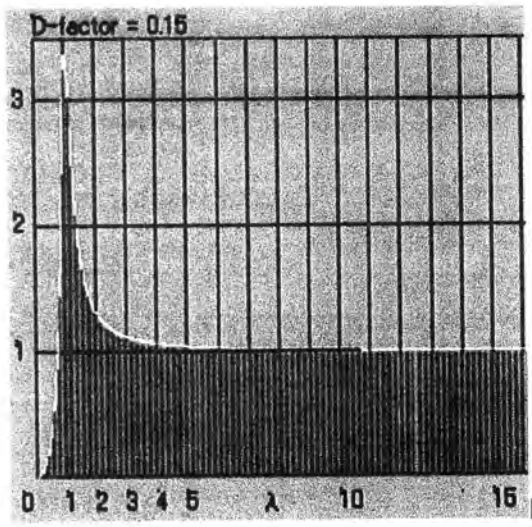


図9

内一定のランダム波で加振したときの加速度応答倍率特性を示す。理想曲線値と棒グラフ実験値がよく一致している。図8の余弦波による実験では加振周波数を変えるごとに加振実験を新しく行う必要があり、手間と時間のかかる実験であったが、図9のランダム波による加振では250Hzまでの帯域内周波数成分を分解能1Hzですべて包含しているため、学習DFTを用いた振幅観測は過渡応答の無い2回目加振時の波形分析で周波数帯域全体の加速度応答振幅比を得ることができる。ランダム波加振では大振幅の加振ができないなどの問題があるが、帯域内応答を1回の観測で済ませられることはメリットである。

4．結言

コンピュータ上に1自由度振動台数値実験モデルを構築するとともに、このモデルの加振実験やその応答スペクトル観測実験に使用する、既開発ファジィシステム網を用いた学習型フーリエ変換システムを構築し、そのシステムの信頼性を検討する。ここでは先ず、学習型フーリエ変換システムの変換精度に関する基礎検討が行われている。次いでこのシステムを用いたランダム波形等の加振波形の合成やこの合成波を用いた振動台モデルの加振実験が行われ、さらにこのシステムを用いた振動台モデルの加速度応答倍率の解析が行われ、理想値との比較が行われている。

5．参考文献

[1] 松浦克昌(KK 日立製作所):フーリエ変換ニューラルネットワーク装置、公開特許公報(A)平3－24506(1991.10.31)、特願平2－41017(1990.2.23)

[2] 松浦、"任意波形の正逆フーリエ変換を行う多層階層構造ニューラルネットワークの構成方法"、千里国際ニューラルネットシンポジュウム講演会予稿集、pp.107-108(1990-5)

[3]松浦、人工知能学会誌、Vol.6、No.5、pp.734-738(1991)

[4]松浦、"学習型ファジィネットワークを用いた任意波形の正逆フーリエ変換"、情報処理学会全国大会講演論文集(2)"、pp.291－292(1994)

[5]松浦、"学習型ファジィシステム網を用いた５００点フーリエ変換装置"、第４１回自動制御連合講演会前刷、1998、pp.287-288

[6]長町三生：ファジィ化製品開発の基礎と実際、海文堂、1991

連絡先　〒305-8550 茨城県つくば市春日１－２
筑波大学図書館情報学系　松浦克昌
Tel 029-859-1343, E_mail: matsuura@slis.tsukuba.ac.jp

能動的学習法を用いたノンホロノミック系の学習制御に関する研究

A Study on Learning Control of Non-holonomic System by Active Learning Method

櫻井義尚　　本多中二　　西野順二
Yoshitaka SAKURAI　　Nakaji HONDA　　Junji NISHINO

電気通信大学 電気通信学部 システム工学科
Department of systems Engineering, University of Electro-Communications

Abstract: In this paper, we will show a new method for acquiring control knowledge actively. We call it ALM. A feature of ALM is its learning process. At first ALM model a system, and based on the model ALM design a learning plan. Control simulation is done in order to prove the effectiveness of this technique.

1. はじめに

本研究の目的は人間の能動学習機能の工学的実現である.

人間の学習の特徴に以下のようなものがある.

①教師信号が無い場合でも試行錯誤による学習が可能. ②経験による知識の蓄積により能動的に効率の良い学習が可能. ③断片的な情報の集合から, パターン的な情報を推測できる.

本研究ではこのような脳のマクロな機能に注目したトップダウン的なアプローチによる人間の能動学習機能の工学的実現を目指す.

具体的には試行錯誤により能動的に制御知識を獲得する方法, 能動的学習法を提案する. そして, 2重振子の制御問題における行動政策の学習シミュレーションを行い, この手法の妥当性を検証していく.

2. 能動的学習法

2.1 能動的学習法(Active Learning Method)

人間の学習においてもっとも重要な要素の一つに「経験」がある. 人間の判断も, 過去のAのときBだったといった経験を基にしていることが多い. 人間の運動制御などもこれの最たるものであり, パターン的なルールを経験的に学んでいったものであると考えられる. そこで我々はこのような人間的な学習の工学的な具現化として能動的学習法 (以後ALM) を提案する. ALMはモデリングにパターン的アプローチを試みたものでこの対象となる多入力多出力のシステムを1入力1出力ごとに分割し, その特性を繰り返し学習的に抽出して再度, 総合化する. このことにより対象となるシステムを, ファジィ的な解釈に基づいて機能的にモデリングする手法である.

ALMでは, あるシステムの挙動を学習する場合, そのシステムの入出力関係を把握することから始める. 対象となるシステムの入出力データを収集し(図1①), それによりシステムをモデリングする (図1②). そしてその知識を記憶しつつ, また試行錯誤的に入出力データを収集し (図1③), 過去の知識とそのデータを使ってシステムをモデリングする. これを繰り返す.

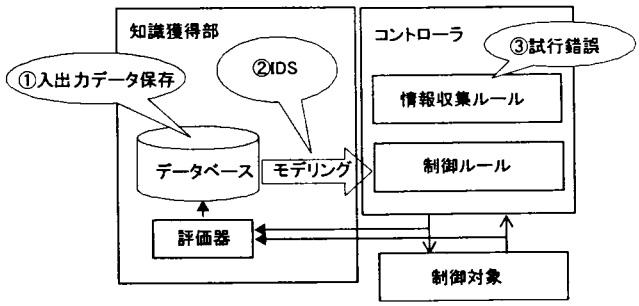


図1　ALMシステム

2.2 モデリング

ALMでは, 入出力データをデータ平面上に射影し, その平面上から連続した一筋の経路 (ナロウパス : Narrow Path) を抽出することで, システムの特徴を掴む. またALMでは, 複入力複出力 (MIMO) のシステムを単入力単出力 (SISO) のシステムに分割し, それを結合することにより表現している. そして, この単入力単出力システムのナロウパスの抽出には**2.3**で提案するInk Drop Spread (以下, IDS) を用いる.

2.3 IDS (Ink Drop Spread)

IDSの基本コンセプトは, 入出力データからファジィ手法を用いてシステムの特性 (ナロウパス) を抽出することである.

ここで, データ平面上の全てのデータを光源と考える(図2). データの一定垂直上から照射すると, それぞれの光は干渉し合い, 明暗を示す照明パターンが現れる. つまり光が多く重なり合う部分は他の領域よりも明るくなり, そうでない部分は暗くなる. 明るい領域を連続的に結合することで, 入出力関係を表すある種の経路 (ナロウパス) を得ることが出

来る[1].

また，このIDSを適用することによりナロウパスとともに照射パターンの広がりの情報も得られる．この広がり情報はデータのとり方により他のパラメータの影響や入出力関係の不確定の度合いなどの情報を含む．この情報により，入出力関係の不確定部分の検出や確立的動作の表現が可能になる．

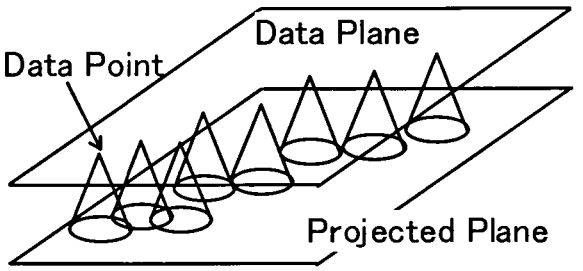


図2　IDS(Ink Drop Spread)

3. シミュレーション

3.1 二重振子

アクロボットと呼ばれる二重振子は人間の鉄棒運動に似た力学モデルである（図3）．鉄棒を摑む手に相当する部分，リンク0は非駆動関節であり，動摩擦による力のみがかかる．制御トルクは腰に相当する部分，リンク1にのみ与えられる．

このためθ_0は，モデルの重心位置と姿勢形状に依存する．すなわち，θ_1を決めるとθ_0の値を任意に決めることはできない．

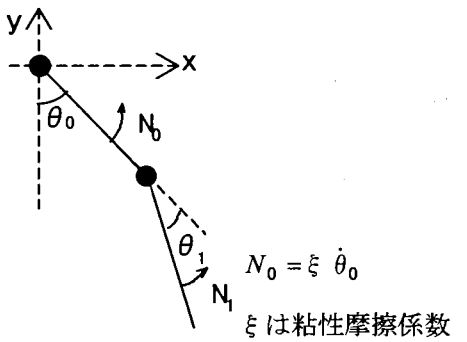


図3　2重振子

また，より鉄棒運動のモデルに近づけるためリンク1は駆動制限を設けている（$-130° \leqq \theta_1 \leqq 130°$）．よってリンク1は回転できない．

運動方程式を4次のルンゲクッタ法により離散化し，Δt=1/1000 秒として計算機シミュレーションを行う．

3.2 2重振子制御シミュレーション

2重振子のモデルを制御対象として，ALMを用いてその振幅増大制御ルールを獲得する知識獲得シミュレーションシステムを構築する．

図1を適用すると，制御対象は2重振子のモデルであり，コントローラーから受け取る操作量（トルク）によってモデルの状態（各リンクの角度，角速度）を変化させ，コントローラーにそのモデルの状態を返す．

コントローラーははじめ設定された情報収集ルールにしたがって操作量を出力し，制御対象の入出力データを収集し，そのデータを基に知識獲得部において制御ルールを学習していく．学習が進むと学習した制御ルールによりモデルの状態を入力として，操作量を出力する．

3.3 シミュレーション結果

学習過程を見ると最高到達角度が上がっていっている様子がわかる（図4）．しかし，この過程で到達角度が著しく低い谷ができている．これはより最適な制御ルールを獲得する過程での学習期間であると考えられる．前の制御ルールより最適な行動を発見し，その知識を模倣する際に過去の知識との不整合により一時的に性能が落ちるが，さらに学習が進むとより最適な制御ルールを獲得できるのだと考えられる．

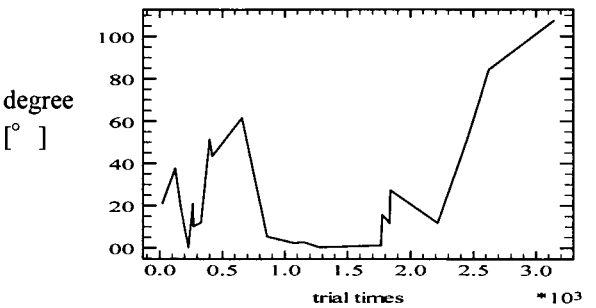


図4　実験結果

4. おわりに

本研究では，試行錯誤により能動的に制御知識を獲得する方法，能動的学習法を提案し，2重振子の行動政策の学習シミュレーションを通してこの手法の有効性を示した．しかし，学習過程での性能の低下は大きな問題である．今後アルゴリズムの改良を重ねて，より良い手法として確立していくつもりである．

参考文献

[1] Yoshitaka SAKURAI, Nakaji HONDA, Junji NISHINO: "Acquisition of Knowledge for Gymnastic Bar Action by Active Learning Method", Jounal of Advanced Computational Intelligence & Intelligent Infomatics (JACIII), Vol.7, No.1, pp.10-18 (2003)

[問合せ先]
〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
電気通信大学システム工学科本多研究室
櫻井 義尚
Tel:0424-43-5800 Fax: 0424-43-8020
E-mail:ysakurai@fs.se.uec.ac.jp

Driving Skills Learning Algorithm for Save Navigation of Autonomous Intelligent Agent

Gancho VACHKOV, Shinichi KATAOKA and Hiroshi ISHIKAWA

Department of Reliability-based Information Systems Engineering,
Faculty of Engineering, Kagawa University,
Hayashi-cho 2217-20, Takamatsu-Shi, 761-0396 Kagawa-ken, JAPAN

FAX: +(81) 87 - 864-2262 E-mail: vachkov@eng.kagawa-u.ac.jp

Abstract. In this paper an off-line learning algorithm based on a random optimization method that is able to tune the parameters of the fuzzy controller with a given structure is proposed.. A *Takagi-Sugeno* type of fuzzy controller is used for driving the agent and the problem is how to optimize its parameters (singletons), so that the performance of the agent movement among a number of static obstacles is improved during learning. A *Mamdani*-type of fuzzy controller with feasible and empirically created Fuzzy Rule Base can be used in the beginning as a starting point for the subsequent optimization.
The simulation results show the effectiveness and robustness of the learned fuzzy controller.

Index Terms— Intelligent Agent, Navigation, Driving Skills, Learning Algorithm, Fuzzy Controller

I. INTRODUCTION

The problems of obstacle avoiding, path planning and autonomous navigation of intelligent agents such as robots and other mobile vehicles have long been a matter of strong interest for many researchers [1-5]. Variety of methods and algorithms have been proposed and used for designing appropriate control algorithms as well as for learning the parameters of the controllers. Even if significant results have been obtained in this area by using neural, fuzzy and evolutionary computing approaches none of them can be regarded as a complete success or machine invariant solution.

The ability of an autonomous agent for collision-free navigation through unstructured terrain, being able to explore a large area for image or data gathering is doubtless an evidence for the "intelligent" behavior of the agent.

In this paper we propose an off-line learning algorithm that is able to build up "driving skills" for the agent based on a random optimization method for iterative improvement of its performance.

A *Takagi-Sugeno* type of fuzzy controller is used for driving the agent and the problem is to gradually update its parameters, so that the performance of the agent movement among a number of static obstacles is improved during time.

First of all initial knowledge (skills) from an average good performance of an agent are used in order to start the leaning process. In this step a transition from the initial *Mamdani*-type of fuzzy controller to the further used TS fuzzy controller is. The simulation results show the effectiveness and applicability of the proposed overall learning scheme.

II. EMPIRICAL DESIGN OF THE FUZZY CONTROLLER STRUCTURE

Further on we assume the following flowchart for the real time navigation of the autonomous agent, as shown in Fig. 1.

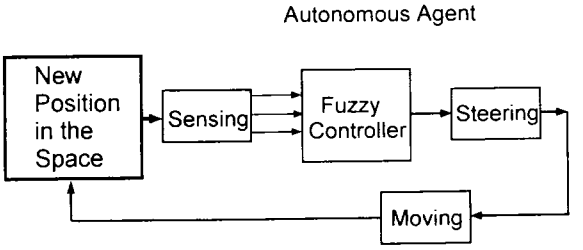


Fig.1. General Flowchart of the Real Time Movement of the Autonomous Agent

We suppose that the Agent is navigating in the space with a constant speed by making equal sized steps at each discrete time k. The *Sensing System* consists of three sensors for measuring the distance from the agent to the environment, as follows: **S1** is the *Left Sensor*, **S2** is the *Front Sensor* and **S3** is the *Right Sensor*.

As a fuzzy controller we first use *Mamdani*-type of controller with *5* fixed singletons as rules consequents. The Fuzzy Rule Base that is used to drive the agent within the space containing unknown number of obstacles is given as follows:

$$R_l: IF\{s_1(k) is\ i_1\ AND\ s_2(k) is\ i_2\ AND\ s_3(k) is\ i_3\} \quad (1)$$
$$THEN\ \Delta u_l(k) = c_l,\ l = 1, 2, ..., L$$

Here the following notations are used: L is the total number of the fuzzy rules; $s_1(k)$ is the measured distance to the environment by the Left Sensor **S1** of the agent at the current discrete time k; $s_2(k)$ is the distance measured by the Front Sensor **S2** and $s_3(k)$ is the distance measured by the Right Sensor **S3**; i_1, i_2 and i_3 represent the index for the linguistic variable (the membership function) of each input for this fuzzy rule. Further on we assume *3 Gaussian*-shape membership

functions, which overlap about 60%, as shown in Fig. 2. to denote the linguistic values of "Close" (1), "Medium" (2) and "Far" (3). Thus we can write that $i_1, i_2, i_3 \in [1,2,3]$.

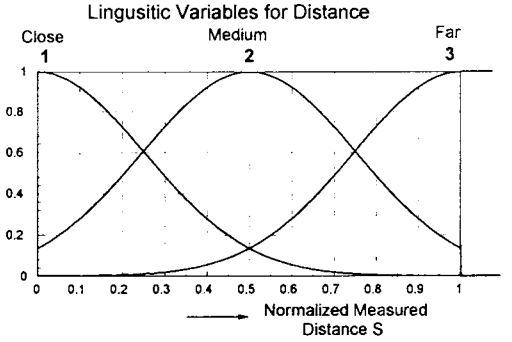


Fig. 2. Membership Functions for the Inputs

The consequent $\Delta u_l(k) = c_l$ of the l-th fuzzy rule is a singleton that represents the *change-of-the steering angle*. In the *Mamdani*-type of fuzzy controller each rule consequent takes one value of the preliminary set of fixed positions. Here we use the following *5* singleton values $c_l \in [-b, -a, 0, +a, +b]$, $l = 1, 2, ..., L$ as shown in Fig. 3. They represent the Linguistic variables of "*Negative Big*", "*Negative Small*", "*Zero*", "*Positive Small*" and "*Positive Big*".

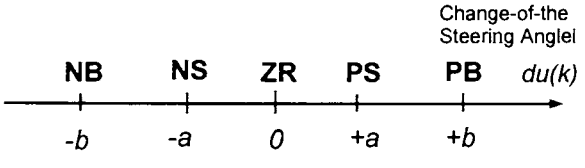


Fig. 3. Singletons for the Outputs of the Fuzzy Rules

The overall output of the fuzzy controller is calculated as a *weighted average* defuzzification in the following way:

$$\Delta u(k) = \sum_{i=1}^{L} Tv_i . c_l \Big/ \sum_{i=1}^{L} Tv_l \qquad (2)$$

where Tv_l denotes the activation degree (the *truth value*) of the l-th fuzzy rule taken as a product operation of the respective fuzzified values of the measurements $s_1(k)$, $s_2(k)$ and $s_3(k)$ in (1).

Then the current steering angle of the agent is calculated in the following incremental way, before the agent makes its next moving step in the space:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \qquad (3)$$

Figure 3 shows the standard 3 sensors measuring system that is used to measures the distances between the agent and the obstacles in the environment (if any): O1, O2, O3, O4. Please note that each sensor is allocated a sensor range: r_1, r_2 and r_3 respectively, which depends on the physical structure and characteristics of each sensor. Usually $r_2 \geq r_1$, $r_2 \geq r_3$ and $r_1 \approx r_3$ but this is not a rule. From a physical point of view, the real measured distance by each sensor is: $s_i \leq r_i, i = 1, 2, 3$.

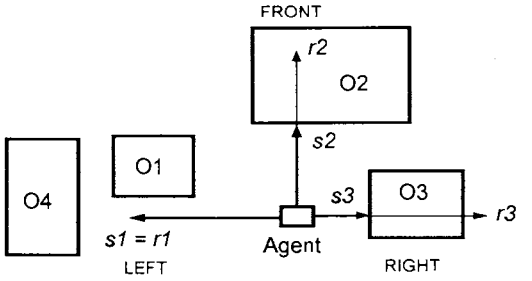


Fig. 4. Standard 3-Sensors System for Navigation with Sensing Directions of –90° for the Left Sensor, 0° for the Front Sensor and +90° for the Right Sensor.

The Fuzzy Rule Base of the fuzzy controller is usually created in empirical way by using human knowledge and logic of the control (driving) process. This always causes to some degree of ambiguity that should be further decreased by appropriate tuning (learning) of the parameters of the fuzzy controller.

The following Table 1.shows two empirically generated Fuzzy Rule Bases: **FRB0** and **FRB1** for navigation of the autonomous agent for the *Mamdani*-type of fuzzy controller with the standard *3* sensors system from Fig. 4. As shown in the further simulations, the Fuzzy Rule Base **FRB1** is more reasonable (logical) and leads to a better performance.

Table 1. Two Empirically Created Fuzzy Rule Bases

Rule	S1 Left	S2 Front	S3 Right	FRB 0	FRB 1
1	1	1	1	*-a*	*a*
2	1	1	2	*a*	*b*
3	1	1	3	*b*	*b*
4	1	2	1	*0*	*a*
5	1	2	2	*0*	*a*
6	1	2	3	*a*	*b*
7	1	3	1	*0*	*0*
8	1	3	2	*0*	*b*
9	1	3	3	*0*	*b*
10	2	1	1	*-b*	*-a*
11	2	1	2	*-b*	*-b*
12	2	1	3	*b*	*b*
13	2	2	1	*0*	*-a*
14	2	2	2	*0*	*-a*
15	2	2	3	*0*	*a*
16	2	3	1	*0*	*a*
17	2	3	2	*0*	*0*
18	2	3	3	*0*	*a*
19	3	1	1	*-b*	*-a*
20	3	1	2	*-b*	*-b*
21	3	1	3	*-b*	*-b*
22	3	2	1	*-a*	*-a*
23	3	2	2	*-a*	*-b*
24	3	2	3	*-a*	*-b*
25	3	3	1	*0*	*-a*
26	3	3	2	*0*	*-b*
27	3	3	3	*0*	*0*

III. Modifications in the Fuzzy Control Structure

As well known from the literature, the *Takagi-Sugeno* (TS) fuzzy models are regarded as "universal approximators" of any nonlinear function thus being widely used in many simulation and control areas. The often called "zero order" TS Fuzzy Model, has the same

format as in (1) and the only difference is that the singletons of the consequents:

$\Delta u_l(k) = c_l, l = 1,2,...,L$ are independent real numbers.

This means that if used in our case as a fuzzy controller for the intelligent agent navigation, it would have 27 degrees of freedom (tuning parameters) instead of only two (***a*** and ***b***) as in the case of *Mamdani*-type of fuzzy controller. While it possesses more difficult learning problems, at the same time the TS fuzzy controller is more flexible and able to principally give a better control performance. In the simulations we have tuned and checked the performance of both types of fuzzy controllers but used mainly the TS fuzzy controller.

Another change of the control structure is realized by modifying the measuring directions of the 3 sensors system, as shown in Fig. 5. It has been proven through simulations that such measuring system gives better performance of the agent during its navigation.

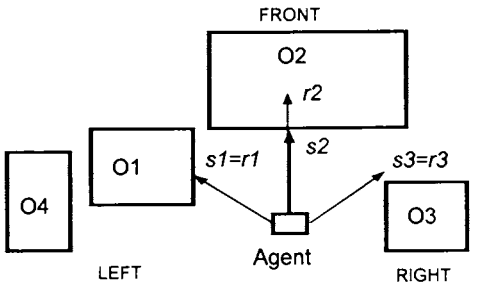


Fig. 5. Modified Sensor System for Navigation with Direction for the Left Sensor: -40° and for the Right Sensor: +40°.

Finally a modification in the fuzzy controller computation structure is made, by adding a small random deviation from the computed controller output. Thus the above formula (3) is modified as follows:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) + S.Rnd(k).\exp(-\Delta u(k)/u_{max}) \quad (4)$$

where: S is a scaling factor that defines the maximum range of the random deviation ($S = 4$ in our simulations); $Rnd(k) \in [-1,+1]$ is a random generated number at the k-th step and u_{max} is the maximum allowed control value (the maximum singleton value) for this controller.

IV. Optimization Approach for Off-line Learning of the Fuzzy Controller

The gradient-free methods, also called direct search methods, are feasible optimization methods and they can possible obtain the global minimum. There is a big variety of such methods [6] but the among them the heuristic random optimization methods are quite popular and effective.

Further on we perform the off-line learning of the fuzzy controller by using a special modification of a random optimization method, called *random directions* method with *reversible and variable* step. The details are omitted here but Fig. 6. serves as a graphical illustration for the idea of this method.

Once a good multidimensional optimization method is available, the learning of the fuzzy controller can be performed after a suitable objective function (performance index) is provided.

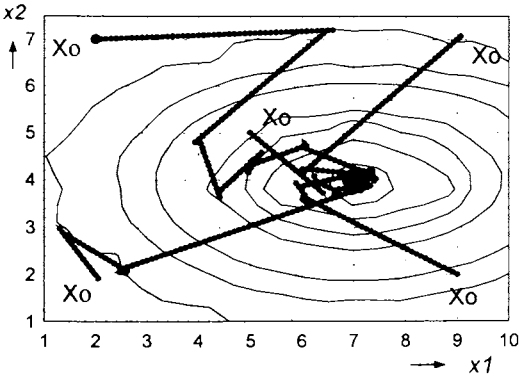


Fig. 6. Illustration of the Random Directions Optimization Method for the *2*-Dimensional Case with a Global Optimum at *Xopt* = *{7,4}*

Since our goal is the "save navigation" of the intelligent agent, here we propose an objective function that evaluates the so called *Danger Level D*:

$$D = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T}\left(\frac{1}{N_i}\sum_{j=1}^{N_i}(f_{1j} + f_{2j} + f_{3j})/3\right) \rightarrow \min \quad (5)$$

Here T is the number of the trajectories (navigation trials) included in *one* evaluation of the objective function; $N_i, i = 1,2,...,T$ is the length (in steps) of the i-th trajectory; f_{1j}, f_{2j} and f_{3j} are the fuzzified values at the j-th step of the membership function "*Close*" (**1**) from Fig. 2. for the sensors **S1**, **S2** and **S3** respectively.

The reason for selecting such criterion is that when the agent is moving far from any obstacles (that is f_{1j}, f_{2j} and f_{3j} are close to zero), it has more chances to continue without collision and to create a longer navigation trajectory. Each collision aborts the current trajectory and another one is generated from the same starting point, but with different (random generated) angle. In order to prevent the useless (and endless) trajectories that follow almost the same path, without giving new navigation information, we introduce the constraint $N_i \leq 500$ on the maximum allowed trajectory length. In addition each evaluation of the Danger Lelev D is made for a total number of $T = 40$ trajectories, that start from two different starting points. During the optimization process, the initial fuzzy controller parameters, i.e. the singletons in (1) are updated in order to minimize the criterion (5).

V. Simulation Results and Discussions

A simulation program based on the structure given in Fig. 1. has been developed in order to demonstrate and evaluate the proposed off-line learning method.

The learning results of two TS fuzzy controllers are shown in this section, as follows: **FC1** with constraints for the singletons [-30,+30] and **FC2** with wider constraints [-50,+50]. As expected, the latter one is more has better performance because of ability to produce stronger control action (bigger change of the steering angle). At the same time the **FC2** fuzzy controller allows

longer (in average) navigation trajectories.

The following Fig. 7. through Fig. 11. give illustration of the off-line learning of both controllers by use of the random optimization method. In fact this is a 27-dimensional optimization task.

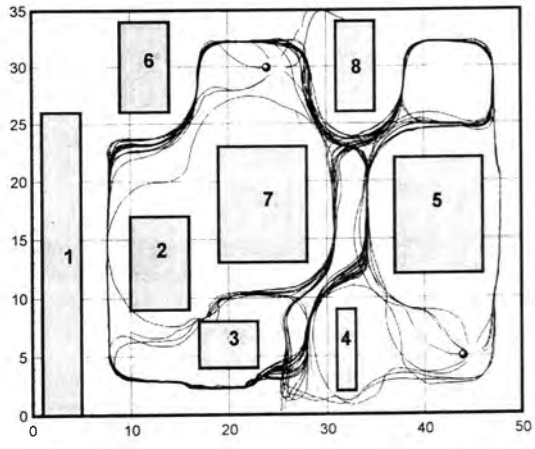


Fig. 7. The Optimal Set of Trajectories with *Danger Level D = 0.0281* after Learning of the TS Fuzzy Controller **FC2**.

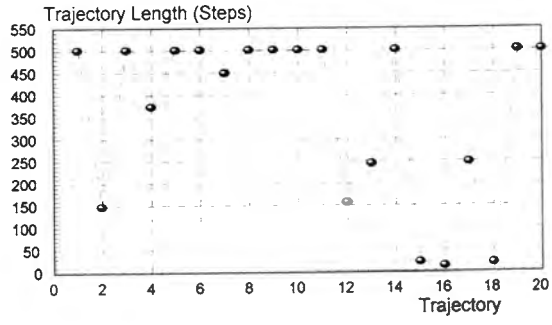


Fig. 8. Length of the Navigation Trajectories produced by the Learned TS Fuzzy Controller **FC1**.Mean Length: *359* steps.

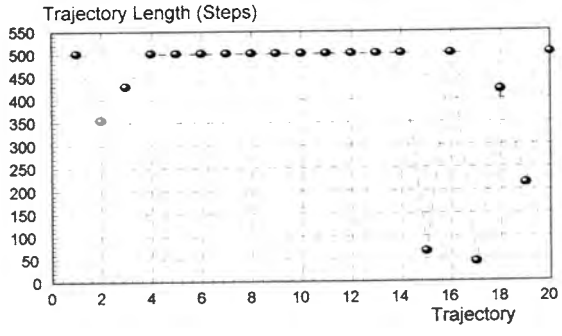


Fig. 9. Length of the Navigation Trajectories produced by the Learned TS Fuzzy Controller **FC2**. Mean Length: *427* steps.

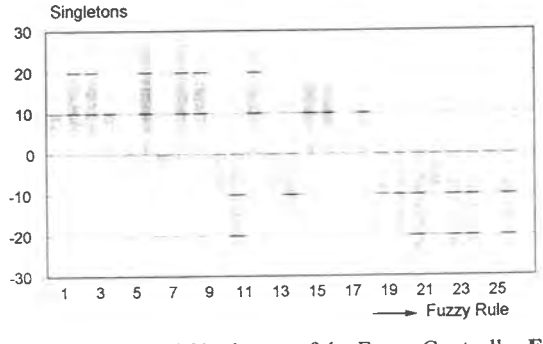


Fig. 10 The Optimized Singletons of the Fuzzy Controller **FC1.**

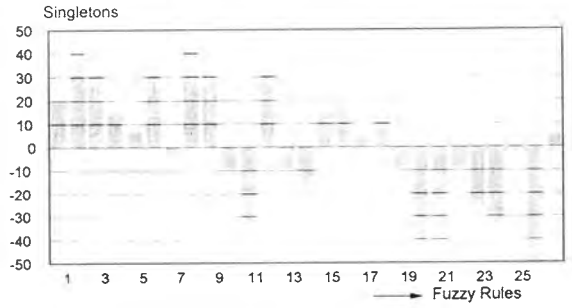


Fig. 11. The Optimized Singletons of the Fuzzy Controller **FC2.**

The last Fig. 12. shows the performance of the learned fuzzy controller starting from different initial point, namely *(20,12)*. It is easy to notice that the navigation ability of the controller remains almost the same. This means that the learning has produced a controller with good generalization ability. One reason for such result is that we introduced a random factor (4) in the controller output, which makes the learning more robust being able to capture the general control tendencies. Further research on the real-time learning is under way.

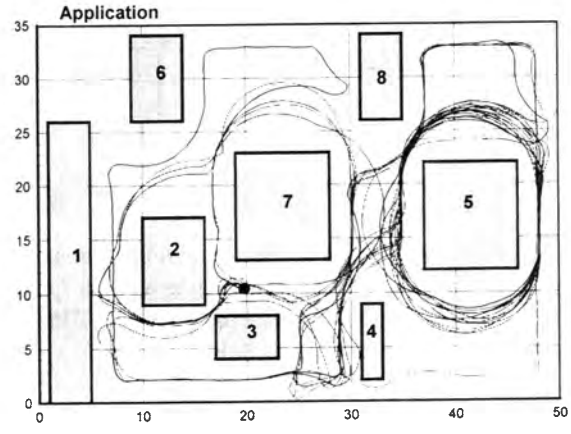


Fig. 12. Performance of the Learned Fuzzy Controller **FC2** from Another (new) Initial Point. The *Danger Level* is: *D = 0.0459*

REFERENCES

[1] Jing Xiao and Zbigniew Michalewicz, An Evolutionary Computation approach to Robot Planning and Navigation, in Soft Computing in Mechatronics,, K. Hirota and T. Fukuda (Eds), Physica-Verlag, Heidelberg, 1999, pp. 117-147. .

[2] J. Barraquand and J.-C. Latombe, Robot Motion Planning: A Distributed Representation Approach, Int. J. Robotics Research, vol. 10, No. 6, 1991, pp. 628-649.

[3] Masanori Sugisaka and Fengzhi Dai, Application of Adaptive Strategies to an Intelligent Mobile Vehicle, Proc. of the 12th Intelligent Systems Symposium, FAN-2002, Saga, Japan, Nov. 21-22, 2002, pp. 207-210.

[4] Charles Kinney and Dean Edwards, A Fuzzy Logic Vision and Control System Embedded with Human Knowledge for Autonomous Vehicle Navigation, Proc. of the 10th, IFSA Congress, Istnabul, June 29-July 2, 2003, pp. 526-534.

[5] Dimiter Driankov and Saffoiti Alessandro, Fuzzy Logic Techniques for Autonomous Vehicle Navigation, Physica-Verlag, New York, 2001.

[6] J. Li, R. R. Rhinehart, Heuristic Random Optimization, *Comput. Chem. Eng.*, Vol. 22, pp. 427-444, 1998.

著者名索引

	氏 名	ページ
A	Admi Syarif	361, 363
	Atsushi Inoue	843
G	Gancho Vachkov	963
	Genji Yamazaki	359
	Germano Resconi	131
H	Hidetomo Ichihashi	723, 931
	Hiroaki Ishii	379
	Hiroo Naito	411
	Hiroshi Ishikawa	963
	Huynh Van Nam	133
J	Jyunichi Taniguchi	363
K	Kaoru Arakawa	411
	Katsuhiro Honda	723, 931
	Kazuo Tanaka	947
	KwanWoo Kim	359
L	Lina Hng	445
M	Mitsuo Gen	359, 361, 363
	Mitsuo Yamashiro	363
S	Seiji Saito	379
	Shigueo Nomura	375
	Shinichi Kataoka	963
	Shoichi Araki	723
T	Takao Yokota	361
	Toby Dederick	615
	Toto H. Silitonga	931
W	Wei Li	947
X	Xiaodong Wang	361
Y	Yuji Takai	723
あ	相沢 輝明	617, 621
	相原 一貴	497
	青柳 健	53
	赤木 貴明	503
	赤坂 剛	33
	赤間 世紀	151
	秋口 俊輔	607
	秋山 孝正	241, 429
	秋山 孝夫	823
	浅居 喜代治	183
	浅田 秀樹	9
	畔津 忠博	343
	麻生 隆史	403
	安宅 和美	15
	渥美 公秀	585

	氏 名	ページ
	天住 貴子	263
	新井 史人	341
	新井 衆一郎	221
	荒木 克治	289
	荒木 昭一	13
	荒木 智行	673
	安藤 則明	27
い	飯坂 康年	295
	井口 誠	853
	生山 知	639
	池田 敏彰	521
	生駒 哲一	117, 383
	石井 弘允	773
	石井 博昭	149
	石亀 篤司	801
	石黒 浩	583
	石田 健司	293
	石原 永伯	271, 493
	石原 恵子	537
	石原 茂和	537
	石渕 久生	75, 83, 107, 305, 327, 443, 473
	市村 匠	179, 213, 617, 621
	磯本 征雄	209
	井谷 久博	599
	市川 耕司	465
	市橋 秀友	589, 591, 597, 871, 913, 915, 917
	一森 哲男	709
	井出 東	797
	井藤 孝一	525, 529
	伊藤 孝明	169
	伊藤 直樹	553
	伊藤 則夫	15, 27, 37
	糸賀 健	485
	稲井田 次郎	437
	稲葉 広典	229, 505
	乾 正博	33, 41
	乾口 雅弘	147
	井上 明子	285
	井上 勝雄	515, 519
	井上 直也	873
	井上 博行	445
	井上 真樹	153
	井上 喜雄	827
	井ノ口 美佐子	839
	井面 仁志	37
	今泉 一郎	207
	今西 茂	331
	今脇 節朗	387, 407
	井宮 淳	391
	入江 篤	17
	入江 寿弘	157
	入月 康晴	161

	氏 名	ページ
	岩崎 信弘	797
	岩田 満	275
	インタン ローリー	685, 689, 693
う	上江洲 弘明	199, 371
	植田 俊克	951
	植田 佳典	203, 205, 207, 221
	上野 圭介	59
	上野 尚樹	125
	魚崎 勝司	481
	内田 理	353
	内田 發三	387, 407
	内野 英治	5, 49, 343
	内野 毅	383
	有働 昌代	305
	宇野 剛史	711
	宇野 裕之	307, 323, 345, 449, 489, 631, 665
	馬野 元秀	307, 323, 345, 349, 449, 489, 631, 665
	馬屋原 一孝	901
	梅田 大雄	647
え	江崎 朋人	247
	榎本 雄介	525, 529
	江本 全志	365, 465, 685, 689, 693, 819
	円谷 友英	509
	遠藤 靖典	909
お	王 碩玉	293, 433, 603, 827
	大石 義	881
	大貝 哲彦	63
	大栢 良介	635
	大川 喬弘	415
	大木 誠	33, 41, 497, 503
	大北 正昭	33, 41, 51, 53, 63, 71, 497, 503
	大久保 重範	823
	大熊 繁	113, 925
	大崎 修嗣	707
	大崎 美穂	99
	大崎 隆二	795
	大里 有生	255
	大竹 博	943
	大谷 崇	781, 795
	大西 真一	719
	大野 豊	51
	大橋 邦博	121
	大橋 正和	251
	大林 和寛	805
	大矢 智子	375
	大藪 多可志	615
	大藪 又茂	55, 67, 71
	岡島 健治	733

	氏 名	ページ
	岡田 明	519
	岡田 真幸	715
	岡田 真	307, 323, 345, 449, 489, 631, 665
	岡本 浩明	735
	岡本 宏	493
	岡本 渉	441
	小川 一泰	651
	小川 圭一	245
	荻野 康介	777
	奥嶋 政嗣	241, 429
	奥田 徹示	183
	奥田 裕紀	217
	奥田 良治	437
	奥村 賢二	19
	小沢 和浩	703
	小澤 尚久	293
	鬼沢 武久	559, 563, 885, 889
	小野 隆	773
か	界外 志織	75
	戒野 敏浩	767
	垣内 忍	877
	梶川 嘉延	175, 639
	橿淵 めぐみ	579, 581
	片井 修	375, 659
	片岡 恵理奈	927
	片桐 英樹	707, 759
	堅多 達也	645
	加藤 謙介	585
	加藤 浩介	707, 805
	加藤 茂	889
	加藤 恒昭	857
	金川 秀也	199, 371
	金澤 貴彦	803
	糀谷 和人	229, 505
	亀井 且有	79, 87, 187, 297, 315, 485, 555, 787
	萱嶋 一弘	283
	川上 浩司	375, 659
	川上 進	735
	川口 順功	835, 881
	川口 三夫	341
	川澄 未来子	741
	河田 耕一	293, 603, 827
	川中 普晴	103
	川本 一彦	391
	菅家 正康	703
	神田 崇行	583
き	菊池 浩明	353, 681
	菊池 眞之	729
	岸田 一也	457
	岸田 悟	497, 503
	喜多 主季	449

	氏名	ページ
	北川 寛	635
	北畠 真	567
	木村 哲彦	293
	木村 誠総	395
く	串田 淳一	87
	楠瀬 芳之	233
	楠村 幸貴	861
	九津見 洋	13
	工藤 陽	353
	工藤 功	819
	工藤 卓	725
	工藤 康生	133, 151
	久保田 直行	95, 571, 755
	熊沢 信幸	893
	熊丸 健一	533
	倉田 勝之	591
	倉多 宏	297
	栗原 正仁	717
	栗山 裕	213
	黒崎 竜治	281
	黒澤 仁	71
	黒澤 義明	617, 621
	黒地 満つる	769
	黒瀬 崇弘	175
け	ケネス J. マッキン	313, 769
	玄 光男	357
	源野 広和	11
こ	河野 亮太	477
	高馬 俊樹	11
	小島 史男	95, 571
	小杉 智	169
	小西 幹彦	183
	小橋 昌司	387, 407, 415
	小林 一馬	271
	小林 琢磨	33, 41
	小松崎 年雄	825
	小山 茉利	741
	近藤 克哉	387, 407, 415
さ	齋藤 毎至	629
	坂井 優	31
	坂口 誠	163
	坂倉 義明	79
	坂元 章	579, 581, 615
	坂和 正敏	707, 711, 805
	櫻井 茂明	625
	櫻井 義尚	961
	佐藤 章	203, 205, 207, 221
	佐藤 英理	791
	佐藤 徹	783, 895
	佐藤 秀昭	223, 873
	佐藤 美佳	905
	佐藤 明樹	877
	椹木 哲夫	611, 747
し	椎塚 久雄	167, 173, 295, 807, 811
	塩瀬 隆之	375, 659
	地頭所 裕美	13
	篠木 剛	99, 103
	四宮 葉一	293
	柴田 崇徳	609
	柴田 洋平	473
	島 弘三	765
	島川 学	651
	島田 大助	269
	島野 淳	951
	清水 裕	765
	清水平 渉	577
	下村 直也	597
	庄司 裕子	847
	白木 渡	27, 37
	白砂 剛	353
	景 建平	123
	新宮 清志	157
	親泊 元太郎	739
	新村 昭好	593
す	末竹 規哲	403
	杉田 久人	115
	杉原 一臣	149, 547
	菅野 直敏	267
	菅野 道夫	935
	鈴木 泉	255
	鈴木 佳苗	579, 581
	鈴木 仁美	957
	須田 宏	199, 371
	須田 祐史	259
	須藤 康裕	717
	酢山 明弘	625
せ	関矢 浩史	263
	瀬田 和久	307, 323, 345, 349, 449, 489, 631, 665
そ	相馬 努	337
	孫 士杰	1
た	大道寺 聡	635
	高木 友博	263, 593, 635
	高木 昇	145
	高木 英行	111
	高田 輝和	493
	高梨 令	533
	高萩 栄一郎	191, 669
	高橋 恒介	831, 881
	高橋 靖正	419

	氏 名	ページ
	高橋 由武	337
	高間 康史	427, 851
	田口 隆久	725
	田口 亮	395, 419
	武市 正人	167
	武田 康宏	279
	田崎 栄一郎	311, 313, 769
	但馬 文昭	223, 225, 227
	多田 薫弘	23
	巽 久行	677
	田中 一男	163, 943, 955
	田中 誠悟	759
	田中 英夫	149, 509, 547
	谷 久壹朗	187, 787
	谷 哲次	161
	谷江 和雄	609
	谷口 唯成	935
	谷口 忠大	611
	谷口 典之	79, 87, 555
	谷野 哲三	147
	田野 俊一	275
	田村 美由紀	851
	壇上 希代子	37
ち	沈 海農	209
	陳 貴林	293
つ	塚本 充	445
	塚本 弥八郎	195
	土澤 康弘	773
	土田 賢省	221
	土谷 武士	293, 433, 827
	土屋 敏夫	545
	堤 和敏	553
	坪内 透	469
	鶴岡 信治	99, 103
て	手嶋 教之	289
	寺田 雅之	853
	伝刀 洋輔	555
と	徳高 平蔵	51, 53, 63, 71
	徳永 幸実	493
	徳増 眞司	677
	徳丸 正孝	331
	豊浦 由浩	697
な	内藤 榮一	13
	中井 学	443
	中井 祐亮	871
	永井 智哉	15
	中尾 一成	481
	中岡 伊織	187
	永岡 右明	461
	長澤 佐知子	553

	氏 名	ページ
	長澤 庸二	663
	中島 恭一	145
	中島 智晴	83, 305, 443
	中嶋 宏	229, 505
	中田 典規	137
	長田 純一	579, 581
	中塚 大輔	67
	中西 祥八郎	353
	中野 晶太	111
	中野 知治	415
	長堀 由樹	365
	長町 三生	537, 541, 545
	中村 芳仁	917
	中森 弘晃	41
	中森 義輝	699, 899, 901
	中山 万希志	9, 319
	中山 洋一	921
	名古屋 崇史	773
	成枝 剛司	499
	難波 聡	327
に	新居 学	777
	新美 礼彦	815
	西 孝仁	45
	西崎 一郎	759
	西田 正吾	861
	西野 順二	575, 961
	西野 達夫	537, 541
	西村 文宏	511
	西村 亮	271, 493
	西守 克己	271, 493
	二宮 美佳	387
	丹羽 寿男	283
ね	根本 剛	781
の	能島 裕介	95
	延原 肇	423
	野村 康雄	175, 639
	野本 弘平	765
は	梁田 大輔	203
	橋本 節雄	571
	橋本 昌彦	11
	橋山 智訓	247
	長谷川 泰久	341
	長谷川 幸彦	27
	畑 豊	387, 407, 415
	畠中 利治	481
	畠山 豊	399
	馬場 恵子	117
	林 篤司	559
	林 勲	739
	林 一久	913
	早人 慶子	49

	氏名	ページ
	原田 利宣	525, 529
	春山 秀幸	909
	韓 虎剛	939
	伴 浩美	615
	半田 久志	453
	伴野 佳史	99
ひ	樋口 勝隆	791
	土方 嘉徳	861
	日高 一幸	497, 503
	日高 洋志	315
	日高 芳智	301
	百留 貴弘	117
	冷水 一也	11
	平岩 孝史	811
	平澤 裕介	885
	平田 直人	801
	平野 修	703
	広兼 道幸	233, 511
	広川 美津雄	515, 519
	廣田 薫	19, 369, 391, 399, 423, 767
ふ	福岡 健輔	55
	福島 達臣	251
	福島 龍太郎	1, 643, 913
	福田 敏男	341
	福元 伸也	663
	藤井 太郎	589
	藤井 雅章	841
	藤尾 豪	807
	藤岡 亮介	129
	藤崎 恵美子	865
	藤田 成隆	825
	藤田 剛志	801
	藤丸 雅弘	345
	藤村 喜久郎	51, 53, 63, 71
	藤村 考	853
	藤本 和則	869
	藤吉 誠	1, 643, 645, 913
	舟久保 登	269
	古田 勝久	17
	古田 啓	615
	古田 均	233, 511
	古橋 武	91, 125, 567, 599, 655, 741, 925
	古屋 繁	521
	古山 宣洋	751
ほ	坊向 新也	781
	星野 孝総	79, 87, 297, 315, 485, 555
	細谷 優	665
	堀 和憲	449
	堀 浩一	849

	氏名	ページ
	堀尾 恵一	59
	堀口 由貴男	747
	本多 克宏	589, 591, 597, 871, 913, 915, 917
	本多 中二	951, 961
ま	前田 利之	283
	前田 博	117, 383, 877
	前田 実香	563
	前田 幹夫	477
	前田 祐司	283
	前田 陽一郎	469, 577, 607
	前野 仁	5
	前本 啓貴	113
	牧野 圭一	827
	牧野 真大	499
	増井 重弘	169, 873
	増井 敏克	489
	桝屋 道冶	643
	増山 博	45
	松生 洋久	91
	松浦 克昌	957
	松浦 英文	11
	松岡 孝	905
	松尾 岳明	631
	松下 大輔	53
	松下 哲也	951
	松下 光範	857
	松田 修三	169, 223, 227, 873
	松田 充夫	223, 225, 227
	松田 博史	337
	松永 和之	955
	松村 幸輝	677
	松本 政之	203, 205
	松本 麻奈美	693
	松本 裕二	349
	松本 洋介	117
	松本 義之	705
	真鍋 敦	873
	馬庭 芳朗	53, 63
	丸田 央	593
み	三浦 保之	767
	神酒 勤	499, 783, 895
	三嶋 博之	745
	水口 不比等	333
	水谷 清隆	141
	水本 雅晴	301, 333, 433
	溝渕 宣誠	603
	三田村 保	717
	満田 章道	767
	三橋 憲晃	427
	南 智之	129
	三宅 宏典	497, 503

	氏名	ページ
	宮阪 憲治	445
	宮島 廣美	457, 663
	宮武 直樹	223, 225, 227
	宮原 靖武	383
	宮本 定明	141, 901, 921, 927
	三好 力	45
	三好 哲也	269, 893
	三輪 多恵子	269
む	向殿 政男	365, 465, 685, 689, 693, 819
	武藤 章	19
	村井 哲也	131, 133, 151
	村井 創	593
	村井 保之	677
	村上 周太	651, 939
	村上 真一	323
	村上 俊之	285
	村上 洋	281
	村瀬 研也	337
	村瀬 満記	429
	村中 徳明	331
	村山 隆彦	865
め	目良 和也	179
も	望月 耕治	913
	森 幹彦	849
	森 雄一郎	675
	森 吉央	915
	森井 義人	599
	森田 博彦	5
	門馬 英一郎	773
や	安井 浩之	237
	安河内 武志	921
	安田 恵一郎	461, 797, 803
	安田 真	925
	安信 誠二	153
	ヤッサーハッサン	311
	矢野 和昭	49
	矢野 慎治	783
	矢野 均	761
	矢野 良和	113
	藪内 賢之	697
	山内 ゆかり	465, 819
	山川 あす香	709
	山川 烈	5,59, 403
	山岸 栄輝	659
	山口 大輔	311, 313
	山口 亨	121, 123, 279, 281, 427, 629, 647, 791
	山口 佑也	689
	山崎 敏正	719
	山崎 有紀	519
	山下 利之	213
	山下 元	199, 205, 371
	山田 智也	795
	山ノ井 高洋	719
	山村 忠義	307
	山本 康高	655
	山本 隆	107, 327
	山本 正樹	603
	山本 裕	869
	山脇 一宏	173
	矢守 克也	585
ゆ	湯場崎 直養	19
	由良 俊介	865
よ	横川 壽彦	259
	横地 弓夫	825
	吉岡 克則	337
	吉川 歩	763
	吉川 大弘	99, 103, 655
	吉田 和美	283
	吉田 真一	369
	吉田 隆則	83
	米澤 裕也	457
	米田 壮志	147
ら	ラインハルト・クリッタ	391
	ラズマン・ビン・イスマイル	41
り	領家 美奈	699, 899
	林 林	357
	林坂 享祐	639
わ	若松 正晴	765
	湧田 雄基	341
	和田 一義	609
	和多田 淳三	115, 697, 705
	渡邉 輝幸	115
	渡邊 俊彦	129, 319

第19回ファジィシステムシンポジウム実行委員会

大会委員長 市橋　秀友（大阪府立大学）
実行委員長 馬野　元秀（大阪府立大学）
プログラム委員長 石渕　久生（大阪府立大学）
組織委員長 石井　博昭（大阪大学）
企画委員長 林　勲（阪南大学）
財務委員長 乾口　雅弘（大阪大学）
広報委員長 吉川　歩（神戸親和女子大学）
実行委員
伊藤　健（流通科学大学）
今岡　春樹（奈良女子大学）
江澤　義典（関西大学）
円谷　友英（高知大学）
呉　志賢（大阪経済法科大学）
大谷　崇（近畿大学）
奥田　徹示（大阪工業大学）
片井　修（京都大学）
亀井　且有（立命館大学）
椹木　哲夫（京都大学）
中島　智晴（大阪府立大学）
中嶋　宏（オムロン）
中山　万希志（神戸製鋼所）
野村　竜也（阪南大学）
広兼　道幸（関西大学）
藤吉　誠（日立造船）
古田　均（関西大学）
本多　克宏（大阪府立大学）
松下　光範（日本電信電話）
三好　哲也（豊橋創造大学）
村田　忠彦（関西大学）
安田　昌司（三洋電機）
山川　あす香（福島学院大学）
和多田　淳三（早稲田大学）
渡邊　俊彦（大阪電気通信大学）

第19回ファジィシステムシンポジウム講演論文集
第19回ファジィシステムシンポジウム プログラム委員会 作成

2003年9月5日 発行

発行：日本知能情報ファジィ学会（SOFT）
〒820-0067
福岡県飯塚市大字川津680-41
（財）ファジィシステム研究所内
TEL: 0948-24-3355
FAX: 0948-24-3356
E-mail: soft@flsi.cird.or.jp

印刷所：学友社
〒591-8041
堺市東雲東町2-4-15
TEL:072-251-0813
FAX:072-256-2618