# ニューラルネットワークを用いた SAT の並列解法における減衰係数に関する研究 A study on attenuation coefficient in parallel execution of neural networks for solving SAT

張 楷栄

永松 正博

**Kairong Zhang** 

Masahiro Nagamatu

九州工業大学大学院生命体工学研究科

Graduate School of Life Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract: Satisfiability problem (SAT) is an important fundamental problem in computer science as well as in wide fields of practical applications, such as designing, decision making, scheduling and etc. We have proposed a neural network named LPPH for SAT. And in order to solve SAT more efficiently, we propose a parallel technique, which executes plural neural networks of LPPH from different initial states. There is an important parameter named attenuation coefficient in neural network of LPPH. This parameter affects strongly the speed of execution of LPPH. In this paper, a method is also proposed to generate attenuation coefficients for neural networks of LPPH by using probabilistic generating functions. The experimental results show that this method is efficient. Furthermore, in this paper, a probabilistic method of generating initial states also proposed to speed up of solving SAT.

#### 1. はじめに

SAT(充足可能性問題)は制約充足問題の一種であり、設計、意思決定、スケジューリング、診断などの多くの分野で用いられる。我々は、SATに対して LPPH と呼ぶ力学系を用いる手法を提案している。本論文では、同一の LPPH を複数準備し、異なる初期状態から同時に実行する方法を提案する。実験では、同時に実行する LPPH の個数を変化させ、つまり、CONSAT の解空間での出発点の個数を変化させることで、早い計算時間で SAT が解けることを示す。この並列手法は容易に並列処理を実現できる。

LPPHでは、減衰係数と呼ばれるパラメータが重要なパラメータであり、LPPHの計算スピードに大きな影響を与える.本論文では、減衰係数の発生関数を利用して、異なる減衰係数をもつLPPHを並列に実行させる手法を提案し、実験によりその有効性を示す.

解空間での初期値をどのように設定すればよいかという初期値設定問題は、ニューラルネットワークによる最小値探索法の重要な課題である。本論文では、各 LPPH ニューラルネットワークの初期値の設定区間を確率的に設定し、LPPH の並列実行を行って、SAT を解く速度を向上させることも検討する。

### 2. 充足可能性問題

#### 2.1 CNF (Conjunctive Normal Form)

CNF 論理式とは,和積標準形で表される論理式のことであり,この論理式は各変数のリテラルの論理和からなるクローズの論理積で構成される.ここでは,変数の値はすべて0か1の離散値である.各クローズC, は次に示すような,リテラルの論理和で構成される.

$$C_r = L_{r1} \lor L_{r2} \lor \dots \lor L_{ri} \lor \dots \lor L_{rl} \tag{1}$$

 $L_{ri}$ は r 番目のクローズの i 番目のリテラルであることを表している.CNF 論理式は以下のように,各クローズの論理積で構成されたものである。

$$E = C_1 \wedge C_2 \wedge \dots \wedge C_m \tag{2}$$

 $C_r$ は論理式Eのr番目のクローズを表している.

### 2.2 SAT (SATisfability Problems)

SAT とは, 与えられた CNF 論理式を真とする 変数割当(解)が存在するかどうかを判断し,存在 するならばその解を見つける問題であり,以下 のように定義される.

(SAT) find x

such that 
$$x$$
 satisfies  $C_r$   $r = 1, 2, \dots m$  (3)  $x \in \{0,1\}^n$ 

### 3. LPPH

## 3.1 CONSAT

変数  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  を考え,r 番目のクローズ  $C_r$  i 番目の変数  $x_i$  に対して  $g_{ir}(x)$ :  $[0,1]^n \rightarrow [0,1]$  次のように定義する.

$$g_{ir}(\mathbf{x}) = \begin{cases} x_i & \text{if } x_i \text{ appears in } C_r \text{ as a negative literal,} \\ 1 - x_i & \text{if } x_i \text{ appears in } C_r \text{ as a positive literal,} \\ 1 & \text{otherwise.} \end{cases}$$
 (4)

クローズ $C_r$  ( $r=1,2,\cdots,m$ ) に対して $h_r(x)$ :  $[0,1]^n \rightarrow [0,1]$  を以下のように定義する.

$$h_r(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^n g_{ir}(\mathbf{x}) \tag{5}$$

以上の定義より CONSAT は,次のように定義される.

(CONSAT) find (x)

such that 
$$h(x) = 0 \ \forall r = 1, 2, \dots, m$$
  
 $x \in [0,1]$  (6)

CONSAT と SAT は等価である.

## 3.2 LPPH の定義

LPPH は次に示すようなラグランジュ関数を 用いる.

$$F(x, \mathbf{w}) = \sum_{r=1}^{m} w_r h_r(x), \quad x \in [0, 1]^n, \mathbf{w} \in [0, \infty)^m$$
 (7)

ここで  $F(x, w) \ge 0$  は明らかである.式(7)によって示された関数 F(x, w) を用いて LPPH の力学系を次のように定義する.

$$\frac{dx_i}{dt} = -x_i(1 - x_i) \frac{\partial F(\mathbf{x}, \mathbf{w})}{\partial x_i} \qquad i = 1, 2, \dots, n,$$
 (8)

$$\frac{dw_r}{dt} = -\alpha w_r + h_r(x) \qquad r = 1, 2, \dots, m, \qquad (9)$$

上の連立微分方程式を解くことで ,LPPH は解を見つけることができる . は減衰係数と呼ばれる .

#### 4. LPPH の並列実行

# 4.1 LPPH の並列実行の定義

本研究での並列実行とは,LPPH ニューラルネットワークを複数準備し,異なる初期状態から同時に実行することである.LPPH の並列実行はハードウェアで実現するのに簡単である.またチップ間の通信が少ないためより高速に問題を解くことができる.

#### 4.2 実験結果

p個の LPPH の並列実行を複数回行うとし  $t_j^i$ を i 番目の並列実行における j 番目の LPPH の実行に要する時間とする .

$$T_p = \operatorname{mean} \min_{i} \left\{ t_j^i \middle| 1 \le j \le p \right\} \tag{10}$$

とすると  $T_p/T_1$  が p個の LPPH の並列実行によるスピードアップ比である.図 1 に実験結果を示す.実験では  $T_0$  最大  $T_0$  毎の LPPH の並列実行を行った  $T_0$  を  $T_0$  を  $T_0$  と  $T_0$  を  $T_0$  はそれぞれ  $T_0$  を  $T_0$ 

LPPH の並列実行では,各 LPPH ニューラルネットワークに対して GA のように遺伝子操作を行う方法も試みたが,この方法は効果がないことが実験により分かっている.

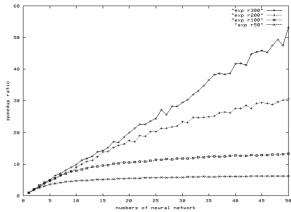
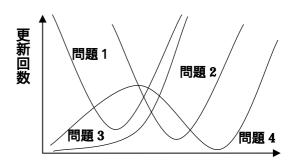


図 1 3-SAT 問題に関するスピードアップ比



減衰係数

図 2 減衰係数問題依存性のイメージ図

# 5. 異なる減衰係数を持った LPPH の並列 実行

# 5.1 減衰係数の問題依存性

LPPH では、減衰項の導入により、SAT を効率的に解くことができる.実験結果から多くの問題に対して、減衰係数の導入による計算スピードが速くなることが分かった.しかし、減衰係数 $\alpha$ の最適値は問題への依存性が高く、また事前に予測することは難しい.減衰係数の値が小さすぎると重みの変化のスピードが遅くなり逆に大きすぎるとリミットサイクルに陥る.難しい問題に対してはその減衰係数の問題依存傾向が強い.我々は従来経験的に固定値 $\alpha$ =0.06を使用している.減衰係数の問題依存性のイメージ図を図 2 に示す.問題 3 の減衰係数の最適値は大きい.

# 5.2 並列実行の利点

LPPH の並列実行と減衰係数の問題依存性との関係を調べる為に実験を行った.実験では,LPPH ニューラルネットワークが一つ実行する場合の減衰係数の最適値と複数個のLPPH ニューラルネットワーク同時に実行する場合の減衰係数の最適値の変化を調べた.実験結果は,図3,4で示す.実

験結果により,200変数の3-SAT問題では,LPPHニューラルネットワークの個数が増えることによって,減衰係数の最適値が大きくなる.また,減衰係数の問題依存性も緩和されることが確認できた.50変数の解が一つの3-SAT問題では,LPPHニューラルネットワークの個数が増えることによって,減衰係数の問題依存性が緩和されるが,減衰係数の最適値が変わらない.実験結果から,LPPHの並列実行は減衰係数の問題依存性が緩和されるという効果がある.

#### 5.3 減衰係数発生関数

減衰係数の問題依存性に対して、本論文では、異なった減衰係数を持った LPPH の並列実行を提案する.各問題の減衰係数の最適値の分布によって、減衰係数発生関数を用いて LPPH の並列実行を行った.減衰係数発生関数の例を図 5に示す.横軸は減衰係数 の値、縦軸は確率密度である.図 5に示す関数の場合、発生される減衰係数の例を図 6に示す.

## 5.4 減衰係数発生関数に関する実験結果

図7,8おいて縦軸は更新回数,横軸は並列実 行に用いた LPPH の個数を示している 実験で, 用いた問題は 200 変数 860 クローズの 3-SAT 問 題と 50 変数 120 クローズの解が一つの 3-SAT 問 題である. 図 7 は 200 変数の 3-SAT 問題の実験 結果を示している.減衰係数 を 0.06 に固定す る場合の LPPH の並列実行 , 減衰係数 を 0.14 に固定する場合の LPPH の並列実行,および, 減衰係数発生関数を用いた LPPH の並列実行の 比較実験結果を示す.図3の実験結果により, 200 変数の 3-SAT 問題の場合,減衰係数 =0.14 は一番良い値であり、 =0.06 はより悪い値で ある. 図7の200変数の3-SAT問題の結果によ って , 減衰係数発生関数を用いた LPPH の並列 |実行は最適な減衰係数 の値である 0.14 に固定 した LPPH の並列実行にほぼ近い値が得られて いることが分かる.図8は50変数の解が一つの 3-SAT 問題の実験結果を示している .減衰係数 を一番良い値(0.06)に固定する場合の LPPH の並 列実行,減衰係数 を悪い値(0.16)に固定する 場合の LPPH の並列実行,および,減衰係数発 生関数を用いた LPPH の並列実行の比較実験結 果を示す、これらの実験より、減衰係数発生関 数を利用すると,減衰係数を最適値に固定する 並列実行の実験結果とほぼ同程度の結果を得る ことができることが分かった.

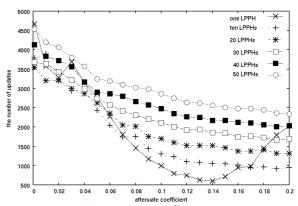


図 3 200 変数 860 クローズの 3-SAT 問題につい て並列化による減衰係数の最適値の変化

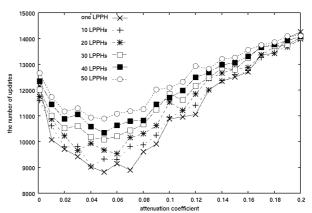


図 4 50 変数 120 クローズの解が一つの 3-SAT 問題について並列化による減衰係数の最適値の 変化

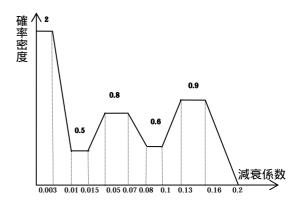


図 5 減衰係数発生関数の例

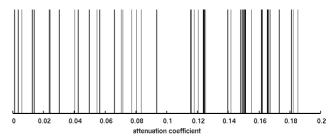


図6 発生される減衰係数の例

# 6.確率的に初期点を生成する並列実行

本論文では,各変数の初期値を 0,0.5,および,1の近くに確率的に生成し,その効果を検討する.実験結果は図 9 で表す.実験結果によると,確率的に初期点を生成する並列実行は LPPH ニューラルネットワークの個数が少ない場合が有効であることが分かった.

## 7.まとめと今後の課題

LPPH の並列実行の実験結果から ,難しい問題に対してより高いスピートアップ比が得られることが分かった .LPPH の並列実行は多くの問題に対して高いスピートアップ比が得られ ,回路も容易に実現できる . また , 通信に対するオーバーヘッドがかからないという利点がある .

図 7,8 から減衰係数発生関数を用いた LPPH 並列実行は減衰係数を最適値に固定した LPPH 並列実行の実験結果とほぼ同程度の結果を得ることができるが分かった.各 LPPH のニューラルネットワークの減衰係数の調節に対して GA を導入することが今後の課題になる.

確率的に初期点を生成する並列実行は LPPH ニューラルネットワークの個数少ない時に有効であることが分かった、今後,もっと多くの問題に対して調べる必要がある、

#### 参考文献:

[1] M. Nagamatu and T. Yannaru, "Parallel state space search for SAT with Lagrange Programming Neural Network", proceedings of the fifth International Conference on Neural Information Processing. October, 1998 [2] M. Nagamatu and T. Yanaru, "Solving SAT by Lagrange Programming Neural Network with Long and Short Term Memories", ch. 11 in "Information Modelling and Knowledge Bases", IOS Press, pp. 289-301, 2000

[3] M. Nagamatu and T. Yannaru, "On the stability of Lagrange programming neural networks of satisfiability problems of propositional calculus", Neurocomputing, 13, 119-133, 1995.

### 連絡先:

張 楷栄

九州工業大学大学院生命体工学研究科

〒808-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-4

Phone + Fax: 093-695-6088

E-mail: <a href="mailto:choh-kaie@edu.brain.kyutech.ac.jp">choh-kaie@edu.brain.kyutech.ac.jp</a>

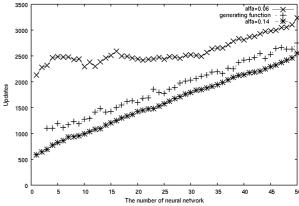


図 7 200 変数 860 クローズの 3-SAT 問題

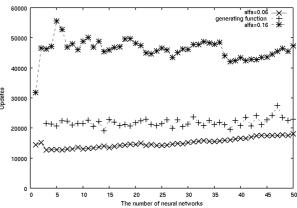


図 8 50 変数 120 クローズの解が一つの 3-SAT 問題

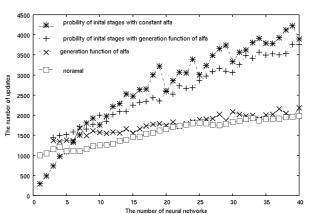


図9 30変数 46 クローズの解が一つの 3-SAT 問題に対して確率的に初期点を生成する並列実行

# CSP を解くニューラルネットワークにおける効率的な制約解消

### An Efficient Constraint Satisfaction for Neural Network to Solve CSP

中野 隆宏 Takahiro Nakano 永松 正博 Masahiro Nagamatu

九州工業大学大学院生命体工学研究科

Graduate School of Life Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract: The constraint satisfaction problem (CSP) is a combinatorial problem to find a solution which satisfies all given constraint. We proposed a neural network to solve the CSP. This neural network has two type neurons. "Constraint neuron (CN)" represents the degree of satisfaction of the corresponding constraint. "Variable-Value pair neuron (VVPN)" represents the degree of certainty with which the variable takes the value in its domain. CN calculates the degree of satisfaction of the corresponding constraint, and puts force to each neighboring VVPN to satisfy the constraint. This paper studies how to calculate of satisfaction of constraints and the force put to each VVPN.

### 1. はじめに

与えられた制約を全て充足するような変数へ の値の割当てを探索する問題を制約充足問題 (CSP; Constraint Satisfaction Problem)という. CSP は人口知能の多くの問題を表現することが可能 である.また, CSP に解が存在するかどうかと いう判定問題は NP 完全問題であることが知ら れている. 我々は CSP に対してニューラルネッ トワークを用いて解く手法を提案している.こ のニューラルネットワークでは,VVP が 値をとる確からしさを表す VVPN(Variable-Value-Pair Neuron)と制 約が充足をしていない度合いを表す CN(Constraint Neuron)の 2種類のニュー ロンを持つ. VVPN は現在の値を CN に 出力し、CN はその値から制約を充足させる ような力を計算し、その制約に現れている各 VVPN に出力する. 一般的な CSP の不完全解法 は各変数を同時に更新すると解の振動現象を起 こしてしまうため解を得ることができなくなっ てしまう.一方,LPPH-CSP ではすべての VVPN ニューロンを同時に更新することができる.こ のことから LPPH-CSP をハードウェアなど に実装した場合、他の解法よりも高速に 解をもとめることができると考えられ る . 本論分では,効果的に制約を表現するため に,一般的な制約を考え,その制約を用いて目 的関数付 CSP に適用する手法を提案する.

# 2. CSP の定義

CSPはつぎのような3項組(X,D,C)で定義される.

- X=X<sub>1</sub>,X<sub>2</sub>,X<sub>3</sub>,··· ,X<sub>n</sub>は変数の有限集合.
- D=D<sub>1</sub>,D<sub>2</sub>,D<sub>3</sub>,···,D<sub>n</sub>は離散値を要素とする変域の有限集合であり,変数X<sub>i</sub>は変域D<sub>i</sub>の1つの

要素を値としてとる.

•  $C=\{C_1,C_2,\cdots,C_n\}$ はCSPの制約の集合 . Cを満足させるような変数Xへの値の割当てが CSPの解となる .

## 3. CSP の一般的な制約

CSP をより効果的に表現するために,一般的な制約を考える。ここで"変数 $X_i$ が値 $v_j$ をとる"ということ表す変数  $x_{ij}$  を考える。 $x_{ij}$  を VVP(Variable-Value Pair)と呼ぶ。変数 $x_{ij}$  はブール値の変数であり, $x_{ij}$  が 1 のとき"変数  $X_i$  が値  $v_j$  をとる"ことが成り立ち,0 のとき"変数  $X_i$  が値  $v_j$  をとる"が成り立つたたないことを表す。この VVP を用いて,以下のような一般的な制約を考える.

#### ● ALT制約

ALT $(n, \{x_{ij} \in C_r\})$  [at least n true constraint] は制約 $C_r$  に含まれるVVPの内,少なくともn個が真でなければならないことを表す.

#### ● ALF制約

 $ALF(n, \{x_{ij} \in C_r\})$  [at least n false constraint]は制約 $C_r$  に含まれるVVPの内,少なくともn個が偽でなければならないことを表す.

#### ● AMT制約

 $AMT(n, \{x_{ij} \in C_r\})$  [at-most-n-true-constraint]は制約  $C_r$ に含まれるVVPの内,多くともn個が真でなければならないことを表す.

#### ● AMF制約

 $\mathsf{AMF}(n,\{x_{ij}\in C_r\})$  [at most n false constraint]は制約  $C_r$ に含まれるVVPの内,多くともn個が偽でなければならないことを表す.

#### ● IVTC制約

IVTC( $x_{lm}$   $C_k$ }) [If VVP  $x_{lm}$ , then  $C_k$  constraint]は もし, VVP  $x_{lm}$ が真ならば,制約 $C_k$ は充足しなけ

ればならないことを表す.この制約の自然な拡張として, $IVTC(\neg x_{lm} \neg C_k)$ )が考えられる.

上記のように、一般的な制約を用いて CSP を表現することにより "2 つの VVP が同時になりたたない"ということで問題を表現する 2 項制約よりも簡潔に問題を表現することができる.一般的な制約で頂点彩色問題を表現した場合を図1に示す.頂点彩色問題とは、隣り合う頂点は同じ色に彩色しないように、全ての頂点を与えられた色数で彩色する問題である.図1は、3 彩色問題における2 頂点間の関係を表している.

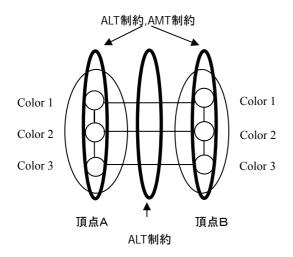


図1 一般的な制約による表現

図1において,太線で囲んでいるのは,VVPに対する制約を表している.また,クラスターはCSPの変数を,クラスター中のノードは変数のとる値を表している.ALT制約は,2頂点間は同じ色で塗ってはならないという制約を表し,ALT制約,AMT制約は,各頂点はちょうど1色で塗られなければならないという制約を表している.

# **4.** ニューラルネットワークによる CSP の解法

我々はCSPに対してLPPH-CSPと呼ばれるニューラルネットワークを提案している.LPPH-CSPでは,各VVP  $x_{ij}$ は"変数iが値jをとる確かさ"を表す変数と考え,0から1の間の実数値をとるとする.すなわち, $x_{ij}$ が大きいほど,CSPの変数 $X_i$ に値として $a_{ij}$ が割り当てられる確からしさが強いことを意味する.LPPH-CSPの力学系は次のようになる.

$$\frac{dx_{ij}}{dt} = x_{ij} \left( 1 - x_{ij} \right) \sum_{r=1}^{m} w_r s_{rij} \left( x \right)$$
$$\frac{dw_r}{dt} = -\alpha w_r + h_r \left( x \right)$$

上式において,関数  $s_{rij}(x)$ は制約 r を充足させるために  $x_{ij}$ に働く力を表す. $h_r(x)$ は制約 r が充足していない度合いを表す関数であり 制約 r が充足したなら 0 を返し 制約 r が充足していないなら正の値を返す関数である。 $\alpha$  は減衰係数とよばれ,解の探索の効率に大きな影響を与える.LPPH-CSP において各変数は制約を充足させるように変化し,制約の重み  $w_r$  は制約  $C_r$  が充足していないならば大きくなる .LPPH-CSP における制約と変数のネットワークを図2に示す .VVPNは現在の値を CN に出力し,CN はその制約に現れている変数の値から制約を充足させるような力を計算し,各 VVPN に出力する.つぎに VVPN に出力する.つぎに VVPN に対する関数 VVPN に対する関数 VVPN に対する関数 VVPN の計算式を示す.

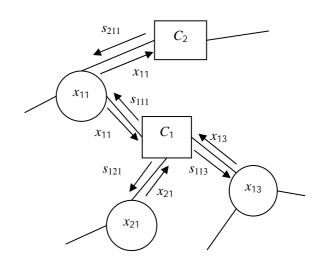


図2 制約と変数のネットワーク図

#### <ALT 制約>

ALT 制約  $C_r$ の充足度関数  $h_r(x), s_{rij}(x)$ は次のように定義される.

$$s_{rij}(\mathbf{x}) = \text{NMax}(n, \{x_{ij} \in C_r\})$$

$$s_{rij}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 - \text{NMax}(n+1, \{x_{ij} \in C_r\}) \\ \text{if } x_{ij} \leq h_r(\mathbf{x}) \\ 1 - h_r(\mathbf{x}) \\ \text{otherwise} \end{cases}$$

NMax(n, S) = nth maximum value in S.

 $s_{rij}(x)$ は  $x_{ij}$ が ALT 制約  $C_r$ に含まれる変数において,N 番目に大きい変数よりも等しいか,それよりも大きいならば,(1·N+1番目に大きな値)の分だけ正の力を与え,それ以外の場合は,(1·N 番目に大きな値)の分だけ,正の力を与える.

#### <ALF 制約>

ALF 制約  $C_r$ の充足度関数  $h_r(x),s_{rij}(x)$ は次のように定義される.

$$h_r(\mathbf{x}) = \text{NMin}(n, \{x_{ij} \in C_r\})$$

$$s_{rij}(\mathbf{x}) = \begin{cases} -\text{NMin}(n+1, \{x_{ij} \in C_r\}) \\ \text{if } x_{ij} \le h_r(\mathbf{x}) \\ -h_r(\mathbf{x}) \\ \text{otherwise} \end{cases}$$

NMin(n, S) = nth minimum value in S.

 $s_{rij}(x)$ は  $x_{ij}$ が ALT 制約  $C_r$ に含まれる変数において,N 番目に小さい変数よりも等しいか,それよりも小さいならば,N+1番目に小さな値の分だけ負の力を与え,それ以外の場合は,N 番目に小さな値の分だけ,負の力を与える.

### <AMT 制約>

AMT 制約  $C_r$ の充足度関数  $h_r(x), s_{rij}(x)$ は次のように定義される.

$$h_r(\mathbf{x}) = \text{NMax}(N+1, \{x_{ij} \in C_r\})$$

$$s_{rij}(\mathbf{x}) = \begin{cases} -\text{NMax}(N, \{x_{ij} \in C_r\}) \\ \text{if } x_{ij} \le h_r(\mathbf{x}) \\ -h_r(\mathbf{x}) \\ \text{otherwise} \end{cases}$$

 $s_{rij}(x)$ は $x_{ij}$ が AMT 制約  $C_r$ に含まれる変数において,N+1番目に大きい変数よりも等しいか,それよりも小さいならば,N番目に大きい変数の値の分だけ負の力を与え,それ以外の場合は,N+1番目に大きい変数の分だけ,負の力を与える.

#### <IVTC 制約>

IVTC 制約  $C_r$  の充足度関数  $h_r(x), s_{rij}(x)$  は次のように定義される.

$$s_{rij}(\mathbf{x}) = s_{lm} h_k(\mathbf{x})$$

$$s_{rij}(\mathbf{x}) = \begin{cases} s_{lm} s_{kij}(\mathbf{x}) \\ \text{if } s_{ij} \in C_k \\ -h_k(\mathbf{x}) \\ \text{otherwise} \end{cases}$$

 $s_{rij}(x)$ はもし  $x_{ij}$ が制約  $C_k$  に現れる VVP ならば,制約  $C_k$  を充足させるために  $x_{ij}$  が変化する量に  $x_{lm}$ を掛けたものが IVTC 制約  $C_r$ を充足させるために  $x_{ij}$  が変化する量となる.

次に  $IVTC(\neg x_{lm} \neg C_k)$ の  $h_r(x), s_{rij}(x)$ は次のように定義される.

$$h_r(\mathbf{x}) = (1 - x_{lm})(1 - h_k(\mathbf{x}))$$

$$s_{rij}(\mathbf{x}) = \begin{cases} (1 - x_{lm})s_{kij}(\mathbf{x}) \\ \text{if } x_{ij} \in C_k \\ 1 - h_k(\mathbf{x}) \\ \text{otherwise} \end{cases}$$

 $s_{rij}(x)$ はもし  $x_{ij}$ が制約  $C_k$  に現れる VVP ならば,制約  $C_k$  を充足させるために  $x_{ij}$  が変化する量に (1-  $x_{lm}$ )を掛けたものが IVTC 制約  $C_r$  を充足させるために  $x_{ij}$  が変化する量となる.

# 5. 目的関数付 CSP への適用

Warehouse Location Problem(WLP)は 2 節で示した制約を用いて目的関数付 CSP として表現することができる.目的関数付 CSP では,制約を満たす変数への値の割当てのなかである目的関数を最小にする割当てが解となる.

# 5.1. WLP の制約, コスト

WLP の制約としては次のようなものが与えられる.

- 会社は候補地から卸売店を開かなければならない。
- 各売店はちょうど1つの卸売店から供給される.
- 各候補地の卸売店は供給できる売店の上限 がある.

WLPでは、売店に対して供給コストが与えられる.供給コストにいくらかかるかは各候補地に依存する.また、各卸売店を開くには維持費がかかるものとする.WLPの目的としては、維持費と供給コストの総和を最小にするよう。2節に対して卸売店を割当てることである。2節に対した一般的な制約を用いてWLPを表現したものを図3に示す.図において、ALT制約は、AMT制約は、各売店はちょうど1つの卸売店が開店からは、時間には上限があり、もし、ある卸売店が開店のどちらかの状態をとるという制約を表している.IVTC制約は、もし、ある卸売店が開店するならば、供給される店には上限があり、もしないう制約を表している.

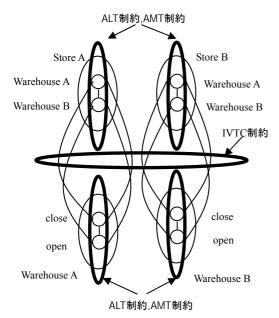


図3 WLPの制約表現

#### 5.2. LPPH-CSP の適用

変数  $x_{ij}$  を売店 i が卸売店 j から供給を受ける確かさを表す変数とし,変数  $y_{j0}$  を卸売店が閉店する確かさを表す変数,変数  $y_{j1}$  を卸売店が開店する確かさを表す変数とする.変数  $x_{ij}$  ,  $y_{j0}$  ,  $y_{j1}$  ともに  $\mathbf{0}$  から 1 の実数値をとるものとする.つぎに売店 i が卸売店 j から供給される際のコストを  $c_{ij}$ 、卸売店 j が開店する際の維持費を  $d_j$  とする.これらの変数を用いて目的関数を次に示す.

$$E(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} x'_{ij} c_{ij} + \sum_{j=1}^{m} y_{j1} d_{j}$$

$$x'_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } x_{ij} \ge 0.5\\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

LPPH-CSP の力学系は次のようになる。

$$\frac{dx_{ij}}{dt} = x_{ij} \left( 1 - x_{ij} \left( \sum_{r=1}^{m} w_r s_{rij}(\mathbf{x}) - W \frac{\partial F(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{\partial \mathbf{x}} \right) \right)$$

$$\frac{dw_r}{dt} = -\alpha w_r + h_r(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$

$$\frac{dW}{dt} = -\beta W + F(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$

$$F(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = C \frac{f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - upperbound}{upperbound - lowerbound}$$

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} x_{ij} c_{ij} + \sum_{j=1}^{m} y_{j1} d_{j}$$

この力学系を用いてWLPの解をつぎのように求める.

1. ランダムに初期値を設定

- 2. 力学系の更新を行う.
  - A) E(x,y)を計算する.
  - B) もし $E_{best} > E(x,y)$ かつ,制約が全て満たされているなら, $E_{best} = E(x,y)$ とし,現在の解を記憶する.
- 3. 2 を繰り返す.もし一定期間 *E<sub>best</sub>* が改善されなかったら探索を終了する.

# 7. まとめ

本論分では,効果的に制約を表現するために,一般的な制約を考え,その制約を用いてLPPH-CSPを目的関数付 CSP の一つである WLPに適用する手法について提案した.本手法を実装し,その有効性の検証をおこなうことが今後の課題である.また,効果的な  $h_r(x), s_{rij}(x)$ の決め方についても検討を行っていく予定である.

# 参考文献

- [1] M. Nagamatu, and T. Yanaru, "On the stability of Lagrange programming neural networks for satisfiability problems of prepositional calculus", Neurocomputing, 13, 119-133, 1995.
- [2] M. Nagamatu, and T. Yanaru, "Solving SAT by Lagrange Programming Neural Network with Long and Short Term Memories", in "Information Modeling and Knowledge Bases XI," IOS Press, pp289-301, 2000.
- [3] M. Nagamatu, and T. Yanaru, "Extensions of Lagrange Programming Neural Network for Satisfiability Problem and its Several Variations", Proceedings of 9th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP2002), 2002.

#### 連絡先:

中野 隆宏

九州工業大学大学院生命体工学研究科

〒808-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-4

Phone + Fax: 093-695-6088

E-mail:

nakano-takahiro@edu.brain.kyutech.ac.jp

# 距離情報に基づく介在素子の付加による 階層型ニューラルネットワークの学習能力の向上

# Enhancement of Learning Capability of Multilayer Neural Networks with Intermediate Element using Distance

猪平 栄一 横井 博一 Eiichi Inohira Hirokazu Yokoi 九州工業大学

Kyushu Institute of Technology

**Abstract:** In conventional multilayered neural networks, it is known that increasing the number of the hidden layer elements can improve the learning accuracy. However, increasing the number of the elements does not always contribute to improve the learning capability because it results in raising the probability to converge to a local minimum in back-propagation learning. One of authors has focused on intermediate neurons in a biotic brain. There are the layers of the intermediate neurons in cerebellar cortex and cerebral cortex. The number of such neurons is very large. It is consider that these neurons play a role to enhance the capability of information processing. The new-type multilayered neural networks with intermediate elements such as feature detection elements and categorizing elements have been presented. Though it is already shown that these intermediate elements can improve the learning capability and accuracy, we have not yet discussed what characteristics is suitable for intermediate elements. In this paper, we present the new-type intermediate element based on Euclidean distance, which is suitable information for categorizing. Simulation results also show the effectiveness of the presented element.

### 1. はじめに

階層型ニューラルネットワークでは中間層の 素子数を増加させることによって,表現能力を 向上させることができる.一方,素子数の増加 は誤差逆伝播学習時において局所解に収束する 確率を高めるため,必ずしも学習能力の向上に 寄与しない. 筆者の一人は生物の脳内に存在す る介在ニューロンに着目し、特徴検出やカテゴ リ化の機能を備えた介在素子を付加した階層型 ニューラルネットワークを提案した[1]. これら の介在素子の付加による学習能力の向上を確認 したが、介在素子が備えるべき機能について議 論の余地が残っている. そこで, 本論文ではカ テゴリ化に適した距離情報に基づく介在素子を 新たに導入し、学習能力の向上を計算機実験に より示す.

# 2. 介在素子を付加した階層型ニューラル ネットワーク

# 2.1 ネットワークの構造

本論文では、3層ニューラルネットワークの層 間に介在素子を付加したネットワークを議論の 対象とする. 図に、介在素子を付加した 3 層二 ューラルネットワークを示す. 図中の黒丸は、 介在素子を表す. ここで, 1層と2層の間に存在 する介在素子の層を I2 層, 2 層と 3 層の間に存 在する介在素子の層を I3 層と呼ぶ.

介在素子の役割は二つある.一つは、前の層

の出力から隠れた情報を抽出し,後の層に提供 することによって、ネットワークの表現能力を 高めることである. もう一つは, 局所解に収束 することを避けることである.後者の役割を果 たすため,介在素子のパラメータは固定され, 学習による修正は行わない.

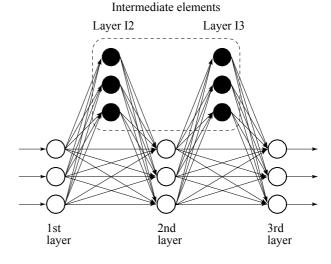


図1 介在素子を付加した3層ニューラル ネットワーク

文献[1]では、Hamming 距離に基づくカテゴ リ化素子を用いたネットワークで学習能力の大 幅な向上が見られた. 距離情報には、Hamming 距離以外にも、ユークリッド距離、重み付きユークリッド距離、シティブロック距離、マハラノビス距離がある。入力ベクトルをベクトル空間内のカテゴリに分類する場合、基準ベクトルからユークリッド距離を用いるのが妥当と考えられる。そこで、本論文では、距離情報として、ユークリッド距離に用いた素子を介在素子として導入にし、どの程度学習能力が向上するかを計算機実験により検証する。

#### 2.2 基本しきい素子

一般に 3 層ニューラルネットワークに用いられる素子は学習しきい素子である. 本稿では、素子の種類を区別するため、従来の学習しきい素子を基本しきい素子と呼ぶ. 基本しきい素子の入出力特性は次式で表される.

$$u = \boldsymbol{W} \cdot \boldsymbol{X} \tag{1}$$

$$z = \frac{1}{1 + \exp[-A(u - h)]}$$
 (2)

ここで、W は荷重ベクトル、X は入力ベクトル、u は入力荷重和、h は閾値、z は出力である。ロジスティック関数のパラメータA は、正の実数とする。

## 2.3 カテゴリ化素子

カテゴリ化素子(CE)は、文献[1]で提案された素子である。カテゴリ化素子は、代表ベクトルと入力ベクトルとの Hamming 距離を判断量とする素子である。

入出力特性は次式で表される.

$$u = \sum_{i} w_i x_i - n^R \tag{3}$$

$$z = \frac{1}{1 + \exp[-A(u+D)]}$$
 (4)

代表ベクトル $X^R$ は 0-1 ベクトルとする. 荷重ベクトルW は次式のように表される.

$$w_{i} = \begin{cases} +1: x_{i}^{R} = 1\\ -1: x_{i}^{R} = 0 \end{cases}$$
 (5)

ここで、式の $n^R$  は代表ベクトルの1 の個数であり、代表ベクトルの濃度と呼ぶ。D は正の実数で、反応調整定数と呼ぶ。

#### 2.4 基本距離素子

基準ベクトルとのユークリッド距離を判断量とする素子を基本距離素子(FLDT)と呼ぶ.基本距離素子は、入力ベクトルをカテゴリ化しているとみなすことができる、基本距離素子の入出力特性は、次式で表される.

$$u = \|\boldsymbol{W} - \boldsymbol{X}\| \tag{6}$$

$$z = \exp[-(\rho u)^{2A}] \tag{7}$$

ここで, W は基準ベクトル,  $\rho$  は選択度である.

#### 2.5 学習則

介在素子を付加した階層型ニューラルネットワークの学習則は、最急降下法を用いることにより導出する.評価関数には、次式に示す誤差 2乗和 E を用いる.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i} (y_i - z_i)$$
 (8)

ここで、 $y_i$ は最終層すなわち第 3 層の第 i 素子に与える教師信号、 $z_i$ は第 3 層第 i 素子の出力信号である。

各パラメータの学習則については冗長のため, 割愛する.

## 3. 計算機実験

### 3.1 ニューラルネットワーク

10 入力 10 出力の 3 層ニューラルネットワークについて計算機実験を行う.本論文では,以下の5種類のニューラルネットワークを用いる.

- 1. 介在素子を持たない 3 層ニューラルネット ワーク (None)
- 2. I2, I3層にカテゴリ化素子を用いた 3層ニューラルネットワーク (CE)
- 3. I2, I3層に基本距離素子を用いた 3層ニュー ラルネットワーク (FLDT)
- 4. I2 に基本距離素子を, I3 層にカテゴリ化素 子を用いた 3 層ニューラルネットワーク (FLDT+CE)
- 5. I2 にカテゴリ化素子を, I3 層に基本距離素 子を用いた 3 層ニューラルネットワーク (FLDT+CE)

簡単のため、各ネットワークをネットワーク (...) と表記する. 例えば、上の 1. のネットワークをネットワーク(None)と表記する. 各ニューラルネットワークにおける I2, I3 層の介在素子の種類および素子数を表 1 に示す. 介在素子の効果を比較するため、各ネットワークの第 2 層の素子数は 10 個とする.

表 1 各ニューラルネットワークに付加される 介在素子の種類と素子数

	I2 la	ayer	I3 layer					
	Type	Number	Type	Number				
1	None	0	None	0				
2	CE	45	CE	45				
3	FLDT	45	FLDT	45				
4	FLDT	45	CE	45				
5	CE	45	FLDT	45				

### 3.2 入力データおよび教師データ

無作為に抽出した10次元の0-1ベクトルを入力ベクトルおよび教師ベクトルとして用いる. 入力データと教師データは、それぞれ50個のベクトルから構成される.各ベクトルは互いに重複しないものとする.

各ネットワークに与える入力データおよび教師データは同一とする.

# 3.3 結合荷重の初期値と学習パラメータの設定値

各ネットワークに基本しきい素子の結合荷重の初期値は、 $-0.3\sim0.3$ の範囲の一様乱数によって与える。基本しきい素子のしきい値も同様に $-0.3\sim0.3$ の範囲の一様乱数によって与える。基本しきい素子のパラメータAは、1とする。

基本距離素子の結合荷重の初期値は、 $0.2\sim0.8$  の範囲の一様乱数によって与える。 基本距離素子のパラメータ $\rho$ は 1、Aは 6 とする。 これらのパラメータは、予備実験より得られた最適値である。

カテゴリ化素子の結合荷重の初期値は、以上の素子と同様に乱数を用いて与えるが、手順は複雑である。それは、介在素子として可能な限り有効に作用するものを選び出すためである。各代表ベクトルがベクトル空間全体に一様に分布するようにするためには、代表ベクトル間のHamming 距離ができるだけ大きいほうがよい。そこで、乱数によって生成した代表ベクトルの集合を 100 個用意し、評価値が最も良いものを採用する、評価関数は、次式で表される。

$$E_i^{CE} = \sigma_i + (10 - \overline{d_i^H}) \tag{9}$$

ここで, $\sigma_i$ を代表ベクトル間の Hamming 距離の標準偏差とし, $\overline{d_i^H}$  を平均とする.評価値が小さいほどよいとする.すなわち,Hamming 距離の平均 $\overline{d_i^H}$  が大きく,標準偏差 $\sigma_i$  が小さいほど評価が高い.つまり,評価関数 $E_i^{CE}$  を最小とする代表ベクトルの集合を初期値として採用する.

以上のように、結合荷重の初期値は乱数によって与えられるため、学習結果は試行の度に異なる。そこで、複数回試行を行い、その統計量に基づいて評価を行うべきである。本論文では、各ネットワークについて初期値の違うネットワークを 30 個用意し、それぞれ学習を行う。すなわち、各ネットワークについて 30 回の試行を行うということである。

なお、基本しきい素子の学習パラメータは、 各ネットワークにおいて同一とする.

#### 3.4 学習方法

各ネットワークには、3. 2. で定義した 50 個の入力ベクトルの集合  $Q_i$  と 50 個の教師ベクトルの $U_i$  との間の関係  $F_i$ :  $Q_i \rightarrow U_i$  を学習させる. 結合荷重の更新は、1 組の入力ベクトルと教師ベクトルを与えるごとに行う。50 個の入力ベクトルは一定の順序で与えられる。50 個の入力ベクトルによって結合荷重の更新を行う過程を 1 学習サイクルとする。学習は、1000 学習サイクルまで行う。

#### 3.5 評価

学習能力の評価指標として、学習精度を定義する. 50 個すべての入力ベクトルに関する 1000 学習サイクル時における誤差 2 乗和  $E^i$  の和を  $\left\langle E^i \right\rangle$  とする. つまり、 $\left\langle E^i \right\rangle$  は次式のように表される.

$$\left\langle E^i \right\rangle = \sum_{i=1}^{50} E^i_j \tag{10}$$

30 回の試行における $\left\langle E^i \right
angle$ の平均を $\overline{\left\langle E \right
angle}$  とする.  $\overline{\left\langle E \right
angle}$  は,次式のように表される.

$$\overline{\langle E \rangle} = \frac{\sum_{i=1}^{30} \langle E^i \rangle}{30} \tag{11}$$

 $\langle E \rangle$ を学習精度として用いる.

### 4. 結果

3.1 で述べた 5 種類のニューラルネットワークを学習精度について比較したものを図 2 に示す. 介在素子を付加した 4 種類のニューラルネットワークの平均誤差 2 乗和を表 2 に示す. また,表 2 には文献[1]で示されたネットワーク(CE)の平均誤差 2 乗和を基準とした比も示している.

図 1 より、介在素子を用いることによって、大幅に学習精度が向上することが明らかである. しかしながら、新たに導入した基本距離素子のみを用いたネットワーク(FLDT)は、期待に反して学習精度は良くなかった. ネットワーク(FLDT)の平均誤差 2 乗和は、介在素子を付加した 4 種類のネットワークの中で最も大きい. つまり、最も学習精度が低い. 最も学習精度が高かったネットワークは、ネットワーク(CE+FLDT)の平均誤差 2 乗和は、ネットワーク(CE+FLDT)の平均誤差 2 乗和は、ネットワーク(CE)の 0.37倍である. つまり、I3層に基本距離素子を介在素子として用いることによって、学習精度を向上させることができた.

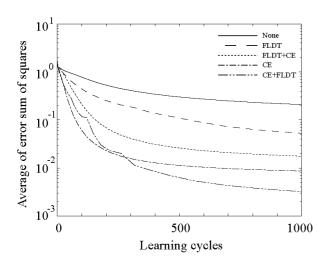


図 2 各ニューラルネットワークの平均誤差 2 乗和の推移

表 2 各ニューラルネットワークの平均誤差 2 乗和と比

Туре	$\overline{\langle E \rangle}$	Ratio
FLDT	$5.2 \!  imes \! 10^{-2}$	6.0
FLDT+CE	$1.7 \times 10^{-2}$	2.0
CE	$8.7 \times 10^{-3}$	1
CE+FLDT	$3.7 \times 10^{-3}$	0.37

#### 5. 考察

ネットワーク(CE+FLDT)が最も学習精度が 高かった理由について考察する.

理由の一つとして挙げられるのが、介在素子への入力ベクトルの性質である。今回ネットワークの入力ベクトルは、0.1 ベクトルとした。よって、12 層への入力は、0.1 の 2 値しかない。一方、13 層への入力は、2 層の出力である。2 層への入力は 0.1 ベクトルであるが、荷重ベクトルの値は実数である。ゆえに、2 層の出力は、入出力特性から 0~1 の実数である。つまり、13 への入力は、0~1 の実数である。

カテゴリ化素子は、入力ベクトルが 0-1 ベクトルのとき、入力ベクトルと代表ベクトルとのHamming 距離に基づいて出力を行うことになる。しかし、入力ベクトルが 0-1 ベクトルではなく単に実数ベクトルの場合は、Hamming 距離を計算しているとは言えず、どのような働きをしているか説明することはできない。つまり、Hamming 距離に基づくカテゴリ化が有効に機能していないと推測される。

一方,基本距離素子は,入力ベクトルと基準 ベクトルとのユークリッド距離を判断量とする 素子である.入力ベクトル,基準ベクトルがともに実数ベクトルならば、ユークリッド距離に基づいてカテゴリ化を行うことになる.入力ベクトルがベクトル空間内に分布しているならば、ユークリッド距離に基づくカテゴリ化は有効だと考えられる.しかし、入力ベクトルが 0·1 ベクトルの場合、すべての入力ベクトルはベクトル空間の境界上に存在することになる.このように入力ベクトルのベクトル空間内の分布は極めて偏っていると、ユークリッド距離に基づくカテゴリ化は有効に機能していないと考えられる.

以上より、I2層への入力ベクトルは 0-1 ベクトルであるから、I2層の介在素子にはカテゴリ化素子を用いればよいと考えられる.また、I3への入力ベクトルは実数ベクトルであるから、I3の介在素子には基本距離素子を用いればよいと考えられる.すなわち、介在素子の組み合わせの中では、ネットワーク(CE+FLDT)の構造が最適であると言える.以上の考え方に基づいて、ネットワーク(CE+FLDT)の学習精度が最も良かったという今回の計算機実験の結果を説明することができる.

#### 6. おわりに

本論文では、距離情報としてユークリッド距離を用いた介在素子を用いたニューラルネットワークについて計算機実験を行った. 基本距離素子を介在素子として用いることによって、学習精度の向上に寄与することを示した.

# 参考文献

- [1] 横井 博一, 木本 智幸: 介在素子を付加した 階層型ニューラルネットワーク, バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, Vol. 1, No. 1, pp. 87-97, 1994
- [2] 横井 博一, 染井 陽介: 並列分散処理ネット ワーク用基本素子の比較, バイオメディカ ル・ファジィ・システム学会誌, Vol. 1, No. 1, pp. 99-112, 1994

#### 連絡先:

猪平 栄一

九州工業大学大学院生命体工学研究科

〒808-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-4

Phone + Fax: 093-695-6050

E-mail: inohira@life.kyutech.ac.jp

# 階層型ニューラルネットワークにおけるマルチブランチ構造とその局所性

# Multi-Branch Structure and its Localized Property in Layered Neural Networks

山下 貴志, 平澤 宏太郎, 古月 敬之

Takashi Yamashita, Kotaro Hirasawa, Takayuki Furuzuki

早稲田大学

#### Waseda University

Abstract: Neural networks (NNs) can solve only a simple problem if the network size is too compact, on the other hand, if the network size increases, it costs a lot in terms of calculation time. So, we have studied how to construct the network structure with high performances and low costs in space and time. A solution is a multi-branch structure. Conventional NNs use the single-branch for the connections, while the multi-branch structure has multi-branches between the nodes. In this paper, a new method which enables the multi-branch NNs to have localized property is proposed.

#### 1 はじめに

人工ニューラルネットワークを設計する際に、ネットワークの最適なサイズ (中間層ノード数)を選択する一つの基準は、その計算コストである。より小規模サイズのネットワークがより少ない計算コストを必要とすることは明確である。しかし、小規模サイズのネットワークでは、単純な問題しか解くことは出来ない。いくら計算コストが小さくても与えられた問題を解くことが出来なければ無意味であるため、計算コストが増加しても、ネットワークサイズを大きくせざるを得ないことがある。

このように、ネットワークのサイズは計算コストと 強い相関関係にあり、また、ネットワークのサイズが その性能に大きな影響を与えている。ネットワーク のサイズと計算コストの強い関係は変えられないが、 ネットワークのサイズとその性能の関係は改善する余 地がある。

Universal Learning Networks (ULNs)  $^1$  は各種のニューラルネットワーク構造の一般的な枠組みを与えており、その中にマルチブランチ構造も含まれている。このマルチブランチ構造では、任意の数のブランチがノードを接続しており、主に動的ネットワークにおいて時間遅れを設定するために用いられている $^2$ 。本論文では、ノード数を削減した小さいサイズのネットワークを実現するためにマルチブランチ構造を用いる。従来の階層型のニューラルネットワーク(NNs)では、非線形処理の点で中間層ノードはかなり重要な役割を持っている。それに対し、マルチブランチニューラルネットワークではノード以外にブランチニューラルネットワークではノード以外にブランチにも同様に非線形処理の役割を持たせてノードの非線形処理の負担を軽減している。

また、提案手法のマルチブランチニューラルネットワークでは、マルチブランチ構造において局所性を考慮している。Radial Basis Function (RBF)  $^{3}$   $^{4}$  ネットワークはその局所性により、その他の従来のニューラルネットワークよりも短い学習ステップで滑らかに関数を近似することが知られている。この局所性は高速に学習するための性質の1つであり、マルチブランチ構造にも利用できる。

従来手法との比較のために、シミュレーションとして関数近似と分類問題について取り上げ、提案手法の有効性を示した。

本論文の構成は次の通りである。第2章ではマルチブランチニューラルネットワークについて説明し、第3章ではシミュレーションについて、第4章は結論である。

#### 2 マルチブランチニューラルネットワーク

#### 2.1 マルチブランチの構造

従来のニューラルネットワークはその接続にシングルブランチを用いており、また、それぞれのブランチには1つの結合重みが設定されている。これを拡張したものが図1に示したマルチブランチ構造である。従来のニューラルネットワークでは中間層のノード数を増加することにより、その表現能力の向上を図っている。しかしながら、多数のノードは学習に要する計算コストを大きくする。特に、誤差逆伝播法5ではノード数は計算コストに大きく影響する。

ニューラルネットワークの技術を実際に様々な問題に応用する際、計算コストは出来るだけ削減されることが望まれる。マルチブランチ構造は、ネットワークの表現能力を向上させるために、ノード数を増加するのではなく、ブランチ数を増加することで表現能力を

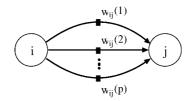


図 1: ノード間におけるマルチブランチ構造

高め、かつ、計算コストを小さく抑えられることに特 徴がある。

また、マルチブランチニューラルネットワークでは、ブランチにおける信号処理も従来手法を拡張できる。式(1)に従来のブランチにおける信号の処理を示す。ただし、 $\alpha_i$ はノードjへの入力値を表す。

$$\alpha_j = \sum_{i \in JF(j)} w_{ij} h_i + \theta_j, \tag{1}$$

ここで、JF(j):ノードj へ接続するノードの添字の集合、 $w_{ij}$ :ノードi からノードj へのブランチの結合重み、 $h_i$ :ノードi の出力値、 $\theta_j$ :ノードj の閾値、である。

これに対して、マルチブランチニューラルネットワークでの信号処理は、式(2)で表される。

$$\alpha_j = \sum_{i \in JF(j)} \sum_{p \in B(i,j)} w_{ij}(p) g_{ij}(p, h_i) + \theta_j, \quad (2)$$

ここで、B(i,j):ノードi からノードj へのブランチの添字の集合、 $w_{ij}(p)$ :ノードi からノードj へのp 番目のブランチの結合重み、 $g_{ij}(p,h_i)$ :ノードi からノードj へのp 番目のブランチにおけるノード出力 $h_i$  の非線形変換値、である。

また、式 (2) の表現は式 (1) を含み、 $g_{ij}(p,h_i) = h_i, p = 1$  のときに式 (2) は式 (1) と等しくなる。

#### 2.2 マルチブランチの非線形変換

マルチブランチにおける非線形変換は、従来のニューラルネットワークのノード間に新たに別のノードを追加した構造と等価であるが、次の点で異なる。従来ニューラルネットワークのノードでは、ほかのノードと接続するために任意の数の入力及び出力を持つ。また、ニューラルネットワークのノード数が誤差の二乗を微分計算して逆伝播を行う際の計算コストに大きな影響を与える。これに対して、マルチブランチで非線形変換を行い、ノードを削減すれば逆伝播計算のための計算コストを小さく抑えることができる。

ノードの数が削減されたマルチブランチニューラル ネットワークが、従来のニューラルネットワークと同

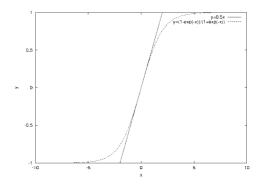


図 2: 線形関数とシグモイド関数

等あるいはそれ以上の性能を持つためのポイントはブランチ上の非線形変換の表現である。

多くのニューラルネットワークのノード関数にはシ グモイド関数が用いられている。シグモイド関数には 図2のように、線形領域に近い部分がある。

実際、汎化能力を強化するために学習を行うと、結合重みの絶対値は小さくなる傾向があるので、ノードの非線形変換にはこの線形領域が用いられるケースが多い。また、ブランチにおける重み付けも線形スケーリングになっている。

つまり、これらのことから従来のシグモイド型ニューラルネットワークは多数の線形領域を使用する可能性が高い。このことは、ノード数の少ないニューラルネットワークでは、非線形性の強い問題を解くのが困難であることを意味する。このことを考慮すると、マルチブランチニューラルネットワークの各ブランチでの非線形変換は大きな意味を持っている。実際、べき乗関数、正弦波関数などの非線形変換を用いたマルチブランチ構造でもその効果は確認されている。6。

以上のようなマルチブランチによる非線形処理に よって、マルチブランチニューラルネットワークでは ノードの数が少なくてもネットワークの表現能力は向 上すると考えられる。

#### 2.3 マルチブランチの局所性

提案手法のマルチブランチニューラルネットワークでは、式 (2) の関数  $g_{ij}(p,h_i)$  として式 (3) に示すガウス関数を用いる。

$$g_{ij}(p, h_i) = \exp(-\frac{(h_i - c_{ij}(p))^2}{\sigma_{ij}^2(p)})$$
 (3)

 $c_{ij}(p)$  はノードi からノードj へのp 番目のブランチの中心を表すパラメータ、 $\sigma_{ij}(p)$  はノードi からノードj へのp 番目のブランチのばらつきを表すパラメータである。これにより、局所性を得ることが出来る。

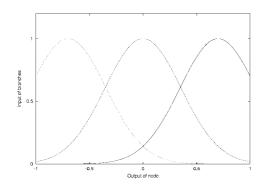


図 3: 各ブランチのガウス関数

つまり、図3に示すように、マルチブランチの前の ノード出力の値に依存して各ブランチがそれぞれの 異なった値を出力する局所性を持つようになる。従っ て、適切な表現能力を RBF ネットワークのように素 早く獲得できる。

ただし、提案手法においては、ブランチ入力の値に 注意する必要がある。ガウス関数の値がほぼ零とな る入力に対しては信号は伝播されない。従って、訓練 データの入力値を各ブランチの入力範囲に考慮して正 規化しなければならない。そうしなければ、誤差逆伝 播を使ってパラメータを訓練することが困難となる。

# 3 シミュレーション

#### 3.1 シミュレーション条件

提案手法を従来手法と比較するために、関数近似と Two Spirals 分類問題のシミュレーションを行った。 ここで、シミュレーション条件を説明する。

基本的に 3 階層のニューラルネットワークを考え、ノード関数はシグモイド関数  $\frac{1-\exp^{-\alpha_j}}{1+\exp^{-\alpha_j}}$  を用いている。ただし、関数近似問題を扱うときは出力層ノードは入力の総和を取るのみである。評価関数 E は以下のように定義し、誤差逆伝播アルゴリズムにより学習した。

$$E = \sum (h_o - h'_o)^2 + \eta \sum w_{ij}^2 \tag{4}$$

 $h_o$  はネットワークの出力値であり、 $h'_o$  は教師信号値を表す。また、重み減衰  $^7$  のためのペナルティ項を用いており、 $\eta$  は正則化係数である。従来のニューラルネットワークでは、係数  $\eta$  を調整することで汎化能力を強化することができる。提案手法のマルチブランチニューラルネットワークでは、ガウス関数を用いるので汎化能力を強化するためにパラメータ  $\sigma_{ij}(p)$  も適切に調整しなければならない。

学習パラメータに関しては、慣性項  $^8$  を利用した更新式:  $\lambda_m(s) \leftarrow (1-\alpha)\Delta\lambda_m(s) + \alpha\Delta\lambda_m(s-1)$  によって更新した。 $\lambda_m(s)$  はs ステップの学習パラメータであり、 $\Delta\lambda_m(s)$  は更新量を表している。係数  $\alpha$  は 0.95 を用いた。

マルチブランチニューラルネットワークにおいては、 $w_{ij}(p)$  や  $\theta_j$  と同様に  $c_{ij}(p)$  と  $\sigma_{ij}(p)$  も学習パラメータとして含まれる。 $w_{ij}(p)$  と  $\theta_j$  は [-1:1] の範囲でランダムに初期値を決め、 $c_{ij}(p)$  はノードの出力範囲([-1:1])に均等に分布するように初期値を決めた。 $\sigma_{ij}(p)$  は与えられる問題によって異なる初期値を用いた。

学習係数に関しては、 $w_{ij}(p)$ と $\theta_j$ に対する学習係数  $\gamma$  は 0.03 を初期値として、適応的に変化する。すなわち、更新した結果 E の値が減少したときは、 $\gamma \leftarrow 1.05\gamma$  により調整し、E が増加したときは、 $\gamma \leftarrow 0.95\gamma$  によって調整した。また、E(s)/E(s-1) > 1.05 のときはパラメータの更新は行わないものとした。ここで、E(s) は s ステップの評価関数である。 $c_{ij}(p)$  に対する学習係数  $\gamma_c$  は  $\gamma_c = 0.05\gamma$  として定義し、 $\sigma_{ij}(p)$  に対する学習係数  $\gamma_\sigma$  は与えられる問題によって異なる定数を用いた。

これらの条件の下で、関数近似と分類問題を取り上げて提案手法の性能を従来手法と比較した。マルチブランチニューラルネットワークでは、ブランチの数は任意に設定できるが、ここでは、全てのノード間のブランチ数が 2 である 2-branch NNs と全てのノード間のブランチ数が 3 である 3-branch NNs を用いてシミュレーションを行った。

#### 3.2 関数近似問題

関数近似問題では、以下の2つの式で表される関数 を近似対象とした(図4及び図5)。

$$f_1(x,y) = 0.5(0.475((1.35 + e^x \sin(13.0(x - 0.6)^2)) e^{-y} \sin(7y)) - 2.5) - 0.2), (0 \le x, y \le 1).$$
 (5)

$$f_2(x,y) = 0.2 \frac{(x-0.4)(2x+0.2)}{0.04+x^2} \frac{(y-0.4)(2y+0.2)}{0.04+y^2},$$

$$(-1 \le x, y \le 1).$$
(6)

関数  $f_1$  の訓練データは入力空間を  $16 \times 16$  点に分割した均等に分布する 256 のサンプルを用いた。また、汎化誤差を計算するための  $f_1$  のテストデータは 441 個  $(21 \times 21)$  のサンプルである。関数  $f_2$  に関しては、同様に訓練データ、テストデータをそれぞれ 441 個  $(21 \times 21)$  と 784 個  $(28 \times 28)$  のサンプルを用いた。

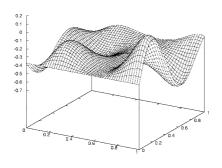


図 4: 教師関数  $f_1$ 

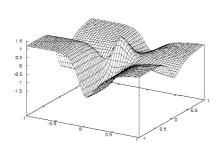


図 5: 教師関数  $f_2$ 

表 1: 関数  $f_1$  のシミュレーション結果

NNs	学習誤差 (MSE)	汎化誤差 (MSE)	中間層の	計算時間 (hours)
従来	$1.50 \times 10^{-4}$	$1.29 \times 10^{-4}$	36	0.84
2-branch	$6.68 \times 10^{-6}$	$6.80 \times 10^{-6}$	6	0.45
3-branch	$4.32 \times 10^{-6}$	$4.62 \times 10^{-6}$	4	0.43

表 2: 関数  $f_2$  のシミュレーション結果

NNs	学習誤差	汎化誤差	中間層の	計算時間
	(MSE)	(MSE)	ノード数	(hours)
従来	$1.24 \times 10^{-3}$	$1.33 \times 10^{-3}$	36	1.42
2-branch	$2.80 \times 10^{-4}$	$3.23 \times 10^{-4}$	6	0.75
3-branch	$2.04 \times 10^{-4}$	$2.27 \times 10^{-4}$	4	0.73

この関数近似問題では、正則化係数  $\eta=10^{-7}$  とし、また、パラメータ  $\sigma_{ij}(p)$  の初期値を 0.4 とし、その学習係数は  $\gamma_\sigma=3.0\times 10^{-4}$  とした。

関数  $f_1$  に対する学習誤差曲線を図 6 に、関数  $f_2$  に対する学習誤差曲線を図 7 に示す。なお、シミュレーションでは、マルチブランチニューラルネットワークの中間層のノード数を従来のニューラルネットワークより少なくし、両者のパラメータ数を同じにした。これらの学習誤差曲線を見ると、マルチブランチニューラルネットワークは従来のニューラルネットワークと比較して、早い学習ステップで誤差が小さくなっていることがわかる。

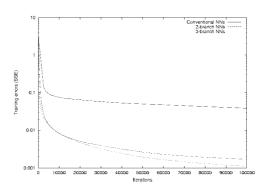


図 6: 関数  $f_1$  の学習誤差曲線

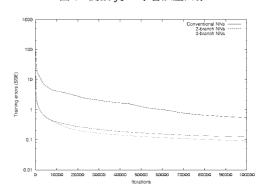


図 7: 関数  $f_2$  の学習誤差曲線

表 1 に関数  $f_1$  に対する学習誤差と汎化誤差を、表 2 に関数  $f_2$  に対する学習誤差と汎化誤差を示す。これらは、パラメータの初期値が異なる 10 回のシミュレーションの平均である。また、表 1、表 2 には、シミュレーションに用いたネットワークの中間層ノード数及び 100000 回の学習に要した計算時間(Intel Pentium 4 CPU 1.80GHz 384MB RAM 使用)も示した。これより、学習パラメータ数が同じである条件で中間層ノードの数はマルチブランチニューラルネットワークの方が少なくなり、従来のニューラルネットワークに対して、1/6 あるいは 1/9 程度となる。また、この結果、計算時間に関しても、マルチブランチニューラルネットワークでは従来ニューラルネットワークの約半分の時間しか要していない。従って、計算コストはメモリ及び時間の両面で小さくなる。

## 3.3 Two Spirals 分類問題

Two Spirals 分類問題は図8に示した2種類の絡み合った螺旋を分類することが目的である。訓練データは192個のサンプルであり、それぞれの螺旋に属する96個のサンプルがある。この分類問題では、マルチブランチニューラルネットワークは、訓練データに対して線形スケーリングにより[-0.8:0.8]の範囲に正規化している。また、条件を同じにするために従来手法に

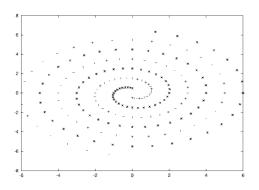


図 8: Two Spirals 学習データ

おいても同様に正規化した。ここでは、汎化能力を十分に得るために、正則化係数  $\eta=10^{-5}$  とし、パラメータ  $\sigma_{ij}(p)$  の初期値は 0.7 から 0.8 の範囲でランダムに設定した。また、その学習係数を  $\gamma_{\sigma}=5.0\times10^{-6}$  とした。なお、従来のニューラルネットワークでは 2 層の中間層を、マルチブランチニューラルネットワークでは 1 層の中間層を使用した。1 層の中間層の従来手法では、解くことが非常に困難であったためである。また、従来のニューラルネットワークのパラメータ数に対して、マルチブランチニューラルネットワークのパラメータ数に対して、マルチブランチニューラルネットワークのパラメータ数をやや少なめに設定している。

分類の成功例として図 9 に従来のニューラルネットワークの結果を、図 10 に 3-branch ニューラルネットワークによる結果を示す。成功した分類とは、学習データに対して 100% 正しく分類し、かつ、学習データ以外のデータを入力したときに、それぞれの螺旋に属する学習データの間に妥当な境界線が作られることを意味する。

図 11 及び図 12 は、従来ニューラルネットワーク とマルチブランチニューラルネットワークの学習誤差 曲線である。これらの学習誤差曲線は10回のシミュ レーション全てに対応している。従来手法の学習誤差 曲線(図11)では、誤差の減少の様子はパラメータの 初期値によってかなり違いがあることがわかる。誤差 がほとんど減少しない学習の停滞期がはっきり表れて いるものが多い。それに対して、提案手法の学習誤差 曲線(図12)では、誤差の減少はほぼすべての初期値 に対して類似した良好な様子を示している。学習の停 滞期は表れておらず、マルチブランチニューラルネッ トワークの表現能力が高く、局所解から脱出しやすい ことを示している。これらの学習曲線から提案のマル チブランチニューラルネットワークではより早い学習 ステップで安定した良好な結果が得られることがわ かる。

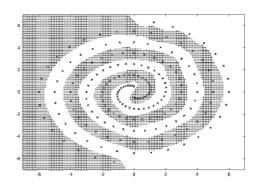


図 9: 従来のニューラルネットワークによる分類の成功例

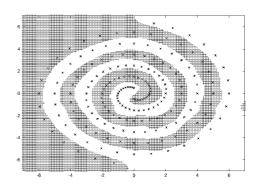


図 10: マルチブランチニューラルネット ワークによる分類の成功例

表 3: Two Spirals 分類の成功率

NNs	NNs 成功率		パラメ	計算時間	
			ータ数	(hours)	
従来	3/10	20+20	460	1.03	
3-branch	9/10	12	324	0.41	

表 3 に Two Spirals 分類問題の成功率等を示す。 従来のニューラルネットワークでは、3/10 のシミュレーションが成功し、提案のマルチブランチニューラルネットワークでは、3-branch NNs で、9/10 のシミュレーションが成功していることがわかる。つまり、提案手法のマルチブランチニューラルネットワークは汎化能力を十分に得ている。

また、従来手法では、40個のノードの2層の中間層を用いており、パラメータ数も460個と3-branch NNsの324個より多い。しかも、成功した分類結果を得るには多くの学習回数を必要とする場合が多い。提案手法はノードの数も12個、パラメータの数も324個と少なく、その上、学習回数も比較的少なくて済む。従って、計算コストは小さく抑えることが可能である。計算時間に関しては、マルチブランチニューラルネットワークのパラメータ数及びノード数が従来ニューラルネットワークより少ないので、当然マルチブランチニューラルネットワークより少ないので、当然マルチブランチニューラルネットワークの方が小さい。表3に50000回学習に要した時間を比較して示した。

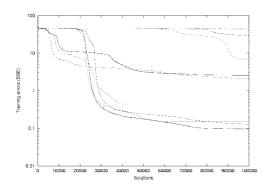


図 11: 従来のニューラルネットワークの学 習誤差曲線(Two Spirals 分類問題)

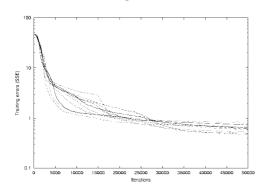


図 12: マルチブランチニューラルネット ワークの学習誤差曲線(Two Spirals 分類 問題)

### 4 結論

本論文では、マルチブランチ構造のニューラルネットワークの中で、特に、マルチブランチにガウス関数を用いて非線形性及び局所性を有効に利用する方式を提案した。関数近似や分類問題を用いて従来のニューラルネットワークと提案方式を比較した結果、小さい計算コストでありながら、より高い性能を示した。従って、マルチブランチニューラルネットワークでは、ネットワークサイズが小さく、かつ、表現能力の優れた構造を効率良い学習により求めることができる。

提案手法では、局所性のために、ある領域の入力 データにはほとんど零出力となるブランチが存在す る。今後、このような性質を用いて学習中にブランチ を削除したり、追加したりする方式の検討を行って いく。

# 参考文献

- [1] K. Hirasawa, X. Wang, J. Murata, J. Hu and C. Jin, "Universal learning network and its application to chaos control", Neural Networks, Vol. 13, pp. 239–253, 2000.
- [2] 平澤, 大林, 藤田, 古賀, "一般化学習ネットワーク 理論", 電気学会論文誌 C 分冊, 116 巻, 7 号, 1996.
- [3] Andrew R. Webb and Simon Shannon, "Shape-Adaptive Radial Basis Functions", IEEE Trans. Neural Networks, Vol. 9, No. 6, Nov. 1998.
- [4] C.-C. Lee, P.-C. Chung, J.-R. Tsai and C.-I. Chang, "Robust Radial Basis Function Neural Networks", IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics Part B, Vol. 29, pp. 674–685, 1999.
- [5] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton and R. J. Williams, "Learning internal representations by error propagation", Parallel distributed processing, Vol. 1, The MIT Press, pp.318–362, 1986.
- [6] T. Yamashita, K. Hirasawa, J. Hu and J. Murata, "Multi-Branch Structure of Layered Neural Networks", International Conference on Neural Information Processing, pp.243–247, November 2002.
- [7] G. E. Hinton, "Connectionist Learning Procedure", Machine Learning, ed. J. Carbonell, The MIT Press, 1990.
- [8] Sejnowski, T. J. and C. R. Rosenberg., "Parallel networks that learn to pronounce English text", Complex Systems 1: pp.145–168, 1987.

#### 連絡先:

平澤 宏太郎

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-7

Phone + Fax:093-692-5261

E-mail:hirasawa@waseda.jp

# ブランチゲート付きニューラルネットワーク

Neural Network with Branch Gates

後藤 健一<sup>1</sup>, 平澤 宏太郎<sup>1</sup>, 古月 敬之<sup>1</sup> Kenichi GOTO<sup>1</sup>, Kotaro HIRASAWA<sup>1</sup>, and Jinglu HU<sup>1</sup>

# 1 早稲田大学大学院情報生産システム研究科

<sup>1</sup>Waseda University Graduate School of Information, Production and Systems

Abstract: In this paper, a new architecture of Neural Networks (NNs) is proposed named Neural Networks with branch gates (NN-bg). It aims at improving the generalization ability of NNs by controlling the connectivity of neurons adaptively depending on the input information. To realize such architecture, we use a branch control network. In the branch control network, the distance between the input vector of the network and parameter vector of the branch control network is calculated. The outputs of the branch control network are multiplied to the branches of the NN. The parameters of the branch control network are trained to realize an adaptive optimization with very small number of training steps. Through some simulations, the usefulness of the three-layered NN-bg is shown compared with conventional layered neural networks.

## 1. はじめに

人間の脳は為すべき仕事によって動作する場所が異 なる, すなわち機能局在化していることが知られてい る [1][2]. 一方, 人間の脳機能をモデル化して考え出さ れたニューラルネットワーク (NN) は画像処理や信号処 理,パターン認識など,様々な分野への応用が期待さ れている. ところが,一般的な NN では入力に依存し てその構造が変化しないため,機能局在化していると は言えない. そこで我々は,入力に応じて NN の構造 を変えることにより機能局在化を実現する NN を提案 してきた [3][4]. その中の1つに,ファジー推論を用い たブランチ制御ネットワーク [5] がある. これはブラン チの結合度を入力に応じて変えることにより機能局在 化を図るもので,結合度の変化のためのメカニズムと してファジー推論ネットワークを用いている. しかし, このシステムはファジールールが設計者によって決定 され、さらにその一部のパラメータをランダムに設定 するものであり,機能局在性は設計者に一任される.

今回提案する手法,ブランチゲート付きニューラルネットワーク (NN-bg) では,学習によって最適なブランチ結合度を獲得するシステムを導入している.機能局在化を学習によって行うために,ファジー推論ではなく,より計算コストの低い,距離概念を基にしたブランチ制御システムを構成する.距離の概念というのは自己組織化マップ (SOM) などに代表されるように,情報の分類などに関して非常に基本的な概念であり,今回は,距離情報をネットワークを可変構造にするために使用している.本論文では,シミュレーションを通してブランチゲートの効果を汎化能力,計算コストの点

から検証し,その有効性を示している.

本論文の構成は以下のようになっている。第2章では提案手法,NN-bgの基本構造について,第3章ではシミュレーションとその結果,第4章では結論とこれからの研究課題を述べる。

# ブランチゲート付きニューラルネットワーク (NN-bg) の構造

図1にブランチゲート付きニューラルネットワーク (NN-bg) の構造を示す、NN-bg は基本ネットワークと ブランチ制御ネットワークの2つのネットワークから 構成される。基本ネットワークは一般的な3層階層型 NN であるが,中間層-出力層間ブランチにゲートが設けられ結合度が入力情報に応じて変化する点が従来のものと異なる。ブランチ制御ネットワークは基本ネットワークの結合度を計算する機構である。今回の提案手法では,結合度の計算は入力ベクトルとブランチ制御ネットワーク内のパラメータベクトルとの距離を基に行われる。

#### 2.1 基本ネットワーク

i 番目の入力を  $x_i (i \in I)$  , k 番目の出力を  $y_k (k \in K)$  とすると , 基本ネットワークの出力は以下のようになる.

$$y_k = \sum_{j \in J} w_{jk} f_j(\alpha_j) R_{jk} + \theta_k , \qquad (1)$$

$$f_j(\alpha_j) = z_j \frac{1 - exp(-\phi_j \alpha_j)}{1 + exp(-\phi_j \alpha_j)},$$
 (2)

$$\alpha_j = \sum_{i \in I} w_{ij} x_i + \theta_j \,, \tag{3}$$

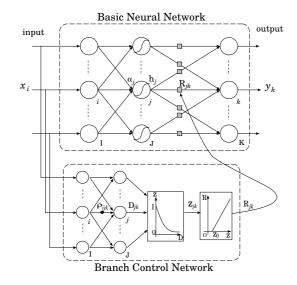


図 1 NN-bg の構成

ただし,

J:中間層のノードの添字の集合,  $j \in J$ ,

 $f_j(\alpha_j)$  : 中間層ノードjの出力,  $\alpha_j$  : 中間層ノードjへの入力,

 $R_{ik}$  : ブランチ j-k 間のブランチゲート係数,

 $w_{ij}, w_{jk}$ : ブランチの重みパラメータ,

 $heta_j, heta_k$  :中間層ノード及び出力層ノードの閾値パ

ラメータ,

 $z_i$ : シグモイド関数のゲインパラメータ,

 $\phi_j$ : シグモイド関数の勾配パラメータ,

である. ここで , ブランチゲート係数 ( ブランチ結合度 )  $R_{jk}$  によって各中間層から出力層のブランチは入力に応じて異なる結合度をとることになる.

#### 2.2 ブランチ制御ネットワーク

基本ネットワークのブランチ結合度  $R_{jk}$  はブランチ制御ネットワークで以下のように計算される.

$$D_{jk} = \sqrt{\sum_{i \in I} (x_i - \rho_{ijk})^2}, \qquad (4)$$

$$Z_{jk} = \exp(-\mu D_{jk}), \qquad (5)$$

$$R_{jk} = \frac{Z_{jk} - Z_0}{1 - Z_0} \,. \tag{6}$$

ブランチ制御ネットワークは,距離計算 ((4) 式),正規化 ((5) 式),切断調整 ((6) 式)の 3 つの機構から成る.距離計算の機構では,ブランチ制御ネットワークのパラメータ  $\rho_{ijk}$  と入力の距離  $D_{jk}$  が計算される.後続の機構により,距離  $D_{jk}$  が大きい場合は結合度は小さく,入力に対するニューロン j のニューロン k への影響は弱くなる.逆に  $D_{jk}$  が小さい程結合度は 1 に近くなる.また,パラメータ  $\rho_{ijk}$  は学習により調整されることになる.次の正規化機構で,距離  $D_{jk}$  は [0,1] の範囲に正規化され  $Z_{jk}$  として出力される.ここで,パラメータ

 $\mu>0$  は正規化のためのパラメータで,結合度の変化の度合いに影響する.  $\mu$  が大きいと結合度は急激に変化し,逆に小さいと緩やかな変化となる. 最後に切断調整機構でブランチの結合度  $R_{jk}$  が決まる. ここで,パラメータ  $Z_0<1$  はブランチ切断のための閾値を決定する定数で, $Z_{jk}$  が  $Z_0$  以下になるとそのブランチは切断されることになる.

#### 2.3 NN-bg の学習

前述のとおり,NN-bg の学習パラメータは,基本ネットワークの重みパラメータ  $w_{ij},w_{jk}$  と閾値パラメータ  $\theta_j,\theta_k$ ,さらにブランチ制御ネットワークの距離計算パラメータ  $\rho_{ijk}$  である。両ネットワークの学習は交互に行い,最後に基本ネットワークの学習を行う。以下に簡単な NN-bg の学習手順を示す.

Step 1: 定数パラメータを適切な値に設定する

Step 2: 学習パラメータをランダム値に初期化する

Step 3: 基本ネットワークを  $S_{bn}$  回学習する

Step~4: ブランチ制御ネットワークを  $S_{bc}$  回学習する

Step 5: Step 3, 4 を  $S_{loop}$  回繰り返す

Step 6: 学習パラメータを  $S_{bn}$  回学習する

ここで, $S_{bn}$ , $S_{bc}$  はそれぞれ基本ネットワーク,プランチ制御ネットワークの学習回数を表し, $S_{loop}$  は両ネットワークの学習の繰り返し回数を表す.経験的に  $S_{bc}$  は $S_{bn}$  に比べ少ない回数で十分であることが分かっており,ブランチ制御ネットワークの学習は微調整程度行うことになる.

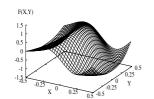
#### 3. シミュレーション

本論文では,ブランチゲートの効果を調べるために 以下の3つの観点から NN-bg の性能を評価した.

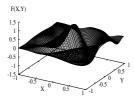
- 1) ブランチ制御ネットワークの定数  $\mu$  と  $Z_0$  を変えたときの汎化誤差への影響 ,
- 2) 中間ノード数を変えたときの汎化誤差への影響,
- 3) 学習にかかった CPU 時間.

NN-bg の学習方法は基本ネットワークには一般的な BP 法,ブランチ制御ネットワークにはランダム探索法の一種である RasID (Random Search with Intensification and Diversification)[6] を用いた。ここでブランチ制御ネットワークに BP 法を用いないのは,ブランチ制御ネットワークの微分計算処理がやや複雑であるため,学習に要する計算コストを削減するためである。また,評価関数は平均 2 乗和誤差 (MSE) を用い,過学習を避けるための正則化項として各ブランチの重みの 2 乗和を加えている [7]。このときの正則化係数は  $10^{-6}$  とした。

基本ネットワークの学習パラメータの初期値は [-1,1] のランダム値 , ブランチ制御ネットワークでは入力空間領域と同じ範囲のランダム値を初期値としている. また , 学習回数は  $N_{bn}=10000,\,N_{bc}=1000,\,S_{loop}=3$  とし , 計 43000 回の学習とした.



学習データ 169(13×13) 点 テストデータ 1156(34×34) 点

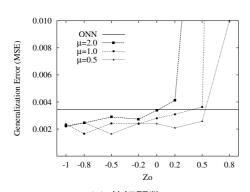


676(26×26) 点 4489(67×67) 点

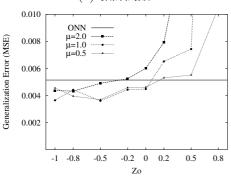
#### (a) 教師関数 1

#### (b) 教師関数 2

図 2 教師関数



(a) 教師関数 1



(b) 教師関数 2

図 3  $\mu$  と  $Z_0$  の変化による汎化誤差の比較

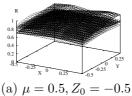
#### $3.1 \mu, Z_0$ の影響

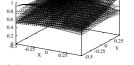
本節では,関数近似問題を用いてブランチ制御ネットワークの定数  $\mu, Z_0$  を変化させて NN- $\log$  の性能を評価する. 近似する関数は,以下のものを用いた.

$$f(X,Y) = \exp\left(-\frac{X^2 + Y^2}{2}\right) \cos\left(2\pi(X + Y^2)\right) \exp(X). \tag{7}$$

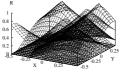
上式において ,  $-0.5 \le X,Y \le 0.5$  で定義される関数を教師関数  $1(\boxtimes 2(\mathtt{a}))$  ,  $-1.0 \le X,Y \le 1.0$  で定義される関数を教師関数  $2(\boxtimes 2(\mathtt{b}))$  とした. 学習データ , テストデータは図中の通りである.

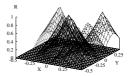
図 3 はブランチ制御パラメータ  $\mu$  と  $Z_0$  の値を変化させたときの汎化誤差を示している. 但し,中間層ノー





)  $\mu = 0.5, Z_0 = -0.5$  (b)  $\mu = 1.0, Z_0 = -0.5$ 





(c)  $\mu = 1.0, Z_0 = 0.5$ 

(d)  $\mu = 2.0, Z_0 = 0.5$ 

図 4 ブランチ結合度 R の値 (教師関数 1)

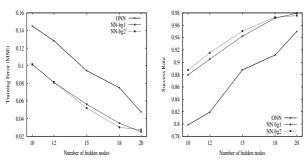
ド数は,教師関数 1 では 6 個,教師関数 2 では 12 個とした.結果は学習パラメータの初期値を,教師関数 1 は 20 回,教師関数 2 は 10 回変化させた場合の平均値で示している.また,図中の  $ONN(Ordinary\ Neural\ Network)$  はブランチゲートなしの,従来の 3 層 NN の結果を表している.図 3 から, $\mu$ , $Z_0$  ともに小さいとき,つまりブランチ結合度が比較的緩やかに変化するときに従来のブランチゲートのない NN よりも良い汎化能力を有することが分かる.図 4 に教師関数 1 についてそれぞれのブランチの結合度  $R_{jk}$  の分布の様子を示す.この場合中間層ノード数は 6 個なので,6 枚の平面が表示されている.(a),(b) は ONN よりも良い結果のもの,(c),(d) は悪かったものを示している.

#### 3.2 中間層ノード数の影響

前節で,結合度の変化が緩やかな場合に,従来の NN と比べて良い汎化能力が得られることを明らかにしたが,本節では緩やかな結合度の変化をもつブランチゲートを用いて,2 重スパイラル問題の検討を行った.ブランチ制御ネットワークの定数は, $\mu=1.0, Z_0=-0.5$  と設定したものを NN-bg1, $\mu=0.5, Z_0=-0.5$  と設定したものを NN-bg2 としてシミュレーションを行った.

識別する点列は2種類の螺旋状に分布した点列で,それぞれ91点ずつである。また,学習を効率よくするために出力層ノードには[0,1]の範囲のシグモイド関数を用いている。

図 5(a) は学習誤差を,(b) は識別成功率をそれぞれ表している. 横軸は中間層ノード数であり,結果は学習パラメータの初期値を変えた 15 回の平均値を表している. スパイラル問題の場合もブランチゲートの効果は明らかであることが分かる. しかし,中間層ノード数が増えると従来の NN でも識別能力が向上してくるため, NN-bg との差は小さくなる傾向にある. 図 5 に中間層ノード数 18 個の場合の学習後の識別結果の 1 例を



(a) 学習誤差 (MSE)

(b) 識別成功率

図 5 スパイラル問題の学習誤差と識別成功率

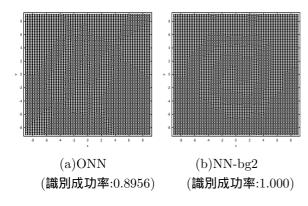


図 6 2 重スパイラル問題の結果

示す. NN- $\log$  の方が高い識別成功率を得たためその汎化能力は従来の NN よりも優れている.

また,関数近似問題における中間ノード数を変化させた場合の汎化誤差の比較を紙面の制約上割愛したが,上述の2重スパイラル問題と同様の結果が得られていることを追記しておく.

#### 3.3 計算時間の比較

表 1 に関数近似問題,2 重スパイラル問題のそれぞれについて学習にかかった CPU 時間を示す.数値は 3.1,3.2 節で行った回数の平均値であり,関数近似問題の場合は中間層ノード数が 6 個及び 12 個であり,2 重スパイラル問題の場合は 18 個の場合を表示している.但し,NN-bg,ONN 共に同じシミュレーション環境で行った場合の結果である.表から分かるように,ブランチゲート付き NN は約 1.3 倍の計算時間を要することが分かるが,3.1,3.2 節の結果より,計算時間に見合う汎化能力が得られていると考えられる.

#### 4. 結論

本論文では,ブランチゲート付きニューラルネットワーク (NN-bg) と題し,入力情報応じてブランチの結合度を変化させ機能局在化を図るという概念の基,ブランチ結合度を計算するためのシステムとして距離計算を基にしたブランチ制御ネットワークを提案した.さ

表 1 学習に要する CPU 時間の比較

問題 (中間ノード数)	ONN [sec]	NN-bg [sec]	倍率
教師関数 1 (6)	35.8	48.9	1.37
教師関数 2 (12)	386.7	506.9	1.31
2 重スパイラル (18)	170.5	223.2	1.31

らに学習により結合度を調整するアルゴリズムを提案 した.

シミュレーションを通して,学習にはやや計算時間がかかるものの,緩やかな結合度の変化の場合に従来のブランチゲートなしの NN よりも汎化能力が優れていることを示した.

しかし,計算コストが若干大きいという問題も挙げられる. さらに,各ニューロンのノード関数を変えて,プランチゲートを導入することでより優れた性能のNNが構築できるのではないかと考えており,上記の問題も含めて今後の課題とする.

#### 参考文献

- M. Gazzaniga, "Organization of the human brain", Science, 245, pp.497-952, 1989.
- [2] T. Sawaguchi: Brain structure of intelligence and evolution, Tokyo: Kaimeisha, 1989.
- [3] K. Hirasawa, M. Obayashi, S. Sakai and J. Hu, "Learning Petri Network and Its Application to Nonlinear System Control", IEEE Trans, Systems, Man and Cybernetics, Prat B: Cybernetics, Vol.28, No.6, pp.781-789, 1998.
- [4] J. Hu, K. Hirasawa and Q. Xiong, "Overlapped Multi-Neural-Network and Its Training Algorithm", Trans. of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol.121-C, No.12, pp.1949-1956, 2001.
- [5] Q. Xiong, K. Hirasawa, J. Hu and J. Murata, "A functions localized neural network with branch gates", Neural Networks, Vol.16, pp.1461-1481, 2003.
- [6] J. Hu, K. Hirasawa and J. Murata, "RasID-Random Search for Neural Networks Training", Journal of Advanced Computational Intelligence, Vol.2, No.4, pp.134-141, 1998.
- [7] G. E. Hinton: Connectionist Learning Procedure, Machine Learning, ed. J. Carbonell, The MIT Press, 1990.

#### 連絡先:

平澤宏太郎

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

福岡県北九州市若松区ひびきの 2-7

Phone+Fax: 093-692-5261 E-mail: hirasawa@waseda.jp

# 逐次入力を用いた忘却型ファジィ・ニューラルネットワーク によるファジィルールの学習の改良

― ルールの生成時期による学習率と忘却率の調整 ―

Incremental Learning of Fuzzy Rules by Fuzzy Neural Network with Forgetting Facility

-Adjustment of the learning and forgetting rates by the generation time of rules

馬野 元秀 細谷 優 宇野 裕之 瀬田 和久 岡田 真 Motohide Umano Yuu Hosova Yushi Uno Kazuhisa Seta Makoto Okada

### 大阪府立大学 総合科学部 数理·情報科学科

Department of Mathematics and Information Sciences College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

**Abstract** Given data one by one, we proposed a method to extract fuzzy rules using a fuzzy neural network without any prior information and initial fuzzy rules, where old rules are forgotten more than new ones. We, therefore, propose a method to adjust the learning and forgetting rates by the generation time of a rule. We apply the method to the Stefan Aeberhard's wine data and compare the results.

#### 1. はじめに

以前にファジィ・ニューラルネットワークを用いて、初期ルールなしの状態から逐次的にデータを読み、必要に応じてメンバーシップ関数とルールを追加し、忘却型学習によりルールとメンバーシップ関数のチューニングとプルーニングを行なう方法について発表した[1]. この手法ではネットワーク全体に忘却学習を行なうので、結果的に古いルールの方が忘却学習が多く行なわれることになり、新しいルールよりも忘却されやすくなってしまう. これにより、古いデータに対する対応力を乏しくしてしまう. そこで、ルールの生成時期を元にして学習率と忘却率の調整を行ない、古いルールを忘れにくくした場合のシミュレーションを行ない、従来の方法と比較した.

# 2. 忘却型学習による

ファジィ・ニューラルネットワーク

## 2.1 ファジィ・ニューラルネットワーク

本研究で用いるファジィ・ニューラルネットワークは図1のような構造であり、各層における入力から出力を計算する方法は次のようになる.

### (1) 第 0 層 (入力層)

入力を分配するのみで計算は行なわない.

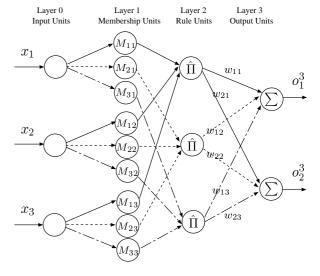


図 1: ファジィ・ニューラルネットワーク

#### (2) 第1層(メンバーシップ層)

入力に対するメンバーシップ関数の値 (各条件との一致度) を次の式で計算し出力する.

$$O_{ji}^{1} = \exp\left\{-\left(\frac{x_i - a_{ji}}{b_{ji}}\right)^2\right\} \tag{1}$$

ここで,  $x_i$  は i 番目の入力変数で,  $a_{ji}$  と  $b_{ji}$  は j 番目のルールの i 番目の入力変数に対するメンバー

シップ関数のそれぞれ中心値と幅を表わすパラメー タである.

# (3) 第 2 層 (ルール層)

入力の積 (条件部全体の一致度) を正規化したものを次の式で計算し出力する.

$$O_j^2 = \frac{\prod_i O_{ji}^1}{\sum_k (\prod_i O_{ki}^1)}$$
 (2)

各ユニットが1つのファジィルールに対応している.

# (4) 第 3 層 (出力層)

入力にリンクの重み (結論部の実数値) を掛けた 和 (推論結果) を次の式で計算し出力する.

$$O_k^3 = \sum_j w_{kj} O_j^2 \tag{3}$$

ここで,  $w_{kj}$  は第 2 層の j 番目のユニットから第 3 層の k 番目のユニットへのリンクの重みである.

# 2.2 ルールとメンバーシップ関数のチューニング とプルーニング

ルールとメンバーシップ関数のチューニングと プルーニングには文献 [2] の忘却型学習を用いる.

#### (1) ルールのチューニングとプルーニング

ネットワークの第 2 層から第 3 層へのリンクの重み (ルールの後件部) は、第 2 層からの出力をリンクの値で重み付けし、その総和をとっている。そのため、2-3 層間の重みが 0 になればそのユニットからの影響は受けなくなる。したがって、リンクの重みを 0 に近づけるような付加項を評価関数に加えて学習を行ない、すべての 2-3 層間の重みがしきい値以下になった第 2 層のユニットを削除することにより、ルールのプルーニングが可能になる。2-3 層間のリンクの重み  $w_{kj}$  に対する、この方法による更新量  $\Delta w_{kj}$  は、通常の BP 法の更新量を  $\Delta w_{kj}$  としたとき、

$$\Delta w'_{ki} = \Delta w_{ki} - \varepsilon \operatorname{sgn}(w_{ki}) \tag{4}$$

となる. ここで,  $\operatorname{sgn}(x)$  はx が正のとき +1 で0 のとき 0 で負のときに -1 となる関数である. これにより, 重みの更新時には $\varepsilon$  だけ余分に0 に近づくので, あまり更新されない $w_{kj}$  は徐々に0 に近づいていく. このことから $\varepsilon$  は忘却量と呼ばれる.

# (2) メンバーシップ関数のチューニングとプルーニ ング

ルールユニットでは,入ってきた信号に対し積演 算を行なっている.そのため第1層(メンバーシッ プ層) からの入力が 1 になれば、そのユニットからの影響は受けなくなる。そのため、メンバーシップ関数の学習は常に 1 が出力されるように、幅を広げるような付加項を通常の更新量に付け加え、十分に幅の広がったメンバーシップ関数を削除すればよい。ここでは、通常の BP 法で更新した後、その値を定数倍する。したがって、幅  $b_{ji}$  の更新量  $\Delta b'_{ji}$  は、通常の BP 法の更新量を  $\Delta b_{ji}$  としたとき、

$$\Delta b'_{ii} = \phi(b_{ii} + \Delta b_{ii}) \tag{5}$$

となる. ここで、 $\phi$  は忘却率と呼ばれる.

# 3. 逐次入力を用いた忘却型ファジィ・ニュー ラルネットワーク

本研究では、データを逐次的に読みながら学習を行なう。すなわち、データを 1 個読み、現在のファジィ・ニューラルネットワークで推論し、結果が間違っていればメンバーシップ関数とルールを追加する。そして、最近入力されたデータ n 個で L 回ずつ学習を行なう。その際、忘却型学習によりネットワークのチューニングと不要なルールとメンバーシップ関数のプルーニングを行なう。さらに、あるルールのメンバーシップ関数のプルーニングを行なった結果、他のルールと一致する場合には、そのルールも削除する。

### (1) ルールの追加

推論結果が間違ったときには、現在読み込んだデータをカバーできるルールがないと考え、ルールの追加を行なう。すなわち、メンバーシップユニット(前件部)と、ルールユニットと出力層のユニット間のリンク(後件部)を追加し、重みを与える。この重みは、入力データに対する教師データを用いる。すなわち、教師データが 0 (不正解)となっている出力層のユニットへのリンクの重みは 0~0.4の値、1 (正解)となっている出力層のユニットへのリンクの重みは 0.6~1 の間の値をそれぞれランダムに与える。

### (2) メンバーシップ関数の追加

メンバーシップ関数については、現在読み込んだデータをカバーできるものがあればそれを使う。すなわち、そのデータに対するメンバーシップ値がしきい値  $\theta_{\mu}$  より大きい場合、そのメンバーシップユニットをルールユニットに結合する。カバーできるメンバーシップ関数が複数あるときには、一番大きいメンバーシップ値を示すものを使う。この

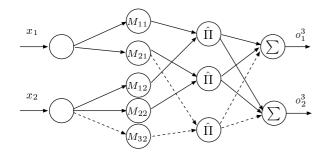


図 2: ルールの追加

場合は、他のルールとメンバーシップ関数を共有することになる.

カバーできるものがなければ、新たにメンバーシップユニットを追加する。追加されるメンバーシップユニットは、中心がその属性の入力データの値で幅が一定値bである。

図 2 において点線の矢印のリンクを結んだものが追加されたルールの例である。入力データの第 1 変数に対しては,メンバーシップ関数  $M_{21}$  のメンバーシップ値が  $M_{11}$  のものより大きく,さらに,しきい値  $\theta_{\mu}$  よりも大きいためにメンバーシップ関数  $M_{21}$  は共有される。第 2 変数に対しては,メンバーシップ値がしきい値よりも大きいものがなかったために,メンバーシップ関数  $M_{32}$  を追加している。

# 4. ルールの生成時期による学習率と忘却率の調整

以前の手法では学習率, 忘却量, 忘却率が常に一定であったため, ネットワーク全体に忘却学習を行なうので, 結果的に始めの方にできた古いルールの方が忘却学習が多く行なわれてしまっていた. そのため, 必要であるルールまで削除される可能性があった. 今回はルールの生成時期を元にして, 学習率, 忘却量, 忘却率の調整を行ない, 古いルールを忘却しにくくすることを考えた.

#### 4.1 学習率の調整

学習率の係数には、メンバーシップ関数の中心値、幅に関する学習係数、結論部実数値に関する学習係数がある。そこで今回は次のような値をそれぞれに掛けることにより、学習係数を徐々に減少させていく。

$$\frac{t_r \times \beta}{t} \tag{6}$$

ここで,  $t_r$  はルールの生成時期 (いくつ目のデータで生成されたか), t は現在の時刻 (現在のデータがいくつ目か),  $\beta$  はパラメータである.

#### 4.2 忘却率の調整

結論部における忘却量  $\varepsilon$  (式 (4)) とメンバーシップ関数の幅に関する忘却率  $\phi$  (式 (5)) に対して次のような関数を使い調整する (図 3).

$$\exp\left\{-\frac{(t-t_r)^2}{2\sigma^2}\right\} \tag{7}$$

ここで,  $t_r$  はルールの生成時期, t は現在の時刻,  $\sigma$  はパラメータである。これによりルールができた頃は比較的多く忘却し, それ以降は徐々に忘却するようになる。

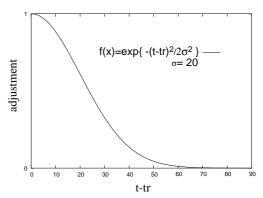


図 3: 忘却率の調整量

### 5. ワインデータによるシミュレーション

本提案法により、ワインデータの分類問題 [3] を用いてシミュレーションを行なった。データは 3種類のワインの 13種類の属性を計測したものである。各クラスは、Australia が 59個、Californiaが 71個、Chile が 48個で、合計 178個のデータがある。このデータに対して、次のような 2-fold cross-validation 法を用いて数値実験を行なった。

- 1. 178 個のデータからランダムに 89 個選び, 一方 を学習用データに, もう一方を評価用データに する.
- 2. 学習用データを 1 個読むごとに、最近入力されたn個でL回学習し、評価用データ 89 個でチェックを行なう。これをすべての学習用データについて行なう。
- 3. 学習用データと評価用データを入れ換え, 2 の 手順と同じ操作を行ない, 学習データ数ごとの 正解率の平均をとる.

, ,								
	正解率 (%)			ルール数				
学習個数	平均	最小	最大	標準偏差	平均	最小	最大	標準偏差
30	73.15	69.10	78.09	3.38	16.50	14	21	2.47
60	88.65	84.27	92.70	3.32	17.90	16	21	1.93
89	92.58	91.01	93.26	0.83	16.80	15	20	1.83
89(改良前 1)	75.06	66.85	86.52	6.58	9.90	6	14	2.75
89(改良前 2)	72.70	69.66	79.21	3.38	18.10	16	21	1.85

表 1: 30,60,89個目の入力データに対する学習を終えた時点での正解率とルール数

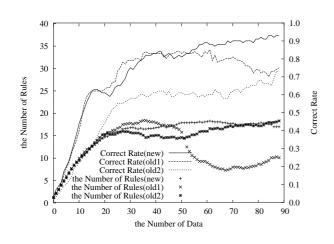


図 4: ルール数と正解率の推移

上記の試行を 1 回と考え、この試行を 5 回行なった。このときの正解率とルール数を表 1 と図 4 に示す。学習の条件は、忘却学習に用いるデータの数 n=20、メンバーシップ関数の追加に関するしきい値  $\theta_{\mu}=0.90$ 、幅 b=1、 $\Delta w_{kj}$  における結論部実数値の学習係数 0.2、メンバーシップ関数の中心値の学習係数 0.4、 $\Delta b_{ji}$  におけるメンバーシップ関数の中心値の学習係数 0.4、結論部の忘却量  $\varepsilon=0.0001$ 、削除のしきい値 0.00001、メンバーシップ関数の忘却率  $\phi=1.00003$ 、削除のしきい値 0.99999、学習率の調整率に関して  $\beta=0.95$ 、忘却率の調整率に関して  $\sigma=20$ 、学習回数 L=500 で行なった。なお、改良前 1(old1) は従来の方法で上と同じパラメータで、改良前 2(old2) はメンバーシップ関数の忘却率だけを  $\phi=1.000006$  にして行なった。

図4から改良前1の方法では50個学習したあたりでルール数が急激に減少してしまっている。これは始めの方にできたルールの忘却量が蓄積し一気に削除されたためと考えられる。忘却率を下げると改良前2のようにルールは残るが、改良後のようにうまく学習できていないようである。

これに対して、改良後のルール数は忘却率を調整しているため、初期の(古い)ルールを残したまま

学習が行なえている. さらに学習率の調整により, 正解率も収束の傾向が伺える.

結局,この方法はボルツマンマシンのような焼きなまし法[4]をルールによって生成時期が異なる場合に適用した形になっており,うまく学習が進んでいるようである。ただし,忘却率の調整にこの方法が適しているかどうかについては,さらに検討が必要である。

#### 6. おわりに

この論文では、逐次入力による忘却型ファジィ・ニューラルネットワークの学習法をルールの生成時期を元にして学習率と忘却率を調整することにより改良を行なった。今後の課題としては、データに確信度を与えることや、ルールを忘却するだけでなく統合するといった方法についても考えていきたい。

# 参考文献

- [1] 馬野 元秀, 細谷 優, 宇野 裕之, 瀬田 和久, 岡田 真: 逐次入力を用いた忘却型ファジィ・ニューラルネット ワークによるファジィルールの学習, 第 19 回 ファ ジィシステムシンポジウム, pp.665-668, 2003.
- [2] 馬野 元秀, 福中 寿朗, 鳩野 逸生, 田村 坦之:忘却 の概念を用いた ファジィ・ニューラルネットワーク によるファジィルールの抽出, 計測自動制御学会論 文集, Vol.32, No.3, pp.409-416, 1996.
- [3] ftp://ftp.ics.uci.edu/pub/machine-learning-databases/wine/wine.names
- [4] D.H.Ackley, G.E.Hinton and T.J. Sejnowski: A learning algorithm for Boltzmann machines, *Cognitive Science*, Vol.9, pp.147-169, 1985.

#### [問い合わせ先]

= 599-8531 堺市学園町 1-1 大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科 馬野 元秀

TEL: 072-254-9675 FAX: 072-254-9930

Internet: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

# 自己組織化機能局在型ニューラルネットワーク

## **Self-Organized Function Localization Neural Network**

笹川 隆史 古月 敬之 平澤 宏太郎
Takafumi Sasakawa, Jinglu Hu and Kotaro Hirasawa
早稲田大学

Waseda University

**Abstract:** This paper presents a self-organized function localization neural network (FLNN) inspired by Hebb's cell assembly theory about how the brain worked. The proposed self-organized FLNN consists of two parts: main part and control part. The main part is an ordinary 3-layered feedforward neural network, but each hidden neuron contains a signal from the control part, controlling its firing strength. The control part consists of a SOM network whose outputs are associated with the hidden neurons of the main part. Trained with an unsupervised learning, SOM control part extracts structural features of input spaces and controls the firing strength of hidden neurons in the main part. Such self-organized FLNN realizes capabilities of function localization and learning.

## 1 はじめに

脳の基本的な働きについての2つの理論がヘブによって提案されている[1].1つは Hebbian learning,もう1つは cell assembly として知られている理論である。図1に cell assembly の概念図を示す.脳内のニューロンは Hebbian learningによって様々な回路を形成する.形成された回路はそれぞれが独立しているのではなく,複数の回路に重複したニューロンも存在する.そして,脳は受け取る情報に応じて特定のニューロン群のみを活動させる[2].つまり,各ニューロンは構造的というよりも機能的に結合しており,入力情報に応じて適切に結合を変えている.以上のことから,脳は機能局在型オーバーラップマルチモジュラーネットワークとみなすことができる.

一方,小脳と大脳皮質はそれぞれ教師あり学習と教師なし学習のような振る舞いをすることが報告されている[3].この先験知識を参考にし,brain-like モデルを2つの部分で構成する.1つは小脳のように教師あり学習を行う部分,もう1つは大脳皮質のように教師なし学習を行う部分である.前者は学習能力を,後者は機能局在化能力を実現する役割を担っている.

筆者等は brain-like モデルである overlapped multiple neural networks (OMNN) を提案している [4][5].OMNN はメイン部と分割部で構成される.メイン部は通常の階層型ニューラルネットワークと同じ構造であるが,オーバーラップしたユニットを持つ複数のサブネットに分けられており,入力に応じて使用するサブネットは異なる.分割部は競合ネットワークであり,入力空間を任意の数に分割する.分割された入力空間はそれぞれメイン部のサブネットと関連付けられている.OMNN は通常のニューラルネットワークより優れた性能を持

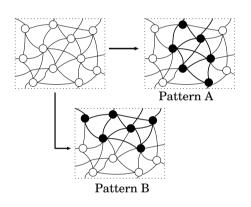


図 1: cell assembly の概念図

つことがわかっている.従って,機能局在化はネット ワーク内の個々のニューロンの使用効率を向上する.

本研究では,[4],[5]で得られた結果を拡張し,新しい brain-like モデルである自己組織化機能局在型ニューラ ルネットワーク (FLNN) を提案する. 自己組織化 FLNN はメイン部と制御部で構成される.メイン部は教師あ り学習によって入出力関係をマッピングし,制御部は 教師なし学習によって入力空間の構造をマッピングす る.メイン部の構造は通常の3層階層型ニューラルネッ トワークと同じであるが、中間層の各ニューロンの発 火強度が制御部からの信号によって制御される.制御 部は自己組織化マップ (SOM) ネットワーク [6] であり, その出力層の各ニューロンはメイン部の中間層ニュー ロンと1対1で関連付けられている.制御部の出力は 入力パターンに応じたメイン部の中間層ニューロンの 発火強度を制御する信号である.このようにして入出 力空間の構造的特徴をネットワーク構造に反映させる ことで,自己組織化 FLNN は学習だけでなく機能局在 化の能力も実現する.

#### 2 自己組織化 FLNN

自己組織化 FLNN は学習能力と機能局在能力を持つ.また,図2に示すように,メイン部と制御部の2つの部分で構成される.メイン部は学習能力を実現し,制御部は機能局在能力を実現するために入力空間の特徴を抽出してメイン部を制御する.

#### 2.1 メイン部

自己組織化 FLNN のメイン部は入出力関係をマッピングするための学習能力を実現する、構造は通常の3層階層型ニューラルネットワークと同じであるが、中間層の各ニューロンの発火強度は制御部からの信号によって制御される、

FLNN の入力ベクトルを  $\mathbf{x}\in\mathcal{R}^n$  , 出力ベクトルを  $\mathbf{y}\in\mathcal{R}^m$  とする.ただし, $\mathbf{x}=[x_1,\cdots,x_n]^T$ , $\mathbf{y}=[y_1,\cdots,y_m]^T$  である.このとき,FLNN の入出力関係 は以下の式で定義される.

$$y_k = f_o \left( \sum_{j=1}^l w_{kj}^{(2)} O_j + \theta_k^{(2)} \right)$$
 (1)

$$O_j = \zeta_j \cdot f_h \left( \sum_{i=1}^n w_{ji}^{(1)} x_i + \theta_j^{(1)} \right)$$
 (2)

ここで, $f_o(\cdot)$  と  $f_h(\cdot)$  は出力層と中間層のノード関数, $w_{ji}^{(1)}$  と  $w_{kj}^{(2)}$  は入力層と出力層の各重み, $\theta_j^{(1)}$  と  $\theta_k^{(2)}$  は中間層ノードと出力層ノードの各バイアス, $O_j$  は中間層ノードの各出力,l は中間層ノードの数, $0 \le \zeta_j \le 1$  は j 番目の中間層ノードの発火強度を制御する信号である.式 (2) において  $\zeta_j = 1$   $(j=1,\cdots,l)$  の場合,FLNNのメイン部は通常の階層型ニューラルネットワークと同等になる.ベクトル  $\zeta = [\zeta_1,\zeta_2,\ldots,\zeta_l]^T \in \mathcal{R}^l$  は制御部の出力ベクトルである.

#### 2.2 制御部

制御部は SOM ネットワークで構成され,入力空間の特徴抽出と,メイン部の中間層ニューロンの発火強度の制御を行う.SOM ネットワークは入力層と出力層の2層で構成される.入力はメイン部と同じである.制御部の出力層ニューロンの数はメイン部の中間層ニューロンの数と同じである.入力ベクトルは参照ベクトル $\mathbf{m}_j = [\mu_{j1}, \mu_{j2}, \dots, \mu_{jn}](j=1,\dots,l)$ を介してすべての出力層ニューロンと結合している.ここで,l はメイン部の中間層ニューロン数を表す.

出力層ニューロンは隣り合うニューロン同士が図3のように近傍関係を築いている.これらのユニットを訓練によって入力空間内に配置することで,入力空間の構造的特徴を抽出する.

 ${
m SOM}$  ネットワークは重み  ${f m}_c$  を持つ最整合ノード c を決定する .  ${f m}_c$  は与えられた入力ベクトル  ${f x}$  に最も

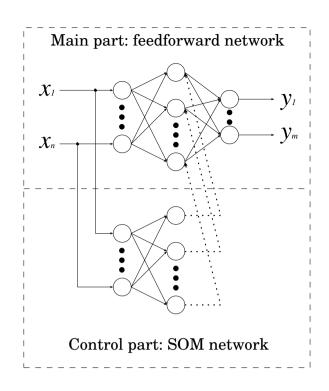


図 2: 自己組織化 FLNN の構造

類似している参照ベクトルであり,以下の条件で選ばれる.

$$\|\mathbf{x} - \mathbf{m}_c\| = \min\{\|\mathbf{x} - \mathbf{m}_i\|\}. \tag{3}$$

最整合ノード c を決定後, SOM ネットワークの出力は 最整合ノード c を中心としたガウス関数によって計算 される.

$$\zeta_j = \exp\left(-\frac{2\sigma^2}{(l-1)^2}|r_j - r_c|^2\right)$$
 (4)

ここで  $0<\zeta_j\le 1$  は j 番目のノードの出力, $\sigma\ge 0$  は ガウス関数の形状を決めるパラメータ, $r_j$ , $r_c$  は出力 ユニットの配列内におけるノード j とノード c の位置である.つまり,ノード j が最整合ノード c のときに出力は 1 になり,ノード j がノード c と離れるほど出力はガウス関数に沿って減少する.

制御部の出力層ニューロンはメイン部の中間層ニューロンと 1 対 1 で対応しており,SOM の各出力を対応しているメイン部の中間層ニューロンに乗じることで,その発火強度が制御される. $\sigma=0$  のときに制御部の出力はすべて 1 になるため,自己組織化 FLNN は通常の階層型ニューラルネットワークと同等になる.このようにして,自己組織化 FLNN は中間層ニューロンと特定の入出力パターンを関連付けし,機能局在能力を実現する.ただし, $\sigma$  の最適値の決定法については,さらなる研究が必要である.

#### 2.3 自己組織化 FLNN の訓練

自己組織化 FLNN の訓練は 2 段階に分けて行われる. 第1段階は制御部を教師なし学習によって訓練する.第

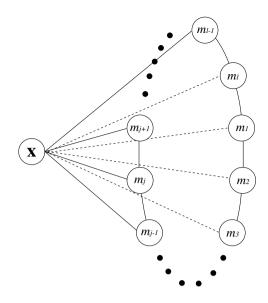


図 3: 制御部の出力ユニットのつながり

2 段階は訓練後の制御部を用いてメイン部を教師あり 学習によって訓練する.本研究では,第1段階に一般 的な SOM の訓練アルゴリズム,第2段階に高速バッ クプロパゲーション (BP) アルゴリズムを用いる.これ らのアルゴリズムは, Matlab Neural network toolbox[8] により提供されるものを自己組織化 FLNN に適用する ために修正して用いている.

#### 3 シミュレーション

自己組織化 FLNN の表現能力を two nested spirals 問題によって検証する.この問題はニューラルネットワークの性能を検証する問題として広く用いられている[7].この問題の目的は FLNN によって 2 つの入れ子状の螺旋を識別することである.訓練データは各螺旋ごとに76点ずつの計 152点から成る.

自己組織化 FLNN を  $\mathcal{N}_{n-l-m}^{\sigma}$  と表す.ここで n , l , m はメイン部の入力層,中間層,出力層のノード数,  $\sigma$  は制御部の出力であるガウス関数の形状を調整する パラメータである. $\sigma=0$  のときは制御部の出力がすべて 1 になるので,自己組織化 FLNN は通常の階層型 ニューラルネットワークと同等になる.ここでは n=2 , m=1 , l=10 のネットワークを用いてシミュレーションを実行する.

#### 3.1 自己組織化 FLNN の表現能力

図 4 に示すように ,  $\sigma$  の値はガウス関数の形状を決める .  $\sigma=0$  のときは自己組織化 FLNN は通常の階層型ニューラルネットワークと同等である .

初めに SOM ネットワークを訓練する. SOM ネットワークは 10 個の出力ユニットを持ち,訓練後のユニット間の幾何学的関係は図 5 のようになる. 図中の "∘"と "+" は 2 つの螺旋を表し, "•"は SOM ネットワー

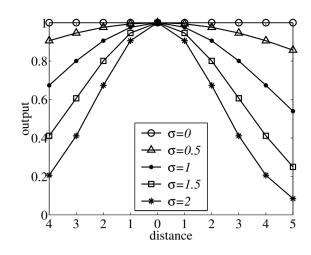


図 4: σ によるガウス関数の形状の違い

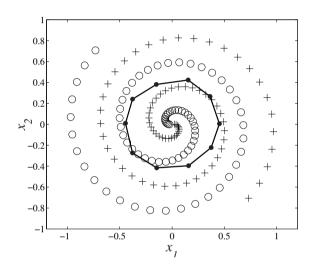


図 5: Two nested spirals 問題と SOM の出力ユニットの配置

クの出力ユニットを表す.実線は出力ユニットのつながりを表している.次にメイン部を訓練する.訓練は  $\sigma=0,\ 0.5,\ 1,\ 1.5,\ 2$  の各値に対して行う.

BP アルゴリズムは非常にローカルミニマムに陥り易いので,同じシミュレーションを異なる初期値を用いて 160 回実行した.図 6 は誤差の二乗和 (SSE) が最小の結果から 3 点を選び,その SSE の平均をとったものを示している.図から  $\sigma=1$  のときが最も良い結果であることがわかる.従って, $\sigma$  の値を適切に調整することで自己組織化 FLNN は通常のニューラルネットワーク  $(\sigma=0)$  より優れた表現能力を持つ.

#### 3.2 検討・考察

#### 3.2.1 ローカルミニマム問題

図 7 に  $\sigma=1$  の全結果のヒストグラムを示す.図から BP アルゴリズムは非常に高い確率でローカルミニマムに陥ることがわかる.つまり, $\sigma=1$  の自己組織

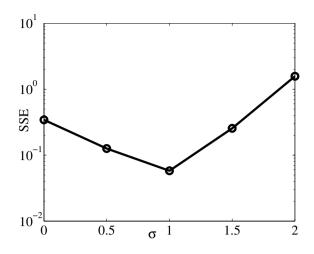


図 6: 自己組織化 FLNN の  $\sigma$  による性能の違い

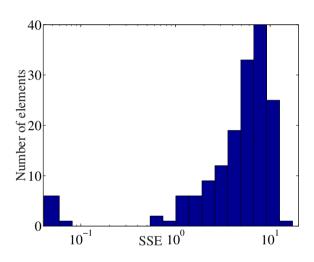


図 7:  $\sigma = 1$  の結果のヒストグラム

化 FLNN が良い表現能力を持っていても, BP アルゴリズムを用いて良い結果が得られるという保証はない. 従って,ロバストな訓練アルゴリズムの開発が今後の研究にとって非常に重要である.

# 3.2.2 汎化能力

シミュレーションでは,適切に $\sigma$ を選ぶことによって自己組織化 FLNN が良い表現能力を持つことを確認したが,汎化能力についての議論はされていない.今後は汎化能力の向上についても研究を進める.

#### 4 まとめ

本研究では,へブの cell assembly 理論による脳の働き方を参考にした新たな brain-like モデルである自己組織化 FLNN を提案した.小脳と大脳皮質のように,自己組織化 FLNN は教師あり学習を行うメイン部と教師なし学習を行う SOM による制御部の2つの部分で構成される.通常のニューラルネットワークとの違いは,自己組織化 FLNN が学習能力だけでなく機能局在能力も持っていることである.シミュレーションにより,自

己組織化 FLNN が通常のニューラルネットワークより 良い表現能力を持つことを示した.従って,ニューラ ルネットワークの機能局在化は個々のニューロンの効 率を改善する.

しかし,自己組織化 FLNN に一般的な BP アルゴリズムを適用すると非常に高い確率でローカルミニマムに陥るということもわかった.今後の研究においてロバストな訓練アルゴリズムを開発することが非常に重要である.

# 参考文献

- [1] D.O. Hebb, *The Organization of Behavior A Neu-ropsychological Theory*, John Wiley & Son, New York, 1949.
- [2] 澤口 俊之,知性の脳構造と進化,海鳴社,1989.
- [3] K.Doya, "What are the computations of the cerebellum, the basal ganglia, and the cerebral cortex?", *Neural Networks*, vol. 12, pp. 961–974, 1999.
- [4] J. Hu and K. Hirasawa, "Overlapped multi-neural-network: A case study", in *Proc. of IEEE International Joint Conference on Neural Networks* (*IJCNN'00*) (*Italy*), 7 2000, vol. I, pp. 120–125.
- [5] J. Hu, K. Hirasawa, and Q. Xiong, "Overlapped multineural-network and its training algorithm", *Trans of IEE Japan*, vol. 121-C, pp. 1949–1956, 12 2001.
- [6] T. Kohonen, *Self-Organizing Maps*, *3ed*, Springer, Heidelberg, 2000.
- [7] S.A. Solla and M. Fleisher, "Generalization in feedforwad neural networks", in *Proc. the IEEE International Joint Conference on Neural Networks (Seattle)*, 1991, pp. 77–82.
- [8] H. Demuth and M. Beale, *Neural Network Toolbox:* for use with MATLAB, The MATH WORKS Inc., 2000.

#### 連絡先:

古月 敬之

早稲田大学大学院情報生産システム研究科 〒 808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-7

Phone + Fax:093-692-5271

E-maile:jinglu@waseda.jp

# Boosting を適用したマルチエージェント 強化学習アルゴリズムの改善手法

# Improvement Method Applying Boosting of Reinforcement Learning Algorithm in Multi-Agent Environment

○高橋 嘉也

渡邊 俊彦

Yoshiya Takahashi

Toshihiko Watanabe

大阪電気通信大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Osaka Electro-Communication University

**Abstract:** Reinforcement learning is a promising approach to realize intelligent agent such as autonomous mobile robots. This paper describes an improvement method applying boosting concept for Profit-Sharing reinforcement learning algorithm in multi-agent environment. In our approach, information about ranking of reward acquisition among agents and state transition history of each trial are utilized to decide the weights for learning with boosting. Through numerical experiments of the root search problem, the method was found to be effective in terms of learning efficiency.

### 1 はじめに

強化学習は、機械学習等で用いられる教師付き 学習とは異なり各状態に対する望ましい行動を 明示しない学習方法であり、自律性の高い学習機 能の実現が期待されている。

一方、教師付き学習問題において、AdaBoost[1] に代表される Boosting が提案されており、精度の低い学習機械を逐次的に組み合わせていくことで、精度の高い学習機械を構成する手法の研究が進められている。

本研究では、マルチエージェント環境において、 強化学習の Profit-Sharing アルゴリズム[2]に Boosting の概念を取り入れ、アルゴリズムの学 習性能の向上を目指した改善手法を提案する。迷 路探索問題の数値シミュレーションによりその 有効性を示す。

#### 2 Profit-Sharing による強化学習

強化学習では、エージェントはマルコフ決定過程の環境で、各状態と行為の結果に対して報酬を得ることで学習を進める。強化学習アルゴリズムは環境同定型と経験強化型の二つに大別されている。

Q-Learning は TD 学習を用いた環境同定型の 代表的な学習手法であり、ほぼ全ての環境を把握 するため、高い学習精度が得られる反面、学習時 間が多くかかるという問題点がある。

それに対し、本研究でとりあげる経験強化型の Profit-Sharing はエージェントの一連の状態と 行為を履歴 (エピソード) として記憶しておき、 報酬が与えられた時点でルールの重みを一括更 新するため、Q-Learning に比べ学習精度は低いものの学習速度が速いという特徴がある。報酬から i 段階前の行為を $r_i$ 、履歴長をm、強化値をfとした時、ルール評価値wは次式で更新される。

$$w(i, r_i) = w(i, r_i) + f(i, r_i) \tag{1}$$

$$f(i, r_i) = \frac{1}{s} f(i-1, r_{i-1})$$
  $i = 1, 2, ..., m-1$  (2)

ここで 1/s は割引率、 $r_{i-1}$  は報酬から i-1 段階前の行為を示し、強化値  $f(0,r_0)$  は目標達成の報酬として予め設定しておく。また、学習精度を向上させるため、行為履歴中の冗長な履歴は削除しておくものとする。

エージェントの行為選択はボルツマン分布に 基づく確率的行為選択により求めるものとし、状態 i において行為 r を選択する確率 p を次式で定義する。

$$p(i \mid r) = \frac{\exp(w(i,r)/T)}{\sum_{N} \exp(w(i,r)/T)}$$
(3)

$$T = T \times \alpha \tag{4}$$

ここで T は温度、 $\alpha$  は温度係数を表し、N は状態 i において選択できる全行為数とする。温度は試行毎に下げるものとする。これにより温度が高い時の行為選択はランダムに近いものとなり、低い時は評価値に基づいた行為選択になる。

#### 3-1 行動履歴を活用した行為選択手法

強化学習アルゴリズムの適用の際には上記の確率的行為選択手法が用いられるのが一般的であるが、Profit-Sharingを適用する場合には、この選択方法では局所解に陥りやすくなる傾向がある。迷路探索問題の強化学習過程におけるルー

ル評価値の例を図1に示す。



図1 局所解に陥る可能性の高い評価値の例

図1ではSTART地点から最初の分岐点において それまでの学習によって偶然非最短ルートを選 択した回数が多かったため、このまま学習を継続 しても最適解は得られない。これは、Profit -Sharing が経験を強化するという考え方に基づ いているためであると考えられる。そこで、各状 態において、学習のための試行を通して各行為が 選択された回数をカウントし、この回数によりル ール評価値を正規化して確率的行為選択を行う。 各状態においてルール以外に行為の選択回数を 記憶しておくものとする。

すなわち, 各状態における各行為の選択回数か ら評価値の重み (重み強化値)を求め、重み強化 値を用いて評価値を変換する。この変換された評 価値(重み評価値)を用いてエージェントは確率 的行為選択を行う(図2)。

ある状態iにおいて選択された行為の回数 $\epsilon a$ 、 過去に選択されたことがある全ての行為数を N とすると重み評価値zは次式で求める。

$$z(i,r_i) = \frac{b(i,r_i)}{\sum_N b(i,r_i)} \times \sum_N w(i,r_i)$$
 (5)

$$b(i, r_i) = \frac{w(i, r_i)}{a(i, r_i)} \qquad i = 1, 2, ..., m - 1$$
 (6)

ここでbは重み強化値を示す。また、式(5) は式(1)の後に用いるものとし、選択された行 為の行為回数と重み強化値は学習ごとに更新す るものとする。

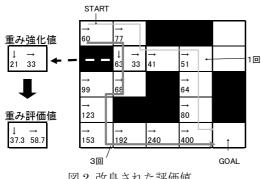


図2 改良された評価値

図 2 のように局所解と最適解の分岐点で従来 手法では局所解に多くの評価値が与えられてい るが、本手法では最適解に多くの重み評価値が与 えられている。これにより、従来手法より局所解 への収束が少なくなる事が期待できる。

#### 3-2 行動履歴と温度を用いた評価値の更新

一般的にエージェントが学習を行う毎にその 解は最適解に近づくため、学習状況に応じて評価 値を強化する事で高い学習精度を維持したまま で行為回数を低減できることが期待できる。

本研究では前述の重み強化値と学習状況を示 す温度を用いて評価値を更新する方法を提案す

初期温度を $t_1$   $\mathbb{C}$ 、試行回数n 回目の温度を $t_n$   $\mathbb{C}$ とした時、ルール評価値を次式で更新する。

$$w(i,r_i) = w(i,r_i) + f(i,r_i) \times \exp\left(\frac{b(i,r_i)}{\sum_N b(i,r_i)}\right) \times \left(\frac{t_1}{t_n}\right)^{\frac{1}{F}}$$
 (7)

ここで F は減衰係数を意味し、式(7) は学習ご とに更新するものとする。

# 4 マルチエージェント環境における Boosting の適用

本研究では、エージェント同士の通信や他のエ ージェントの状態情報の観測[3]を仮定せず、複 数のエージェントが同一の環境を行動するもの として問題を設定する。これは、強化学習過程に おいて、学習がまとまった試行毎にバッチ的に行 われると仮定していることに等しい。ただし、学 習するルールの評価値などは共有するものと仮 定する。1回の試行により複数のエージェントが 行動した結果、学習データである行為の履歴がエ ージェントの数だけ得られることになる。この複 数の履歴を用いて強化学習に Boosting の概念を 適用する。AdaBoostでは、学習データに正答率 で重みをつけたサンプリングを行うが、強化学習 ではより良い試行を重点的に学習させる必要が ある。そこで、各試行毎にエージェントの行動を 評価し、報酬値を分配・変化させて学習させるこ とにより、学習速度を改善することを目的とする。

#### 4-1 報酬値の分配手法

エージェント同士の履歴長の比較を用いるこ とにより最適解に近いルート履歴を持ったエー ジェントを見つけ出すことができると考えられ ることから、最短解により近いルート履歴を見つ けたエージェントに対して多くの報酬を与える

手法を提案する。つまり、マルチエージェントにより環境を試行し、目的の状態となった時の履歴 長を用いてエージェントに着順をつけて、ルール (分配関数)に基づき報酬値を分配する。

エージェントの数や環境によって、最適な分配 関数は異なると考えられる。本研究では、1回の 試行の中で最も良好な行動履歴となったエージ ェントに多くの報酬を与える分配関数と各エー ジェントの報酬値の差が同等である分配関数を 次式で提案する。

$$p_g = \frac{M}{g} \tag{8}$$

$$p_g = M - ((g-1) \times v) \tag{9}$$

ここで、pはエージェントに与える報酬、gは着順、Mは基本報酬、vを減衰報酬値とする。また、各エージェントに同等の報酬を与える従来手法は次式で与えられる。

$$p_g = M \tag{10}$$

#### 4-2 特別報酬による重みの変更

学習が進むにつれて行為数は最適解に近い解になっていくことから、複数のエージェントの中で最も早く目標の状態に到達したエージェントの履歴長(最短履歴行為数)を記憶させておき、それまでの最短履歴行為数より少ない行為数で目標の状態となった時、そのエージェントに多くの報酬(特別報酬)を与える方法を提案する。

また、最短履歴行為数が更新される度に、そのエージェントに対し、前回の特別報酬を上回る報酬を与える。

エージェントの報酬 ( $p_1$ ) は次式で求めるものとする。

$$p_1 = M \times x \tag{11}$$

$$x = 1.0 + Sp \times y \tag{12}$$

ここで、x は特別報酬率を示し、Sp は特別係数、y は特別報酬を用いた回数とする。

#### 5 シミュレーション

迷路探索問題に提案手法を適用し、性能を評価する。シミュレーション環境を図3、図4に示す。

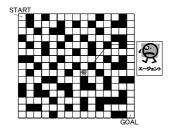


図3 シミュレーション環境1

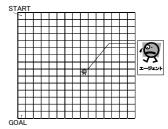


図4 シミュレーション環境2

シミュレーション条件として、初期温度を 10000  $\mathbb{C}$ 、エージェント数を 5、基本報酬を 1000 とした。また、温度係数、割引率、報酬等は試行 錯誤で調整して設定した。

学習は、4回連続同じ行為数の試行となった場合に収束と判定する。シミュレーションの結果で得られる総試行回数、総行為回数はシミュレーションを 10回行った時の平均回数とする。最短解への収束確率はシミュレーションを 200回行ったうち最短解が求められた回数より求める。

#### 5-1 提案手法のシミュレーション

温度係数を変化させた場合の従来のルール評価値のみに基づく行為選択による強化学習と行動履歴を活用した行為選択による学習の収束確率を図5に示す。

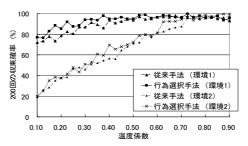


図 5 行動履歴を活用した行為選択による学習

行動履歴を活用した行為選択手法を用いることにより、環境に関わりなく最適解への収束確率が向上した。

シミュレーション環境 1 で分配関数と特別報酬を用いた場合の収束確率を図 6、シミュレーション環境 2 の収束確率を図 7 に示す。

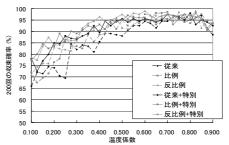


図 6 環境 1 での強化学習結果 (収束確率)

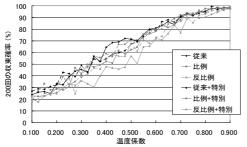
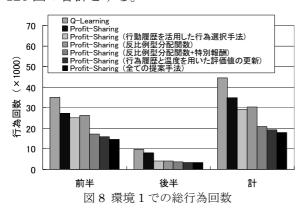
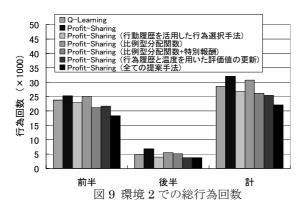


図 7 環境 2 での強化学習結果 (収束確率)

シミュレーション環境 1 では、両方の手法で、 収束確率の向上がみられた。しかし、シミュレー ション環境 2 のように解候補の数が膨大な環境 においては、報酬に大きな差がある分配関数は初 期段階でのエージェントの評価値が、後半の試行 において新たな最短解を導き出すのを妨げるた め、特定の解に収束してしまい収束確率が低下し たと考えられる。反比例型の分配関数に特別報酬 を施した手法においても同等の理由で収束確率 が低下したと考えられる。

シミュレーション環境で従来手法と提案した 手法の係数を調整した場合の行為回数を図 8、図 9に示す。試行回数を 150 回とし、行為回数はシ ミュレーションを 10 回行ったときの平均回数と する。行為回数の合計は試行の前半 30 回と後半 120 回の合計とする。





シミュレーション環境 1 では全ての提案手法で従来手法の Profit-Sharing と Q-Learning より低い行為回数となったが、シミュレーション環境2は環境1のような大幅な行為回数の低下が見られなかった。また、どちらの環境でも収束確率が向上した行為選択手法や特別報酬による重みの変更手法は、他の提案手法に比べ総行為回数においても効果の高い手法であった。行動履歴と温度を用いた評価値の更新手法は従来手法に比べ低い行為回数となった。

以上のことから提案手法は、環境に左右される 特性を持ち、解候補が多い環境ほどその効果は少 なくなると考えられる。

今後の課題として、環境2のような解候補の多い環境で最適な解を求めるために特定の解への 収束を防ぐ必要性があると考えられる。

#### 6 おわりに

本研究では、マルチエージェント環境において、強化学習の Profit-Sharing アルゴリズムに Boosting の概念を取り入れ、アルゴリズムの学習性能の向上を目指した改善手法を提案した。迷路探索問題の数値シミュレーションによりその有効性を示した。

# 参考文献

[1]Y. Freund, R.E. Shapire:"A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting", J. of Computer and Systems Science, Vol.55, pp.119-130, 1997.

[2]宮崎 和光,木村 元,小林 重信: Profit-Sharing に基づく強化学習の理論と応用、人工知能学会誌、

Vol14, No5, pp.800-807, 1999

[3]伊藤 昭, 金渕 満: 知覚情報の粗視化によるマルチエージェント強化学習の高速化、電子情報通信学会論文誌、Vol.J84-D-I, No3, pp.285-293, 2001-3

#### 連絡先:

**∓**572-8530

大阪府寝屋川市初町 18番8号

大阪電気通信大学 工学部第一部電子工学科

渡邊俊彦

電話: 072-824-1131(代表) FAX: 072-824-0014(代表)

Email: t-wata@isc.osakac.ac.jp

# ルールの生成法と推論法を変化させる学習の拡張

―ルール生成とルール評価におけるデータ集合のリサンプリングについて―

Extension of Learning by Switching Rule Generation and Reasoning Method
—Introduction of Resampling Method on Reconstructing and Evaluating Rules

松本 裕二馬野 元秀瀬田 和久MATSUMOTO, YujiUMANO, MotohideSETA, Kazuhisa

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科 Department of Mathematics and Information Sciences, College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

Abstract When we solve a problem, we firstly have no knowledge. With observing data, we are constructing knowledge for solving the problem and finally have complete one. The system we proposed has knowledge representations which have a rule set, a rule generation method and reasoning methods. When an reasoning result is incorrect, the system may switch a reasoning method to another, reconstruct the rule set, or switch a knowledge representation to another. In this paper, we introduce a resampling method in the system. For reconstructing and evaluating the system resamples data sets, one includes duplicated data and the other not. We calculate weights for data by the number of reasoning and cumulative correct ratio to use roulette selection. We apply the methods to Stefan Aeberhard's wine data.

### 1. はじめに

ある事例を学習する過程において、人間はデータを少しずつ受け取り学習を行っていく。学習の始めの段階では与えられたデータをそのまま覚えておき、推論には、それまでに与えられたデータのうちの似ているものを推論結果にするが、さらに多くのデータが与えられると、人間はデータをそのまま覚えておかずにまとまりとして認識し、より抽象的な形式で知識を持つようになると考えられる。知識をルール表現するものとして、MBR(Memory Based Reasoning)、ファジィif-thenルール、決定木といった手法が挙げられる。そこで、我々はこれらの異なる表現を用いて、推論法の切り替え、ルールの再構成、知識表現の切り替えを行っていく学習法を提案した[1].

今まではシステムが蓄積している学習データをすべて使用してルール生成とルール評価を行っていたが、ルールが過剰適応しやすい.そのため、ルール生成とルール評価で異なるデータを使用することにし、これらはデータの重複を許す場合と許さない場合の2通りのリサンプリング法によって作成する.また、人間が知識をつくりあげていく場合(特に知識を再構成する場合)には、推論結果が不正解であった学習データを重視するというように、学習データと正答だけではなく推論結果なども学習に反映させると考えられる.そこで、等確

率に無作為選択を行う方法以外にも,データごとの推論に使用した回数と正解率から得た重みを利用してルーレット選択をする方法でもリサンプリングを行った.数値実験を行い,従来との比較やこれらのリサンプリング法での比較を行う.

#### 2. 学習法の概要

本学習システムの構成を図1に示す.本学習法では、ルール集合、ルールを生成する方法(生成法)、ルールを用いて推論を行う方法(推論法)をまとめたものを知識表現と呼んでいる.データがひとつずつ与えられていき、それに対して知識表現が持つルールを用いて推論を行っていく.通常は推論のみを行うが、ある回数以上連続して不正解となった場合には学習(推論法の切り替え、ルールの再構成、知識表現への切り替えなど)を行う.本手法では常にひとつの知識表現だけを使用し、必要に応じて使用する知識表現を切り替えていく.また、推論法も常にひとつだけを使用する.

# (1) 学習における操作

同じルールで推論を続けていると、そのルールではうまく説明することができずに誤った推論を行ってしまうデータが出現する。また、学習が進んで比較的性能のよいルールを持っていたとしても、学習対象のデータの傾向が時間的に変化する

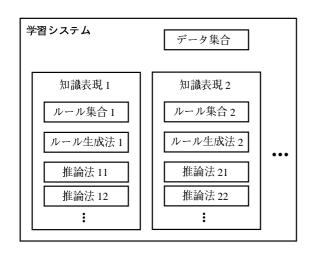


図 1: 学習システムの構成

場合は同様の状況となるだろう。そこで、本手法では次の3つの操作を行う。

- (i) 推論方法の切り替え (m1 回連続不正解のとき)
- (ii) ルールの再構成 (m2 回連続不正解のとき)
- (iii) 知識表現の切り替え  $(m_3$ 回連続不正解のとき)

なお, 一般的には,  $m_1 \le m_2 \le m_3$  とする.

# (i) 推論方法の変更

現在の知識表現の推論法のなかで、妥当であると思われる推論法に切り替える. つまり、知識表現が持つすべての推論法を用いて、システムが蓄積しているデータ集合に対して推論を行う. そして、正解率が最大となる推論法に切り替える.

### (ii) ルールの再構成

現在の知識表現が持つルールの生成法を用いて, システムが蓄積しているデータ集合からルールを 作り直す.ルールの再構成の評価基準として,次 の評価関数を用いる.

$$H(c_a, r_a) = c_a + \frac{\alpha}{r_a} \tag{1}$$

ここで,  $c_a$  を知識表現 a の正解率,  $r_a$  を知識表現 a のルール数,  $\alpha$  をパラメータとする.

式 (1)の値を再構成前と再構成後とで比較し,再構成後の値の方が大きい場合には,ルールの再構成に意味があると考え,新しいルールで処理を続ける.再構成後の値のほうが小さい場合には,ルールの再構成に意味がないと考え,次の知識表現の変更を行う.

# (iii) 知識表現の変更

学習システムが持つすべての知識表現でデフォルトの推論法を用いて、データ集合に対して推論を行い、式 (1) の値が最大となる知識表現に切り換える.値が同じ場合は先に登録した知識表現(一般的には簡単な知識表現)を選択する.

# (2) 知識表現

本手法で用いる4つのルール表現は次の通りである.

#### 学習データと同じ形式のルール

[生成法  $G_1$ ] データ点をルールとする方法 [生成法  $G_2$ ] クラスタリングを行い,その重心をルールとする方法

[推論法  $R_1$ ] 最も類似しているルールによる方法 [推論法  $R_2$ ] 類似度による重みを考慮する方法

#### ファジィルールによる表現

[生成法  $G_3$ ] 各属性ごとに一定数のファジィ集合を 作成する方法

[生成法  $G_4$ ] 全属性でクラスタリングを行い、それをファジィルールにする方法

[推論法 R<sub>3</sub>] ファジィ推論 (min-min-max-重心法) [推論法 R<sub>4</sub>] ファジィ推論 (×-×-+-重心法)

# 決定木による表現

[生成法  $G_5$ ] ID3 を用いる方法 [推論法  $R_5$ ] 決定木を用いて推論を行う方法

#### ファジィ決定木による表現

[生成法  $G_6$ ] ファジィID3 を用いる方法 [推論法  $R_6$ ] ファジィ決定木を用いて推論を行う方法

本システムではこれらを表1のように組み合わせた知識表現を使用する.

表 1: 本システムで使用する知識表現

知識表現	ルール生成法	ルール推論法
$K_1$	$G_1$	$R_1, R_2$
$K_2$	$G_2$	$R_1, R_2$
$K_3$	$G_3$	$R_3, R_4$
$K_4$	$G_4$	$R_3, R_4$
$K_5$	$G_5$	$R_5$
$K_6$	$G_6$	$R_6$

#### 3. リサンプリング

従来の方法ではシステムが蓄積しているデータをルール作成と評価の両方に用いており、蓄積しているデータにルールが過剰適応してしまう。そこで、今回はルール生成とルール評価には別のデータ集合を用いることにし、リサンプリング法によって、システムが蓄積しているデータDからルール生成用のデータ集合 $D_t$ とルール評価用のデータ集合 $D_t$ を作成する。

データを重複して抽出する場合と重複せずに抽出する場合があり、重複して抽出する場合には割合  $r_t$  と  $r_v$  に応じた数だけ等確率で無作為に D からデータを取り出して  $D_t$  と  $D_v$  を作成する. 重複せずに抽出する場合には  $D_t$  を作成後に、  $D_t$  で使用されていないデータを用いて  $D_v$  を作成する.

また,人間は同じデータを用いて繰り返し学習を行う場合には,ほとんどいつも正解となるデータは知識の改善につながらないために重視せずに,頻繁に不正解となるデータを重視すると考えられる.さらに,人間は古いデータほど忘れていきやすい.

そこで、等確率に無作為選択を行うかわりにデータに重みをつけておき、ルーレット選択を行う。学習データ  $x_i$  が推論に用いられた回数 (システムに与えられたときの推論とルール評価時の推論の合計) を  $t_i$ 、その累積正解率を  $c_i$  としたとき、 $x_i$ の重み  $w_i$  を次のように定義する.

$$w_i = (1 - \gamma c_i)^{\log(t_i + 1)} \tag{2}$$

ここで、 $\gamma$  はパラメータで  $0 \le \gamma \le 1$  をとる。また、 $(1-\gamma c_i)$  が 0 と 1 の間の値となるため、 $t_i$  が大きくなるほど  $w_i$  は小さくなる。累乗に対数を用いることで重みの値が小さくなりすぎないようにした。式 (2) は正解率が高くて推論回数が多い場合に小さい値となる。

古いデータを忘れていくのを表現するためには, データの与えられた時間を使用する方法が考えら れるが,今回は推論回数を用いる.

今回はデータを重複して抽出する場合と重複せずに抽出する場合の2通りと、等確率な無作為選択をする場合と重み付きルーレット選択をする場合の2通りを組み合わせる.

#### 4. 数值実験

リサンプリングの効果を調べるため,実験シス テムを用いて数値実験を行った. 使用したデータは Stefan Aeberhard のワインデータ [2] である. データ数は 178 個であり 13 属性 3 クラスのデータである (属性はすべて連続値). クラス比は均等でなく 59:71:48 となっている. 次のような手順で 3-fold 交差検証法を行い,それを 1 試行とする.

- (1) データを3つに分割し、 $D_a, D_b, D_c$ とする.
- (2) (推論・学習)  $D_a$  と  $D_b$  を用いて推論・学習を行う.
- (3) (検証) ルール数と  $D_c$  での正解率を得る (この ときは学習は行わない).
- (4)  $D_b$  と  $D_c$  でステップ 2 を行い, $D_a$  でステップ 3 を行う
- (5)  $D_c$ と  $D_a$  でステップ 2 を行い, $D_b$  でステップ 3 を行う
- (6) 推論・学習フェーズでの学習操作の回数の平均と、検証フェーズでのルール数と正解率の平均を求める.

従来法と各リサンプリング法で 100 試行を行った結果を表 2 に示す. (a) は従来の方法, (b) から (e) はリサンプリング法であり, (b) は等確率な無作為選択によって重複して抽出する方法, (c) は重み付きルーレット選択によって重複して抽出する方法, (d) は等確率な無作為選択によって重複せずに抽出する方法, (e) は重み付きルーレット選択によって重複せずに抽出する方法である.

学習操作回数の (i) と (ii) と (iii) はそれぞれ 100 試行で,推論方法の切り替えとルールの再構成と知識表現の切り替えが実行された回数の平均を示している.評価値は平均正解率と平均ルール数を用いて式 (1) から求めた.パラメータは (a) から (e) のすべての場合で  $m_1=1, m_2=2, m_3=3, \alpha=1$  とし,リサンプリングのパラメータは  $r_t=0.75, r_v=0.25, \gamma=0.5$  とした.クラスタリングは最短距離法 (しきい値は 0.2) とし,ID3 とファジィID3での葉節点条件は占有率が 0.8 のときとした.

リサンプリングを行ったほうがほとんどの場合に正解率もルール数も従来法よりよい結果となった.これはリサンプリングによって,過剰適応を避けることができたためであると考えられる.重複して抽出する場合と重複せずに抽出する場合を比較すると,(b)と(d),(c)と(e)のどちらの場合でも,重複せずに抽出する場合のほうが正解率もルール数もよい結果となった.重複して抽出するほうが得られるデータに多様性がないためである

表 2: 手法の組み合わせによる正解率とルール数の平均

	正解率 ルール		評価値	学習操作の回数		
		数		(i)	(ii)	(iii)
(a)	0.896	10.4	0.9920	16.9	5.07	0.943
(b)	0.901	10.1	0.9999	17.8	6.01	1.5
(c)	0.897	10.8	0.9897	17.9	5.88	1.67
(d)	0.911	8.78	1.025	15.5	5.05	1.08
(e)	0.907	8.54	1.024	16.0	5.05	0.963

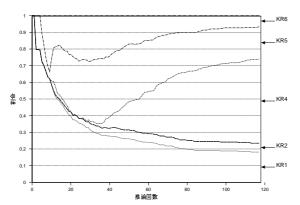


図 2: 知識表現の使用割合の変化(a)

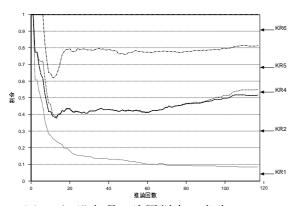


図 3: 知識表現の使用割合の変化(c)

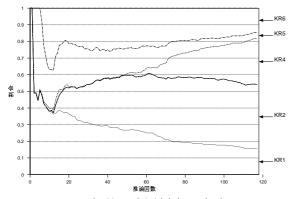


図 4: 知識表現の使用割合の変化(e)

と考えられる. 等確率な無作為選択と重み付きルーレット選択とを比較すると, (b) と (c), (d) と (e) のどちらの場合でも無作為選択のほうが正解率が低かったが, これは重み付きルーレット選択では不正解となるデータを重点的に学習するためではないかと考えられる. 評価値は (d) がこの中では最大となった. 基本的に, 本学習法は式 (1) の値を向上させる方向に学習を進めていく. その観点からは, 式 (1) の値が大きくなる (d) と (e) がよい手法であると考えられる.

さらに、この数値実験でどの知識表現が選択されていくかを見るために (a), (c), (e) での知識表現の選択割合の変化を積み上げ折れ線グラフでそれぞれ図 2, 図 3, 図 4 に示す. リサンプリング法を使用することによって、選択される知識表現が異なっていることが分かる.

#### 5. おわりに

リサンプリングを行い、それをルール生成時や知識表現の選択に使用した。それによって過剰適応を避け、より評価値を上げることができた。今回はデータの付加情報として推論回数と正解率だけで重み付けを行い、それによりルーレット選択を行った。それ以外にもデータの重みを用いた正解率を評価に用いることや、他の付加情報として推論結果の履歴を持つようにして、推論結果の新しいものほど重みを大きくするような重み付けを行うことが考えられる。

#### 参考文献

- [1] 馬野 元秀, 松本 裕二, 宇野 裕之, 瀬田 和久: ルールの生成法と推論法を変化させる学習の 拡張, 第 16 回ファジィシステムシンポジウム, pp.463-466, 2000.
- [2] ftp://ftp.ics.uci.edu/pub/machine-learning-databases/wine/wine.names

#### [問い合わせ先]

〒599-8531 堺市学園町 1-1 大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科 松本 裕二

Tel 0722–54–9675, Fax 0722–54–9930 Mail matumoto@marron.cias.osakafu-u.ac.jp

# ビット反転とバイナリ演算を用いた遺伝的局所探索法の 多目的連続関数最適化問題への適用

# Application of memetic algorithms with bit-flip and binary-operation local search to multi-objective function optimization

村田 忠彦 中村 明博
Tadahiko Murata Akihiro Nakamura
関西大学総合情報学部
Faculty of Informatics, Kansai University

**Abstract:** In this paper, we try to improve the performance of local search algorithm in memetic EMO algorithms for function optimization problems. In our previous method, we apply a bit-flip local search for multi-objective optimization problems. When we solve function optimization problems where decision variables are coded in binary numbers, the bit-flip operation can not be regarded as local search because the modified decision variable is not near to the original variable. In this paper, we employ a binary operation as local search operation. We show simulation results on two- to six-objective function optimization problems.

#### 1. はじめに

EMO (Evolutionary Multi-objective Optimization) アルゴリズムの多くは,パレート最適解集合(パレートフロント)を求めることを目的としている.パレート最適解集合の探索では,解の個数と共に,その多様性にも注意を払う必要がある.また近年では,パレートフロントへの収束速度にも注意が向けられている.

収束速度を改善するための方法の一つとして, 局所探索法と組み合わせるハイブリッド化[1,2] が考えられる.このようなハイブリッド化は単 一目的最適化問題を対象として,多くの研究で 取り組まれてきたが,多目的最適化問題を対象 とする研究はあまり多くはされていない.単一 目的最適化問題とは異なり,多目的最適化問題 では,解の更新ルールを,すなわち,解の優劣 を決めるための解の更新基準を決める必要があ る.この解の更新ルールの定義が一意に決められないところに,多目的最適化問題への局所探 索の適用の困難性がある.

また、局所探索を行うためには、その解の近傍個体を作らなければならない.従来研究[1]では、局所探索時に近傍個体を生成する際に、2値で定義された個体の1ビットをランダムに反転させていた.このビット反転は、離散変数問題では良い結果が得られているが、連続関数問題では、良い結果が得られていなかった.局所探索の性能は、近傍個体の生成方法に大きく依存するため、よく吟味する必要がある.本研究では、近傍個体の生成方法に対し、近傍個体の生成方法の改善が、局所探索の性能を向上させることを示す.

#### 2. 提案手法

本研究では、連続関数問題に適した近傍個体

の生成方法を提案する.バイナリ変数を個体として,ビット反転を適用した場合,元の個体の近傍個体が作られるとは限らない.それは,反転されるビットの位置より,生成される個体の変数空間上での位置が大きく異なるからである.そこで,ビット演算(1ビット足す or 引く)による近傍個体生成法を提案する.この方法により,生成される個体を変数空間内で近傍を限定することができる.図1にビット反転とビット演算による個体生成の一例を示す.

#### 3. 実験結果

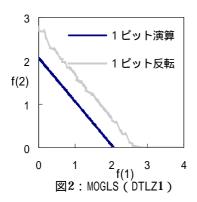
本研究では, Deb ら[3]が設計した多目的関数 最適化テスト関数 DTLZ1, DTLZ2 を用いた.

Minimize 
$$f_1(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}x_1x_2 \cdots x_{N-1}(1+g(\mathbf{x}_N))$$
  
Minimize  $f_2(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}x_1x_2 \cdots (1-x_{N-1})(1+g(\mathbf{x}_N))$   
:  
Minimize  $f_{N-1}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}x_1(1-x_2)(1+g(\mathbf{x}_N))$   
Minimize  $f_N(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(1-x_1)(1+g(\mathbf{x}_N))$   
subject to  $0 \le x_j \le 1$ , for  $j = 1, 2, ..., m$  (DTLZ1)  
Minimize  $f_1(\mathbf{x}) = (1+g(\mathbf{x}_N))\cos(\frac{p}{2}x_1)\cdots\cos(\frac{p}{2}x_{N-2})\cos(\frac{p}{2}x_{N-1})$   
Minimize  $f_2(\mathbf{x}) = (1+g(\mathbf{x}_N))\cos(\frac{p}{2}x_1)\cdots\cos(\frac{p}{2}x_{N-2})\sin(\frac{p}{2}x_{N-1})$   
Minimize  $f_3(\mathbf{x}) = (1+g(\mathbf{x}_N))\cos(\frac{p}{2}x_1)\cdots\sin(\frac{p}{2}x_{N-2})$   
:  
Minimize  $f_{N-1}(\mathbf{x}) = (1+g(\mathbf{x}_N))\cos(\frac{p}{2}x_1)\sin(\frac{p}{2}x_2)$   
Minimize  $f_N(\mathbf{x}) = (1+g(\mathbf{x}_N))\sin(\frac{p}{2}x_1)$   
subject to  $0 \le x_j \le 1$ , for  $j = 1, 2, ..., m$  (DTLZ2)

1 ビット反転1 ビット演算01100010 (0.3843)01100010 (0.3843)

<u>1</u>1100010 (0.8862) 011000<u>01</u> (0.3803)

図1:ビット操作例



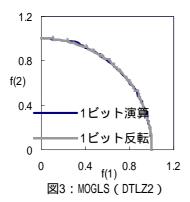


表 1: 近傍個体 (NSGA- , DTLZ1)

	ビット反転	ビット演算
3-objective	0.4318	0.3660
4-objective	0.3647	0.2415
5-objective	0.2672	0.2373
6-objective	0.2666	0.2529

表 2: 近傍個体 (SPEA2, DTLZ1)

	ビット反転	ビット演算
3-objective	0.4485	0.4106
4-objective	0.3638	0.3094
5-objective	0.3437	0.1974
6-objective	0.2635	0.2794

ここで,N は目的数,関数  $g(\mathbf{x}_N)$  は n 個の要素をもつベクトルである.関数 g には,正の値域をもつ関数であれば,どんな関数でも用いることができる.

図2と図3に,スカラー化目的関数を用いた 多目的 GA+局所探索法である MOGLS [2]を DTLZ1 と DTLZ2 に適用して得られたパレート フロントを示す.図2から DTLZ1 に対して,ビ ット演算の有効性を示すことができた.一方, DTLZ2では,同様のパレートフロントが得られ た.

次に,代表的な EMO アルゴリズムである NSGA-II [4]と SPEA2 [5]に局所探索をハイブリッド化したアルゴリズムを 3 ~ 6 目的問題に適 用して得られたパレートフロントの被覆率を表 1と表2に示す.ここで,被覆率とは,得られ たパレートフロントの優越されやすさを表すも のであり,低い値の方が優越されにくいことを 示す.表1と表2から,ビット演算の局所探索 を導入して得られたパレートフロントの方が優 越されにくいことがわかる.

#### 4. おわりに

本研究から,連続関数問題には,ビット反転よりビット演算の方が有効であることがわかった.このことから,EMO アルゴリズムを局所探索法とハイブリッド化する場合,適用する問題の特徴を考慮した上で,近傍個体の生成方法を決定する必要があることがわかる.今後の課題として,今回は1ビット演算を採用したが,kビット演算に拡張し,パラメータ k の決定法についての研究を進めていくことができる.

#### 参考文献

- [1] 村田忠彦, 界外志織, 石渕久生: "多目的最適 化のための遺伝的局所探索法における優越 関係に基づく解更新ルール", 情報処理学会 数理モデル化と応用, Vol. 45, No. SIG 2 (TOM 10), pp. 119-133, 2004.
- [2] 村田忠彦, 石渕久生: "多目的フローショップ・スケジューリング問題のための遺伝的局所探索法", 日本経営工学会論文誌, Vol.48, No.6, pp.301-313, 1998.
- [3] K. Deb, L. Thiele, M. Laumanns, and E. Zitzler: "Scalable multiobjective optimization test problems", *Proc. of 2002 Congress on Evolutionary Computation*, pp. 825-830, 2002.
- [4] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan: "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, pp. 182-197, 2002.
- [5] E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele: "SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm", Technical Report 103, Computer Engineeringand Communication Networks Lab (TIK), 2001.

### 連絡先

村田 忠彦

関西大学 総合情報学部

〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1

TEL: 072-690-2429 FAX: 072-690-2491

E-mail: murata@res.kutc.kansai-u.ac.jp

# セルラーGA と島モデル GA の融合方法の関数最適化問題における パラメータ特性

# Parameter Specification of A Hybrid Algorithm of Cellular GA and Island-model GA for Function Optimization Problems

村田 忠彦 高田 健治
Tadahiko Murata Kenji Takada
関西大学総合情報学部
Faculty of Informatics, Kansai University

**Abstract:** In this paper, we examine the parameter characteristics of a distributed genetic algorithms that has cellular structures. Recently the distribution of genetic algorithms has attracted many researchers' attention, and coarse grained genetic algorithms and fine-grained genetic algorithms have been developed. Nakashima *et al.* have proposed a hybrid algorithm of the two distributed genetic algorithms. We examine the parameter specifications of their algorithm on two test functions.

#### 1. はじめに

近年,遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)[1,2]において,解の探索性能を向上させるため様々な手法が研究されている.本研究では,セルラーGAと島モデルGAの融合方法であるセル構造を有する分散遺伝的アルゴリズム(以下,分散 GA)[3]のパラメータ特性を調べ,解の探索効率にどのような特徴が見られるかを検討する.

#### 2. セル構造を有する分散 GA

図1はセル構造を有する分散 GA [3] を視覚的に示したものである。個体群が図のように4つの部分個体群にはセル構造が組み込まれている。各セルには個体(解)が格納されている。10×10のセルの集合を部分個体群として近傍サイズを設定し、その近傍サイズ内にあるセルの中から交叉対象となるセルをルーレット選択によって選択する。その際、他の部分個体群と相互作用することのできるインタラクションエリアを設ける。濃い色のセルがインタラクションエリアである。

インタラクションエリアでは、近傍サイズ内のセルが他の部分個体群のセルであっても、そのセルも交叉対象となり得る.たとえ近傍サイズ内に他の部分個体群のセルが存在していても、インタラクションエリアのセルでなければ交叉対象とはならない.薄い色の部分は中心の白色のセルの交叉対象のセルである.なお、インタラクションエリアとインタラクションエリア外の近傍サイズは必ずしも同じではない.図1では、インタラクションエリアの近傍サイズは2、インタラクションエリア外の近傍サイズは1である.

図2はセル構造を有する分散遺伝的アルゴリズム[3]の流れである.本研究でもこの流れに従

う.交叉は一点交叉,エリート保存は各部分個体群で最も適応度の高い個体をその個体が属する部分個体群中のセルにランダムに配置するものとする.初期個体の生成を除く全ての処理を

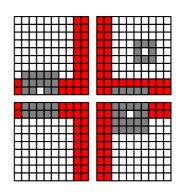


図1 提案手法の模式図

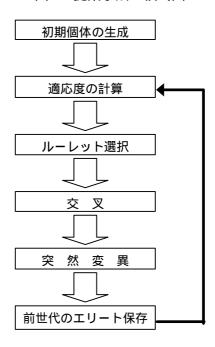


図2 提案手法の流れ

規定世代数分だけ繰り返す.

#### 3. 実験

テスト関数として, De Jong のテスト関数と Schwefel 関数の 2 種類を用いる (表 1). いずれ も最小化問題であり,前者は最適値が求まりやすく,後者は最適値が求まりにくい. パラメータとして,中島らの研究[3]の実験で調べられていたインタラクションエリア外の近傍サイズに加えて,部分個体群のセルの個数,インタラクションエリアの近傍サイズを用意する.また,終了世代数は部分個体群の縦横のセル数が10のときは500世代,20のときは125世代として,全てのパラメータで計算量を同じにし,それぞれの関数に初期個体を異ならせて50回適用した.なお,突然変異

表1 テスト関数

	決定変数 (個)	ビッ 数	最適値
De Jong	3	10	0.0
Schwefel	10	10	0.0

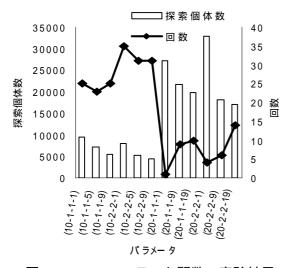


図3 De Jong のテスト関数の実験結果

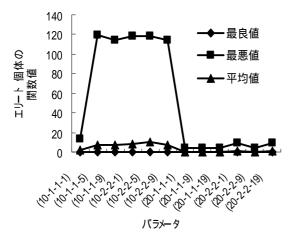


図 4 Schwefel 関数の実験結果

率については, De Jong のテスト関数は 0.05, Schwefel 関数は 0.01 で実験を行った.

図 3 に , De Jong のテスト関数の最適値が求まったときの探索個体数を棒グラフで , 50 回の実験中で最適値が求まらなかった回数を折れ線グラフで示す . また , 図 4 に Schwefel 関数の実行終了時に得られたエリート個体の最良値 , 最悪値 , 平均値を示す . 図 3 と図 4 における横軸の(A-B-C-D)という表記は A が部分個体群の縦横のセル数 , B がインタラクションエリアの近傍サイズ , D がインタラクションエリアの近傍サイズを意味する .

図3から,De Jongのテスト関数では,部分個体群の縦横のセル数は10よりも20の方が最適値が求まりやすいことがわかる.また,図4から,Schwefel 関数でも,部分個体群の縦横のセル数が10より20の方が最悪値と平均値に関して全体的に良い解が得られていることがわかる最良値に関してはいずれも最適値に近い解が得られた.今回の実験では,2つのテスト関数に関して,部分個体群の縦横のセル数の影響が大きいことがわかった.

#### 4. おわりに

本研究から,セル構造を有する分散 GA において,計算量を同じにした場合,部分個体群の大きさが従来手法[3]の4倍である 20×20 の設定の方が優れた結果を得られることがわかった.今回の実験では,部分個体群の数は従来手法と同じく4であり,さらに多数の部分個体群を並列にした場合との比較を行う必要があると考えられる.また,他のテスト関数についての傾向を調べることも必要である.

#### 参考文献

- [1] 伊庭斉志:"遺伝的アルゴリズム", 医学出版, 2002.
- [2] 坂和正敏 ,田中雅博:"遺伝的アルゴリズム", 朝倉書店, 1995.
- [3] 中島智晴, 有山貴信, 石渕久生: "セル構造を有する分散遺伝的アルゴリズムの提案",情報処理学会論文誌, Vol.43, No.SIG 10 (TOM 7), pp.46-57, 2002.

#### 連絡先

村田 忠彦

関西大学 総合情報学部

〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1

TEL: 072-690-2429 FAX: 072-690-2491

E-mail: murata@res.kutc.kansai-u.ac.jp

鶴岡 信治

# 進化的計算手法における解探索能力の定量化へのアプローチ

An Approach for Quantification of Search Ability in Evolutional Computation

吉川 大弘 酒徳 芳正 篠木 剛

Tomohiro Yoshikawa Yoshimasa Sakatoku Tsuyoshi Shinogi Shinji Tsuruoka

#### 三重大学 工学部 電気電子工学科

Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Mie University

Abstract: Recently, Evolutionary Algorithms (EAs), which are based on the biological evolutionary process, are widely studied in a lot of fields. However, their probabilistic behavior makes the theoretical investigation difficult. As a result, the search abilities of EAs have been tested through simulations in most of the reports. The parameters of genetic operations have also been decided experientially or by trial and error. The purpose of this study is mathematical analysis of search performance in EAs. This paper employs simplest fitness function using Hill Climbing Method for the derivation of this search performance. Number of Searchable Solutions (NSS) correspond to the search ability is formulated with the parameter, i.e. the probability of mutation, and the Probability of Improved Solutions  $\varepsilon_n$ . The value of NSS derived in this paper were well accorded with that of actual simulation.

#### 1 背景

本研究では,進化アルゴリズムの理論的な検証を目的 とし, EA の探索性能を, それらのパラメータを用いて 理論的に定量化することを試みる. すなわち, EA の探 索性能を表す関数を、パラメータを変数として導出し、 定式化を行う.この探索性能の定量化を実現できれば, 上述のパラメータの調整や,手法の比較の際,実際の試 行を行うことなく, 導出した理論式にパラメータを代入 するだけで探索性能の比較が行えることになり,前述の 評価に時間のかかる問題でのパラメータ調節・手法比較 が可能になるだけでなく,通常の問題に適用する際にも, それらに対する大幅な時間短縮が期待できる.ただし実 際には,探索性能を厳密に定量化することは困難である と考えられるため,本研究では,導出する理論式の精度 の目標としては,適切なパラメータの調整や,手法の比 較に十分有効な指針を与えることができるという程度に とどめる.

本研究では,解の探索性能を示す値として,探索可能解個数(Number of Searchable Solutions: NSS)を定義し,その定式化を試みる.この NSS は,全世代にわたる試行において探索した解の個数を,1世代あたりの探索解個数と,世代が進むにつれて生じる探索能力の減衰率との積で表現したものであり,探索可能な解の個数が大きいほど,有効な解を獲得できる確率が高いと仮定している.

本稿では,上述の目的に対する基礎的検討として,最も単純な形での山登り法を,単調増加の評価関数に適用するという問題設定のもとで,文献 [1] に示された NSS式 (以降,従来研究)の再考察,再検討を行う.本稿で

は,有効増殖数  $\nu$  と,探索能力減衰率の 1 要因である世代間重複による能力減衰率  $\gamma_g$  との積が,探索解個数になることに着目し,この  $\gamma_g$  の改善に焦点を当てる. $\varepsilon_n$  に理論値を用いることで, $\varepsilon_n$  を用いた新しい視点での  $\gamma_g$  の再導出を試みる.シミュレーションで得られた探索解個数との比較実験により,世代間重複による能力減衰率  $\gamma_g$  が改善され,完全ではないものの,正しい式が導かれたことを示す.

## **2** 問題設定

検討を行う EA 手法として,ビットコーディングされた染色体の数を 1 ,遺伝的演算として突然変異のみという極めて簡単化した手法を考える.進化は,山登り法,すなわち突然変異を行った染色体が元の染色体より評価値が高くなればその新しい染色体を次世代に残し,高くならなければ元の染色体を残すという方法を用いる.ただし突然変異の方法として,各遺伝子に対して突然変異率  $P_m$  で突然変異を行う方法について検討する.

また,染色体の評価関数として,単調増加関数を用いる.ここでは,染色体の1 の数が多いほど,評価値が高いという単純な関数問題に適用する.つまりこの評価関数では,遺伝子が全て0 であれば評価値が最も低く,全て1 であれば評価値が最も高くなる.

### 3 従来研究 NSS

文献 [1] では,有効な探索解個数である NSS を導出するにあたり,探索能力に影響を与えると考えられるバク

M, 世代数 G, 染色体長 N, 突然変異率  $P_m$ , エピスタ シスKを変数としている.探索可能解個数NSSは,1 世代当たりに探索可能な解の個数  $\nu$  と , 第 n 世代におけ る探索能力の減衰率  $\alpha_n$  との積を , 各世代における探索 個数として,世代についての和をとることにより,(1), (2) 式のように求めている.ここで用いられている有効 増殖数 u , 影響遺伝子による能力減衰率  $\gamma_i$  , 同一遺伝子 変更による能力減衰率  $\gamma_p$  , 世代間染色体重複による能 力減衰率  $\gamma_q$ ,解改善確率  $arepsilon_n$  の導出過程ならびに実際の 式の説明については,ここでは割愛する[1].

$$NSS = \sum_{j=0}^{G-1} \nu \alpha_j \tag{1}$$

$$\alpha_0 = 1$$

$$\alpha_{n+1} = \{1 - (\gamma_i + \gamma_p)\varepsilon_n\}(1 - \gamma_g)\alpha_n \qquad (2)$$

# 4 世代間染色体重複による能力減衰 率 $\gamma_{an}$ の再導出

進化的計算では,解探索が進むにつれ,それまでに探 索した解を重複して探索する確率が高くなる. 従来研究 [1] では,この重複探索の確率を $\gamma_a$ で表し,探索空間と, 1世代に有効増殖数 ν 個だけ解探索を行ったときの未探 索解空間との比により,世代毎に,探索が重複しない確 率が $\gamma_g$ だけ減衰していくとして,この能力減衰率 $\gamma_g$ を 求めている.

ここで,探索空間について考える.通常,染色体長Nであれば,その探索空間は $2^N$ で表される.そのため, 上述の考え方を単純に用いると, $\gamma_q$ は(3)式のように表 される.ところが染色体長 N が大きい場合, (3) 式の  $\gamma_a$ は事実上0となる.しかし実際には,染色体の重複探索 は比較的頻繁に生じており,(3)式をそのまま用いるこ とは正しくない.

$$\gamma_g = \frac{\nu}{2^N} \tag{3}$$

これは  $, 2^N$  の探索空間が , すべて均等に探索可能で あると仮定していることで生じていると考えられる.そ こで本稿では、"新たな解の探索のしやすさ"を、突然 変異確率を用いて考慮する.これは例えば, $p_m=1.0$ の 場合,新しく得られる解の種類としては,元の染色体の 遺伝子がすべて反転した解のみであり、その反転した染 色体への行きやすさ (探索する確率) は 1.0 , その他は探 索ができないことになる.また同様に, $p_m=0.1$ の場 合,染色体中の遺伝子が突然変異を受ける数の期待値は 1割であり、全ての遺伝子が反転した解の探索確率は極

テリア演算等のすべてのパラメータ:分割幅 B,増殖数 めて低くなる.この解の探索のしやすさにより,上述の 重複探索を表現する.

> 本章では,上述の新たな解の探索しやすさによる重複 探索の起こりやすさを,解改善確率  $\varepsilon_n$ (本稿では, $\varepsilon_n$ は 既知であるものとし,理論値を用いる)を用いて導出す る.ただしここでは,世代間染色体重複による能力減衰 率が $\varepsilon_n$ を用いている性質上,第n世代目での減衰率と なるため,  $\gamma_a$   $\gamma_{an}$  とする. また本稿では, この能力減 衰率を,重複探索することなく新しい解(改善/非改善に かかわらない) が探索できる確率として ,  $1-\gamma_{qn}$  の形で 求める. ただし,(8) 式以降で用いる P を,(4) 式のよ うに定義する.

$$P = Pm^l (1 - Pm)^{N-l} \tag{4}$$

以下に , 第 2 世代までの  $1-\gamma_{qn}$  の導出方法を示す . (2) 第0世代目

初期世代では,初期染色体が生成され,必ず探索を行 うことになるため,

$$1 - \gamma_{q0} = 1.0 \tag{5}$$

となる.

#### 第1世代目

突然変異により,必ず新しい解が探索できる(重複は 起こらない) ため,

$$1 - \gamma_{g1} = \varepsilon_1 + (1 - \varepsilon_1) = 1.0 \tag{6}$$

となる.ただし,突然変異が起こらないことによる重複 探索の確率については , 有効増殖数 u により考慮されて いる.

#### 第2世代目

第2世代目で新たな解を探索する確率を , (a) 2世代 目で解改善が起きるとき (確率  $\varepsilon_2$ ), (b) 1世代目で解改 善が起き,2世代目では起きないとき (確率  $arepsilon_1(1-arepsilon_2)$ ), (3) (c) 1 世代目, 2 世代目で解改善が起きないとき (確率  $(1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)$ ) の 3 つの場合に分けて考える.

#### (a) 2世代目で解改善が起きるとき

2世代目(現在)の解が突然変異により新たな解を探索 したとする.このとき新たに生成された解が,元の染色 体よりも評価値が高ければ(解改善が起きたなら),この 新たに生成された解は過去に探索されていないことにな り,今回の探索で,新たな解を探索したことになる.そ こで  $(a)(1-\gamma_{g2})$  は (7) 式で表される.

$$(a) (1 - \gamma_{a2}) = \varepsilon_2 \tag{7}$$

# (b) 1 世代目で解改善が起き , 2 世代目では起きないとき

1 世代目で解改善が起きたとき,2 世代目で重複探索が起こるのは,突然変異により生成される解が 1 世代目(1 世代前)の解に戻るときのみである.1 世代前の染色体に戻る(同じ場所に突然変異が起こる)確率は $\sum_{l=0}^{N} {}_N C_l P^2$ となる.これにより 2 世代目での新たな解の探索能力  $(b)(1-\gamma_{o2})$  は (8) 式で表される.

(b) 
$$(1 - \gamma_{g2}) = \varepsilon_1 (1 - \varepsilon_2) (1 - \sum_{l=0}^{N} {}_{N}C_l P^2)$$
 (8)

#### (c) 1世代目,2世代目で解改善が起きないとき

1世代目で突然変異によって探索した解の評価値が低く,解改善が起きなかったとすると,2世代目の元の解は1世代目の元の解(初期染色体)と同じものとなる.このとき,新たな解を探索する条件は,1世代目(過去)に探索した解をもう一度探索しないことである.また,同じ染色体からの突然変異により,過去に探索した解を再び探索する確率  $P_{ps}$  は, $P_{ps} = \sum_{l=0}^{N} {}_{N}C_{l}\{1-(1-P)^{2-1}\}P((10)$ 式)である.しかしこの式は,突然変異により探索する解すべてを考慮に入れており,解改善の起きるべき解を含んでしまっている.しかし当然それらの解侯補のどの解になれば解が改善されるかは未知であるため,ここでは,全体の解侯補のうちの対象となる解侯補の割合として,解改善が起きない確率を上述の式に掛けることにより, $(c)(1-\gamma_{a2})$ を(9)式のように求める.

$$(c) (1 - \gamma_{g2}) = (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \times$$

$$[1 - (1 - \varepsilon_1)P_{ps}]$$
 (9)

$$P_{ps} = {}_{N}C_{l}\{1 - (1 - P)^{2-1}\}P$$
(10) **6**

(7)-(9) 式より , 2 世代目の  $(1-\gamma_{g2})$  は (11) 式のようになる .

$$(1 - \gamma_{g2}) = \varepsilon_2$$

$$+ \varepsilon_1 (1 - \varepsilon_2) (1 - \sum_{l=0}^{N} {}_{N}C_l P^2)$$

$$+ (1 - \varepsilon_1) (1 - \varepsilon_2) \times$$

$$[1 - (1 - \varepsilon_1) P_{ns}]$$

$$(11)$$

3 世代目以降についても , 上述と同様に求めることで , それぞれ新たな  $\gamma_{gn}$  を導出することができる .

以上で得られた  $(1-\gamma_{gn})$  を用い,各世代における有効 増殖数  $\nu$  と  $(1-\gamma_{gn})$  との積を,世代数分だけ和をとるこ

とにより,探索可能解個数  $ext{NSS}$  が (12) 式のように求められる.

$$NSS = \sum_{j=0}^{G-1} \nu (1 - \gamma_{gj})$$
 (12)

### 5 実験結果

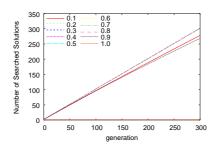
突然変異率  $Pm=(0.1-1.0)(図\ 1)$  , Pm=(0.0-0.09)(Z) としたときの , シミュレーションでの探索解個数と , 従来研究 [1] , 本研究それぞれにおける NSS 値の推移を図 1 , 2 に示す . シミュレーションでは , 生成された染色体をすべてデータベースに登録し , 新たに生成された染色体が , 過去に探索された染色体と重複しているかどうかの照合をとることで , 累積探索数を求めた . 図は , これを 500 回試行行ったときの平均値で示してある .

図 1(a)(b),図 2(a)(b) を比較すると,従来研究における NSS 値は,パラメータの値による優劣関係はほぼ得られているものの,その推移の仕方や,探索数そのものについては,まったく一致していないことがわかる.それに対し,本研究で導出した NSS 値については,わずかな誤差はあるものの,推移形状,そして探索数そのものの値についてまで,ほぼ完全に一致していることがわかる.

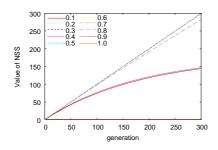
本稿で述べた染色体間重複による能力減衰率  $\gamma_{gn}$  では,4 節における第 2 世代目 (c) で示した,解改善が起きない確率を割合として用いている部分に,完全ではない部分が存在しているものの,現段階では,ほぼ完全にその導出に成功していると考えられる.

## 6 まとめ

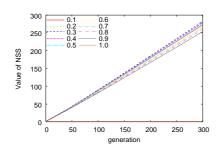
本研究では,進化アルゴリズムの理論的な検証を目的として,EA の探索性能を,それらのパラメータを用いて理論的に定量化することを試みた.本稿では,本目的に対して,従来研究である探索可能解個数 (NSS) の再考察を行うにあたり,最も単純化された問題,及び探索手法を設定し,NSS 式の一部である世代間染色体重複による能力減衰率 $\gamma_g$  に焦点を当て,その改良を試みた.さらに,本問題設定における染色体の評価値の推移及び解改善確率を用いた新しい視点での $\gamma_{gn}$  を再導出した.解改善確率を用いた新しい視点での $\gamma_{gn}$  を再導出した.より,本稿で示した世代間染色体重複による能力減衰率 $\gamma_{gn}$  が改善され,完全ではないものの,正しい式が導かれたことを明らかにした.



#### (a) シミュレーション結果



(b) 従来研究 NSS 値



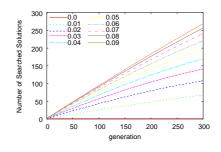
(c) 提案 NSS 値

図 1: 探索解個数の比較 (突然変異確率  $P_m=(0.1-1.0)$ ) 図 2: 探索解個数の比較 (突然変異確率  $P_m=(0.0-0.09)$ )

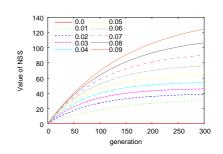
今後はさらに,本問題設定により NSS 式の再考察を 進めていく予定である.今回既知であるものとして理論 値を用いた解改善確率  $arepsilon_n$  や,今回検討に到らなかった 同一遺伝子変更による能力減衰率  $\gamma_p$  , そしてそれらの 組み合わせにより得られる探索可能解個数 NSS や,有 効解改善個数 (Number of Improved Solutions: NIS) に ついても検討を行い,再導出を行っていく.

次に,複数の染色体としたときの NSS 式の導出,淘 | 汰・増殖 , 交叉の導入といった順で , NSS 式の拡張を目 指す.

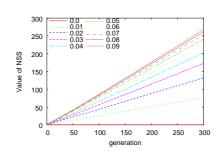
最後に,問題(コーディング方法)に応じたエピスタ シスの導出,ならびにエピスタシス以外のパラメータの 検討を行い, 本手法が進化アルゴリズム適用に際する性 能評価としての一般的なベンチマーク手法として確立さ れることを目指し,本手法を発展させていきたい.



(a) シミュレーション結果



(b) 従来研究 NSS 値



(c) 提案 NSS 値

## 参考文献

[1] 山本 康高, 吉川 大弘, 古橋 武, 篠木 剛, 鶴岡 信治, "バクテリア型進化的計算における分割幅導出法", 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.SIG 10 (TOM 7), pp.119-129, 2003

#### 問い合わせ先

〒 514-8507 三重県 津市 上浜町 1515 三重大学工学部電気電子工学科 吉川 大弘

TEL. (059)231-9737 FAX. (059)231-9737

E-mail: tom@elec.mie-u.ac.jp

# 自動グループ構成手法 ADG による GNP を用いた協調行動の生成

# **Emerging Multi-Agent Cooperation By Genetic Network Programming** with Automatically Defined Groups

中村 貴志

Takashi Nakamura 関西大学大学院総合情報学研究科

Graduate School of Informatics, Kansai University

村田 忠彦

Tadahiko Murata 関西大学総合情報学部

Faculty of Informatics, Kansai University

**Abstract:** In this paper, we propose Genetic Network Programming (GNP) Architecture using Automatically Defined Groups. GNP is a kind of new evolutionary method inspired from Genetic Programming (GP). While GP has a tree architecture, GNP has a network architecture with which an agent works in the virtual world. Because only one network architecture is evolved for every agent in the previous works, each agent moves in the same way. In this paper, we apply a co-evolution method called Automatically Defined Groups (ADG) to evolutionary process of GNP so that several GNP architectures are evolved in order to promote multi-agent cooperation. Simulation results on multi-agent cooperation problem show that GNP architecture with the ADG evolve appropriate roles for the problem.

#### 1. はじめに

マルチエージェントによる問題解決に対して,エージェントの行動規則を進化的計算手法により獲得する試みが行われている.平澤らにより提案された遺伝的ネットワークプログラミング(GNP: Genetic Network Programming) [1,2]は,遺伝的プログラミング (GP: Genetic Programming) [3]の枠組みを元に考えられた進化的計算手法である.GNPでは,GPで木構造によって表現されているエージェントの行動規則を,ネットワーク構造により表現する.この GNP は,エージェントの行動の流れを表現することができ ,過去の状況を含めた行動決定を行うことができる.蟻の行動進化問題[1]と荷物搬送問題[4]に対して,GNPが GPよりも優れた行動規則を探索できることが示されている[1,5].

従来の GNP[1,2,5]では, すべてのエージェント が,同一のネットワークを行動規則として用いる Homogeneous のモデルであった.これに対して, 本研究では原らによる自動グループ構成手法 (ADG: Automatically Defined Groups) [4]の枠組み を適用することを提案する.マルチエージェント において行動規則を考えるときには, すべてのエ ージェントで同じ行動規則の Homogeneous と,各 エージェントがそれぞれ異なる行動規則を持つ Heterogeneous が考えられる .Homogeneous と比べ て Heterogeneous の性能の方がよくなると考えら れるが,その反面,エージェントの数が大規模に なると行動規則の探索領域の増大により探索効率 が悪化してしまう . ADG では , エージェントをい くつかのグループに分け、そのグループ内では同 じ行動規則を用いることで探索領域を縮小させて

いる.文献[4]においては,GP を用いて行動規則を獲得している.本研究では,GNPの行動規則の獲得に ADG を適用し,荷物搬送問題を用いて,その有効性を示す.

#### 2. 提案手法

#### 2.1 遺伝的ネットワークプログラミング(GNP)

GNPは行動規則を表現するのに、判定ノードと処理ノードをリンクによってつないだネットワーク形状を用いる.エージェントの行動は、、へくことによって行われることになる.判定ノードを選れて次に活性化するノードを選択して次に活性化するノードを選択してが行われる.ノード間をつなぐリンクを持つれる.ノードは分岐の数に応じたリンクを持ち、処理ノードや処理ノードへの1。遺伝いるが行われる.これらのリンクの接続先を、処理ノードは次の判定ノードや処理ノードへの1。遺伝いたより変更させることで解を更新していく

#### 2.2 自動グループ構成手法(ADG)

ADGでは、エージェントを同じ行動規則を参照するグループに分割する.これにより、対象問題におけるエージェントの役割分担を形成することができる.グループの構成は、進化的に獲得される.実際には、遺伝的操作の中で、交叉とグループ突然変異によってグループへの操作を行う.変叉操作は、エージェント集合の中から任意に選んだエージェントが参照するグループを対象にして行う.グループに属するエージェント集合の関係に応じて、グループの分割、統合を行った後に、そのグループの持つ行動規則に対して通常の交叉

操作を施す.グループ突然変異では,グループ突然変異率という確率で,任意に選んだエージェントを任意のグループに移動させる.ただし,選択された移動先が現在のグループならば,グループを分割する.

#### 2.3 提案手法(GNP with ADG)

本研究では, GNPに ADG を適用することによ り,エージェントの役割分担を持った行動制御プ ログラムを獲得することを試みる .GNP の各個体 は、いくつかのネットワークを持ち、それぞれが 異なるグループで利用されることになる.遺伝的 操作として,交叉,グループ突然変異,突然変異 を用いる . 交叉では , ADG の交叉操作により各グ ループに属するエージェントが決定した後に, GNP の交叉によりグループの持つネットワーク が更新される .グループ突然変異は ,ADG での操 作を用いた、突然変異操作は、各グループの持つ ネットワークのすべてのリンクに対して,突然変 異率にしたがって,任意のノードへのつなぎ変え を行う、各エージェントの行動は、それぞれの所 属するグループが持つ GNP のネットワークによ り制御する.

#### 3. 実験

#### 3.1 実験条件

提案手法を,原らの設計した荷物搬送問題[4]に適用する.この問題は,重い荷物と軽い荷物の重さの異なる2種類の荷物を能力の異なるエージェントによって搬送させるものである.適応度は,重い荷物を5点,軽い荷物を1点としたときのゴールに運び込んだ荷物の総得点としている.実験の規定ステップ内では,荷物の置き場とゴールの間を,3 往復することが限界となるので,エージェント数と荷物の点数配分により120が最大適応度となる.

#### 3.2 実験結果と考察

提案手法(GNP with ADG), Homogeneous, Heterogeneousのそれぞれの実験結果を図1に示す. この図は,100回の実験に対して世代ごとの最大適応度を平均したものである.

Homogeneous では,エージェントの能力の違いに関係なく同じネットワークを参照するため,最適な行動になることは困難であった.一方, Heterogeneous では,全てのエージェントの行動規則が異なるため,探索領域が広くなり,500世代内では最適な規則を得ることはできなかった.これらに対して提案手法では,エージェントをグループ化することで,Heterogeneousより効率的に,役割分担を含めた性能の良い行動規則を得られて

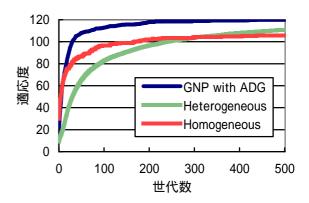


図1 荷物搬送問題における適応度の変化

#### いる.

#### 4. おわりに

本研究では,GNP に対して ADG を用いることを提案し,荷物搬送問題によってその有効性を示した.GNP の行動規則をグループ化することにより,エージェントの特徴に応じた行動規則を獲得することができた.今後は,様々な条件の異なる問題に提案手法を適用し,有効性を示していく必要がある.

#### 参考文献

- [1] 平澤宏太郎 ,大久保雅文 ,片桐広伸 ,胡敬炉 , 村田 純一:"蟻の行動進化における Genetic Network Programming と Genetic Programming の性能比較",電気学会論文誌 C , 121 , 6 , pp.1001-1009 , 2001.
- [2] 片桐広伸,平澤宏太郎,胡敬炉,村田純一: "Genetic Network Programming とそのマルチ エージェントシステムへの応用",電気学会論 文誌 C, 122, 12, pp.2149-2156, 2002.
- [3] 伊庭斉志:"遺伝的プログラミング入門",東京大学出版会,2001.
- [4] 原章,長尾晴:"自動グループ構成手法 ADG によるマルチエージェントの行動制御",情報 処理学会論文誌,41,4,pp.1063-1072,2000.
- [5] 中村貴志,村田忠彦:"遺伝的ネットワークプログラミングを用いた協調行動の生成",日本知能情報ファジィ学会 ECOmp 研究部会 2003年度研究発表会,1,pp.1-5,2004.

#### 連絡先:

村田 忠彦

関西大学 総合情報学部

〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1

Phone: 072-690-2429 Fax: 072-690-2491

E-mail: murata@res.kutc.kansai-u.ac.jp

# GA を用いた看護師勤務表自動生成手法に基づく 人員増強策提案システム

Restructuring Plan for Nurse Office Using GA-based Nurse Scheduling Method

板井 良太
Ryota Itai

関西大学大学院総合情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kansai University

村田 忠彦 Tadahiko Murata 関西大学総合情報学部 Faculty of Informatics, Kansai University

**Abstract:** In this paper, we propose a system that shows a nurse office restructuring plan using GA-based nurse scheduling method. In the nurse office restructuring plan, not only the number of newly employed nurses but also the experience of nurses should be considered. In the proposed system, we assume three experience levels of nurses: well-, ordinary-, and less-experienced. We calculate the combinations of the experience level according to the number of newly employed nurses. We implemented computer simulations in the cases that one or two nurses will be newly employed. Simulation results show that employing well-experienced nurses improves the fitness value of the problem.

#### 1. はじめに

看護師スケジューリング問題(NSP: Nurse Scheduling Problem)は,看護師の勤務表を作成する問題である. NSP は病院ごとに異なる制約条件を持つことに加え,看護師にも能力グループ(ベテラン,中堅,新人)があるため,制約条件をすべて満たしたものを人手で作成するには,作成者に多大な負荷をかけることになる.

この負荷を軽減するため,遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)を用いた勤務表作成の研究が報告されている[1,2].文献[2]では,コーディングと遺伝的演算に制約条件を取り入れ,条件を満たしながら個体の進化を行う手法が提案されている.

近年,勤務シフトを変更する病院が増加している[3].そこで,提案手法では,看護師の能力グループ別の増員後の勤務表を提示することにより,病院の人員増強策の策定支援を行う.

#### 2. 人員増強策提案システム

従来手法[2]と同様に,提案手法でも制約条件を絶対条件と,目的条件に分けている.遺伝的演算における個体の評価は,(1)式に示す評価関数を用い,目的関数と重み係数(w)に関しては表1に示す.

$$fitness = w_b f_b + w_h f_h + w_u f_u$$
  $+ w_a f_a + w_R f_R + w_e f_e$  (1)  $w$ : 各目的条件に対する重視度 ,  $\sum w = 10$ 

提案手法では,システム変更にともなう増強 すべき看護師の人数とその能力グループ,増強 後の勤務表を提示する.提案手法では,増強す る人数をグループで場合分けし,従来手法を基 に勤務表を作成する.作成された増強後の勤務 表ごとに式(1)の適応度を計算し、最高適応度の 勤務表を作成者に提示する.これにより作成者 は、どの能力グループの看護師を増強するか決 定することができる.提示された勤務表は、絶 対条件を全て満たし、目的条件の両制約条件を 一番多く満たしている.そのため、提案手法で は、病院に合った勤務表及び、増強グループを 作成者に提示することができる.

シフト変更に伴い,勤務必要人数も変更する ことになる.(2)式を用いて勤務必要人数の増員 数を決定する.

$$AddNumber = N - \frac{2 \times N}{7} - 11 \tag{2}$$

X は日勤の増員人数であり,N は増強後の看護師数である.提案手法では日勤のみ人員数を増やす. 夜勤においては,病院の夜勤者数が平均して2人であることから変更しない[3].

#### 3. 実験

はじめに,看護師の人数の規定値として,AとBグループを5人,Cグループを6人に設定した.増強せずに規定値のみで勤務表を作成したところ,勤務表は全ての絶対条件を満たしていた.

表 1 目的関数とその重み係数

目的関数	重み係数	目的条件	
$f_b$	1.0	勤務の平等配置	
$f_h$	0.8	休みの希望配置	
$f_u$	0.8	夜勤配置の看護師の相性	
$f_a$	0.2	係長・主任の日勤・休みの配置	
$f_R$	0.2	日勤リーダーの連続配置	
$f_e$	0.1	C グループの早出勤務配置	

看護師を1人増強した場合と,2人増強した場 合の勤務表作成を行う、日勤の勤務必要人数も 変わるので,(2)式よりその値を求めると,いず れの場合も 1 人増加される. 看護師増強によっ て生成された勤務表適応度の推移を 1 人の場合 を図1に,2人の場合を図2に示す.図は50回 試行した適応度の平均である.図1から,Aグ ループを 1 人増加するのが最も適応度が高くな っている.これは,A グループの看護師のみが 日勤リーダ(L)を扱えるため、(1)式で計算する評 価関数の値が他のグループを増やした場合より も大きくなるためだと考えられる.C グループ を増強しても適応度は高くなるが ,A グループ を 1 人増強した場合が, C グループを 1 人増強 した場合よりも高いのは,表1より, $f_R$ の重み 係数が f。 よりも大きいためであると考えられる . 2人増強における結果も,1人増強された場合と 同様に A グループを増強した方が適応度は高く なっている.看護師 1 人増強の場合,1 試行 (10000世代×3通り) にかかった時間は約25分で あった.また,2人増強の場合は,1試行あたり 約50分であった.看護師を2人増強した場合に 最も高い適応度を与えた A グループを 2 人増強 した場合の勤務表を図 3 に示す. 増強された看 護師は, A グループの1番下から2人である.

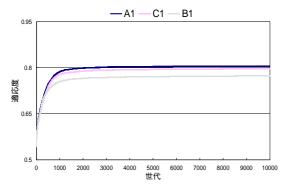


図 1 看護師 1 人増強勤務表の適応度の推移

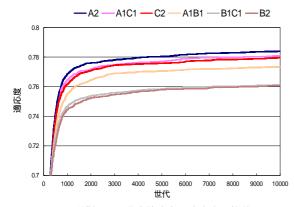


図2 看護師2人増強勤務表の適応度の推移

```
1 2 3 4 5 6 7 8 9 1011 12131415161718 19202122232425 2627282930 夜 休
 木金土日 月火水木金土日 月火水木金土日 月火水木金土日 月火水木金
係 日日休日 日日日日日休休 日日日日日休休 日日日日日休休 日日日休日 0
主 日日休日 日日日日日休休 日日日日日休休 日日日日日休休 日日日休日 0 8
 休準遲L L準日日LL休 日遲準L休深休 休深休日LL深 休L休日遲 6 8
準L深休 日休日日休深休 準早早日LL休 深休L日準遲L 深休日深休 8 8
 L休L早深深深準休休L L休日日日日L 休遅日準休日日 日早深休休
日日日日休 準日日L早休早 遅準休深休休日 準日休日深休準 日休遅L深 7
 早日日日 早日準日準休深 休休遅日深準深 休日遅 L 休準休 L 深休日休 8
A 休日日深 休日日深休日日 日日 L 遅準遅休 L L 深深休休休 準準休準 L 8
A 深深休日 日 L L 日深準休 日 L 深準休休休 日日休遅遅深休 日日 L 日休 7
B 日日日休 日日日日休日遅 日準日深休休日 深休休早準早休 休深準深深 8
 休準日日 休準準日休早深 休深休日遅休準 早日準日日休早 日日休日日 7
 準休準休 休遅日日深深休 日日日日休日日 遅準早日日休休 早準深休日
B 渥深休日 渥早深休日準日 深休日準日深休 日日日日休日日 休休休準日 7
B 休日深準 休日遅深休日準 早休日日日早日 準休休日日準日 深休休日準 8
 休遅日日 日日早準日休日 深休日休日休遅 休日準準早日準 休遅早日休 5
 日早進深 準日日曜日日休 日日日休準日準 休日日休深休遅 日休日休休 6 8
 日休日休 日深休休遅日日 休日日早深準深 休準日日休日日 遅休準日早 6
 休日早準 休日日早休遅休 準深深休早日日 休日休日日深深 休日日日日 6 8
 休日休遅 深休休日日休日 日日準日休日日 日早深深休日日 準日休早日 5
 深休日日 休日日日準日準 日日日日日日休早 日深休日日休休 休休日遅準 5
看護師は
A グループを 2人
```

Cグループを 0人 増員するのが最適です

図3 看護師2人増強で生成された勤務表

#### 4. おわりに

本研究では、看護師の人員増強策の策定を支 援するため、能力グループ別に増強した場合の 評価関数値を求め、もっとも高い値を与える勤 務表を提示することにより、人員増強策による 勤務シフトの変化を観察しやすいシステムを構 築した.

#### 参考文献

- [1] 山村雅幸,小林重信,山岸誠,阿瀬始:"遺伝 的アルゴリズムにおけるナーススケジューリ ング",北野宏明 編.遺伝的アルゴリズム(2),
- [2] 川中普晴,山本康高,吉川大弘,篠木剛,鶴 岡信治: "GA を用いた看護婦勤務表の自動生 成~制約条件を取り入れたコーディング法と 遺伝的演算~",電気学会論文誌 C分冊, Vol. 122, No. 6, pp. 1023-1032, 2002.
- [3] 星野佳子:"勤務交代制の現状と変革の可能 性",看護展望,メヂカルフレンド社, Vol. 28, No. 7, pp. 17-21, 2003.

#### 連絡先

村田 忠彦

関西大学 総合情報学部

〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1

TEL: 072-690-2429 FAX: 072-690-2491

E-mail: murata@res.kutc.kansai-u.ac.jp

# 共生進化ウイルスを用いた遺伝的アルゴリズムの提案と そのウイルス学習

A Proposal of Genetic Algorithm Using Symbiotic Evolutionary Viruses and Its Virus Learning

1 坂倉義明

1 谷口典之

2星野孝総

2 亀井且有

Yoshiaki Sakakura

Noriyuki Taniguchi

Yukinobu Hoshino

Katsuari Kamei

<sup>1</sup> 立命館大学大学院 理工学研究科 Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan Univ.

<sup>2</sup> 立命館大学 情報理工学部 知能情報学科 Ritsumeikan Univ.

Abstract In this paper, we propose a Genetic Algorithm (GA) using symbiotic evolutionary viruses. Our GA is based on both the building block hypothesis and the virus theory of evolution. The proposed GA aims to control a destruction of building blocks by discovery, maintenance, and propagatinon of building blocks based on virus operation. We prepare the group of individuals and the group of viruses. The group of individuals searches solutions and the group of viruses searches building blocks. Furthermore, we applied the proposed GA to the minimum value search problem in test function. We also discuss the search behavior and the search efficiency of our GA.

#### 1 はじめに

筆者らはこれまで, 共生進化ウイルスを用いた GA を 提案してきた [1][2]. 提案手法は, GA の積木仮説 [3] と ウイルス進化論 [4][5] に着想を得たアルゴリズムである. 提案手法は個体集団とウイルス集団の共生関係にもとづ く遺伝演算により,積木の探索・保持・伝播を行う.本 提案手法のようなスキーマベースの演算を行う手法は、 個体集団中の積木を保持する手法 [6]-[9] と, 個体集団と 別枠で積木の探索・保持を行う手法 [10]-[11] の 2 種類に 大別することができる.前者は後者に比べて積木の保持 性が低い反面,演算頻度が少ない.一方,後者は前者に 比べて積木の保持性が高い反面,演算頻度が高い.本手 法は,後者に分類される.後者に分類される他の手法と しては, 久保田らの手法 [10] と半田らの手法 [11] が上 げられる.これらの手法では,遺伝子の組合せをあらか じめ複数個用意し,それらの学習,淘汰により積木の探 索を行っているが,本提案手法では,オーダが1のウイ ルスを用いて学習によりこれらを組合せながら積木の探 索を行う点が異なっている.

本稿では,提案手法を関数の最小値探索問題に適用する.そして,ウイルスによる積木の探索・保持・伝播について検証する.

# 2 共生進化ウイルスを用いた遺伝的 アルゴリズム

#### 2.1 提案手法の枠組み

提案手法は,積木仮説およびウイルス進化論に着想を 得たアルゴリズムである.基本的には,解候補として表 現される個体集団と個体の部分的な遺伝情報をもつウイ ルス集団で構成される.そして,これら 2 集団の共生関係にもとづき,積木の探索,保持,個体集団への積木の伝播を行う.提案手法において,ウイルス集団は自らを個体へ伝搬し,そのときの個体の適応度変化にもとづき積木を探索,保持する.それと同時に個体集団は従来型 GA による解探索を行う.ここで,従来型 GA では交叉により積木が破壊される可能性があるが,提案手法では,ウイルス集団が積木を保持,伝播しているため,積木の破壊が起こりにくいと考えられる.また,積木の破壊が起こりにくいと考えられる.また,積木の破壊が起こりにくいと考えられる.また,積木の破壊が起こりにくいと考えられる.また,積木の破壊が起こりにくいと考えられる.また,積木の発見だけでなく,個体集団が発見できない積木の発見が期待できる.

次に,提案手法の演算手順について説明する.まず,何らかの形で生成された個体を評価し,それら個体集団中の任意の個体に対し,感染を行う.その後,個体集団に対し,選択,交叉,突然変異を行い次世代の個体群とする.

#### 2.2 感染操作

#### 2.2.1 ウイルスの構成

提案手法では、ウイルスは遺伝情報および遺伝子座情報を持つ、遺伝情報は1ビットのバイナリコードで表現され、個体の一部分となることができる、遺伝情報の種類数は、個体のコーディングに依存する、提案手法は、解候補をバイナリで表現できる問題への適用を行っているため、ウイルスの持つ遺伝情報は0もしくは1となる、また、遺伝子座情報はウイルスが感染することのできる個体の遺伝子座をあらわす、遺伝子座情報の種類数は個体の遺伝子長と同様になる、ウイルスはこれら2種の情報にもとづき感染を行う、また、このように構成される

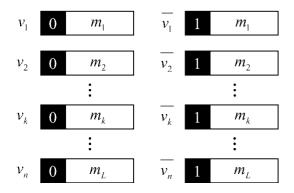


Fig. 1 Sets of viruses.

ウイルス集団を  ${
m Fig.}~1$  に示す.ここで,異なる遺伝情報をもち,その遺伝子座情報  $m_L$  が同様のウイルスを対立ウイルスと呼び,それぞれを  $v_k,\overline{v_k}~(k=1,2,\cdots,L)$ とする.なお,L は個体の遺伝子長となる.

#### 2.2.2 感染手順

提案手法における感染操作の演算手順を  ${
m Fig.2}$  に示す。まず,ウイルスが感染させる個体をランダムに選択する.個体が選択されると,その全ての遺伝子座に対しウイルス選択,伝播を行い,それらが終了した後にウイルス評価を行う.そして,決められた感染個体数を満たせば感染終了とする.ここで,ウイルス選択は対立ウイルス間ごとに行われるものとし,世代 t におけるウイルス  $v_k$ の選択確率  $P^t[v_k]$  は  ${
m Eq.}$  (1) となる.

$$P^{t}[v_{k}] = \left[1 + \exp\left\{-\left(\frac{d_{k}^{t}}{T}\right)^{2}\right\}\right]^{-1} \tag{1}$$

 $d_k^t = y_k^t - y_{\overline{k}}^t$ 

ただし,

T: 温度定数,

 $y_k^t$ :世代 t における,ウイルス  $v_k$ の評価値, $y_k^t$ :世代 t における,ウイルス  $v_{\overline{k}}$ の評価値.

このとき , ウイルス  $\overline{v_k}$  の選択確率は ,  $\mathrm{Eq.}\ (2)$  で与えられる .

$$P_t[\overline{v_k}] = 1 - P_t[v_k] \tag{2}$$

ここで, $d_k^t$  の大きさはウイルス  $v_k$  および  $\overline{v_k}$  の学習度合いと考えることができる.そのためウイルス選択確率の決定に  $d_k^t$  を用いることにより,学習が十分なウイルスとそうでないウイルスに対し,各々のウイルスの学習度合いに合わせた選択確率を与えることが可能である.さらに, $d_k^t$  を温度定数 T で除すことにより,問題にあわせた選択確率を実現する.また,ウイルス  $v_k$  は全てのウイルス感染終了時に評価値  $y_k^t$  を得る.これは感染による個体の適応度変化量に依存し,世代毎に更新され

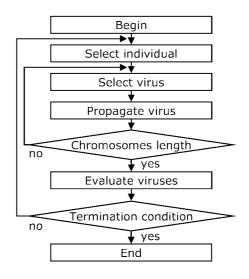


Fig. 2 Procedure of virus infection in Fig. ??.

る.世代 t+1 におけるウイルス  $v_k$  の評価値  $y_k^{t+1}$  は  $\mathrm{Eq.}\ (3)$  で与えられる.

$$y_k^{t+1} = y_k^t + \frac{\sum_{m \in S} (fitness(\boldsymbol{x}') - fitness(\boldsymbol{x}))}{\#\{S\}}$$
 (3)

ただし,

 $y_k^t$ : 世代 t における,ウイルス  $v_k$ の評価値,

S: ウイルス  $v_k$ に感染させられた個体の集合,

 $oldsymbol{x}'$ :ウイルス $v_k$ による感染後の個体,

x: ウイルス  $v_k$ による感染前の個体 ,

fitness(x'): 個体x'の適応度,fitness(x): 個体xの適応度.

## 3 数值実験

#### 3.1 実験環境

本稿では、提案手法の挙動と有用性を検証するために、いくつかの関数の最小値探索問題に対して、数値実験を行う、そして、SimpleGA(SGA)との比較考察を行い、提案手法の挙動、性質、有効性について述べる、使用する関数はSchwefel 関数である、これを Eq. (4) に示す、

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{n} -x_i \sin\left(\sqrt{|x_i|}\right)$$

$$(-512 \le x_i < 512)$$

$$min(f(\mathbf{x}))$$

$$= f(420.968750, \dots, 420.968750)$$

$$= -418.98288727 \cdot n$$
(4)

Table 1 GA parameters in experiments.

Population size	100
Gene length	100
Cording	Gray cording
Crossover method	Two point crossover
Crossover rate	0.9
Mutation method	Bit reverse
Mutation rate	0.0005
Termination condition	1000 generations
Number of individuals infected	1
Temperature $T$	0.1

なお,Schwefel 関数は最適解を探索領域の境界付近に持ち,最適解近傍に準最適解が存在しない多峰性関数である.n は次元数を表す.本稿では,n=10 とした.

#### 3.2 実験手順

Schwefel 関数の最小値探索問題に使用するパラメータを Table 1 に示す.ここで,Number of individuals infected とは,一世代において感染させられる個体の数である.これを 1 とすることで,探索初期段階におけるウイルスによる個体集団内の積木の破壊を抑止する.なお,これらは試行錯誤的に決定した.次に,適応度関数について関数が取り得る最大値を  $f_{max}$ ,最小値を  $f_{min}$ ,個体 (入力) x に対する関数値を f(x) とするとき,個体 x の適応度 fitness(x) は Eq. (5) とした.

$$fitness(\mathbf{x}) = \frac{f_{max} - f(\mathbf{x})}{f_{max} - f_{min}}$$
 (5)

Eq. (5) より,f(x) の値が小さいほど,fitness(x) は大きくなり,その値域は  $0 \le fitness(x) \le 1$  となる.本稿では,このようなパラメータを用い,10 試行の実験を行った.以下に示す結果は,断りがない限り,これら10 試行の平均とする.

#### 3.3 結果と考察

#### 3.3.1 解探索に関する考察

GA により得られた最良値推移を,Fig.~3 に示す.ここで,探索初期段階では,SGA と提案手法ともに,同様の最良値推移を示している.そして,探索が進むにつれ,SGA に比べ,提案手法がより良い最良値を得ていることがわかる.また,最適解と探索によって得られた最良値の距離の推移を,Fig.~4 に示す.この距離は,最適解の各次元の入力変数  $x_i^{opt}$  と,探索で得られた最良値の各次元の入力変数  $x_i$  との差の絶対値の総和を表す.

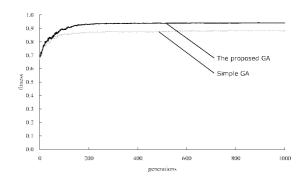


Fig. 3 Experiment results.

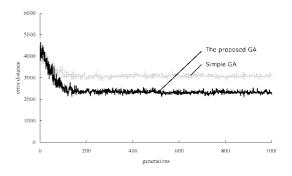


Fig. 4 Error distances.

これを, Eq. (6) に示す. なお, n は次元数である.

$$d(\boldsymbol{x}^{opt}, \boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{n} |x_i^{opt} - x_i|$$
 (6)

Fig. 4より,最良値推移と同様に探索初期段階ではSGAと提案手法ともに,同様の推移を示している.そして,探索が進むにつれ,SGAに比べ,提案手法がより最適解近傍を探索していることがわかる.これらは,提案手法において,一世代の感染個体数を少なくしたため,探索初期には,解探索に大きな影響を与えなかったと考えられる.しかしながら,探索が進むにつれ,ウイルスの学習により保持された積木が,個体集団に効果的に伝播し,個体集団の初期収束を抑制したと考えられる.

#### 3.3.2 ウイルスの学習に関する考察

ここでは,ウイルスによる積木の保持に関する検証を行う.まず,ウイルスの学習頻度について,対立ウイルス間の評価値の差がTを超えるものは,その対立ウイルス間で選択されるウイルスがほぼ同一になる考える.そこで,評価値の差がTを超える対立ウイルス間でその評価値が大きいほうのウイルスの遺伝情報をT を超えなかったものに関しては,T を超えなかったものに関しては,T を超えなかったものに関しては,T を超えなかったものに関しては,T を超えなかったものに関しては,T を超えなかったものに関しては,T を超えなかったものに関しては,T を超えなかったものに関しては,T を超えなかったものに関しては,T を記言である。T を記言である。T を記言である。T を記言である。T を記言である。T を記言である。T を記言である。T の評価値を

Table 2 Genetic information in virus.

generations	viruses			
10	* * * * * * * * *			
50	11**1****			
100	11101****			
200	111010****			
300	1110101***			

Table 3 Change of genetic information in virus.

generations	viruses		
200	110110****		
220	11*110****		
250	111110****		
300	111*10****		
350	111010****		

保ったまま , その他のウイルスが学習しているのがわか る.これにより,ウイルスは世代を通して積木を評価値 として保持していると考えられる.また, Table 3より, 220世代である対立ウイルス間の評価値の大小関係に逆 転がおこり,感染頻度の高いウイルスに変更があった場 合, それにともない, 300世代でその他の対立ウイルス 間の評価値の大小関係にも逆転がおこっていることがわ かる.これは,あるウイルスが十分な学習,伝播を行っ たのちに,その他のウイルスが,先に学習したウイルス との組合せとして,評価値を更新されたためだと考えら れる . 次に , Schwefel 関数において , 全ての試行で , 探 索終了後の各対立ウイルス間で,評価値の高いほうのウ イルスの遺伝情報を元に個体を作成した.その個体と最 適解を比較したところ,10試行平均として,10入力変 数中 6.4 個が,最適解近傍に存在していた.また,その 中でも5個の入力変数が,最適解を形成する入力変数に なっていることがわかった.これより,ウイルスにより 保持される積木は、最適解を構成する積木となっている ことがわかる.

#### 4 おわりに

本稿では,積木の探索,保持,個体集団への伝播を目的とした,共生進化ウイルスを用いた GA を提案した.そして,関数の最小値探索問題を通して SGA と比較し,解探索における有効性を示した.また,ウイルスが積木を保持し,それを個体集団に伝播することで,初期収束が回避されることを示した.また,遺伝子間の依存関係を考えた際,個々のウイルスは独立に評価される.しかしながら個体群中には,世代を通してウイルス評価値として保持され十分に伝播したウイルスが存在する.よって,それらウイルスとの組合せで,間接的に積木の組合

せを考慮している.そのため,だまし問題やエピスタシス性のある問題等のより遺伝子間の依存関係が複雑な問題を考えた場合,遺伝子間の依存関係を同定し,積木を探索することは困難である.

そこで,今後の課題として,ウイルスの組合せを直接 的にして評価する手法の検討が必要である.さらに,提 案手法をだまし問題やエピスタシス性のある問題,大規 模な組合せ最適化問題等に適用し,提案手法の有用性の 検証が望まれる.

### 参考文献

- [1] Yoshiaki SAKAKURA and Katsuari KAMEI, "A Proposal of GA Using Symbiotic Evolutionary Viruses and Its Adaptative Infection Technique", Proceedings of Joint 1st International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 3rd International Symposium on Advanced Intelligent Systems, CDver., 24Q1-1 (2002).
- [2] Yoshiaki SAKAKURA, Noriyuki TANIGUCHI, Yukinobu HOSHINO and Katsuari KAMEI, "A Proposal of GA Using Symbiotic Evolutionary Viruses and Its Virus Evaluation Technique", Proceedings of the 4th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, 679–682, (2003).
- [3] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison Wesly, (1989).
- [4] 中原,佐川 "進化論が変わる",講談社 (1991)
- [5] 中原,佐川"ウイルス進化論",泰流社 (1989)
- [6] D. E. Goldberg, B. Korb and K. Deb., "Messy Genetic Algorithms: Motivation, Analysis and First Results", Complex Systems, Vol3, 385–408, (1989).
- [7] Georges R. Harik, Fernando G. Lobo and David E. Goldberg, "The compact genetic algorithm", Technical Report, IlliGAL Technical Report, No.97006, (1997).
- [8] G. R. Harik. "Linkage learning in via probabilistic modeling in the ECGA", Technical report, IlliGAL Technical Report, No. 99010, (1999).
- [9] Martin Pelikan, David E. Goldberg and Erick Cantu-Paz.
   "BOA:The Bayesian Optimization Algorithm", Technical Report, IlliGAL Technical Report, No.99003, (1999).
- [10] 久保田直行,福田敏男,"ウイルス進化論に基づく遺伝的アルゴリズムの巡回セールスマン問題への応用",計測自動制御学会論文集,第 34 巻第 5 号, pp.408-414, (1998)
- [11] 半田久志,片井修,馬場則夫,椹木哲夫,小西忠孝,馬場充," 共進化の機構を用いた遺伝的アルゴリズムの提案",計測自動制 御学会論文集第35巻第11号,pp.1438-1446,(1999)

#### 連絡先:

〒 525-8577

滋賀県草津市野路東 1-1-1

立命館大学大学院 理工学研究科

坂倉義明

TEL: 077-561-2807 FAX: 077-561-2807

E-mail: yoshiaki@spice.ci.ritsumei.ac.jp

# 粒度切り替え GA による IEC ユーザインタフェースの改善IEC ファッションコーディネートシステムへの適用

# Improvement of IEC User Interface by Granularity Changing GA Application to IEC Fashion Coordinate System

大崎 美穂(1) 櫻井 敦基(2) 林部 敬吉(2)

Miho Ohsaki Atsuki Sakurai Keikichi Hayashibe

(1) 同志社大学工学部 Faculty of Engineering, Doshisha University

(2) 静岡大学情報学部 Faculty of Information, Shizuoka University

Abstract: This paper proposed to improve the usability of Interactive Evolutionary Computation (IEC) by changing EC search granularity. The proposed method, Granularity Changing GA, searches a search space roughly in the initial convergence stage and finely in the final convergence stage based on the averaged fitness value and the averaged individual distance in each generation. We evaluated the effect of the proposed method on GA convergence by simulations. We then confirmed that it does not worsen the convergence and that it may be contribute to reducing the human evaluation fatigue of IEC. As the future work, we will experimentally investigate its performance to improve IEC user interface using our IEC fashion coordinate system.

#### 1. はじめに

人の感性を指標とした最適化問題[1]の解法には,知識ベースによる解法,インタラクティブ進化計算 (Interactive Evolutionary Computation; IEC)による解法が考えられる. IEC では,最適化アルゴリズムである EC (主に GA が使われる)が生成した解候補をユーザが直接評価し,このインタラクションを通して最適解を得る.このため,複数の人間から収集したデータと解候補パラメータの対応をモデル化する知識ベースに比べ,個人性や解候補パラメータ間の相互作用を反映しやすいと言われる.しかし,その反面,ユーザの操作疲労や評価のばらつきの問題がある[2].

そこで,本研究では探索の収束状況に応じて GA 探索の 粗さを切り替えることで,IEC のユーザビリティの向上を 図る粒度切り替え GA を提案する.本手法は次の 2 つの観点から評価する必要がある:粒度の切り替えが本当にユーザの負担を軽減するか,粒度の切り替えが GA の探索速度 を低下させないか(人間が楽に操作できても評価回数が増えては意味がないため).前者の実施には具体的な応用問題に対する IEC システムの開発,および,被験者を用いた心理実験が必要であり,後者の実施にはシミュレーションによる通常 GA との比較が必要である.そこで,まず具体的な応用問題として服のコーディネートを取り上げ, IEC ファッションコーディネートシステムを開発し,次にベンチマーク関数を用いて,粒度切り替え GA と通常 GA の性能を比較することにした.

本論文の第2節では IEC ファッションコーディネート システムの開発について述べる.第3節では粒度切り替え GA を提案し,第4節ではシミュレーションによる評価について述べる.最後に第5節で本論文をまとめる.

#### 2. IEC ファッションコーディネートシステム

今回は応用問題として服のコーディネートを取り上げた.その理由は,本問題は誰もが工夫を必要とする身近なものであり,評価基準が流行・個人によって大きく異なる点でIECに適するからである.過去の研究において,我々はすでに,IECファッションコーディネートシステムver.1を開発している[3].本研究では,システムver.1の問題点を解決し機能とデータを追加してシステムver.2を開発した.将来的に,粒度切り替えGAのユーザビリティ向上の性能を心理実験で調べる際には,このシステムver.2を用いる.

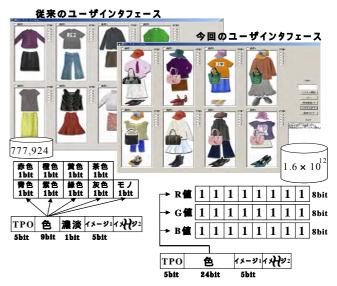


図 1: 新旧 IEC ファッションコーディネートシステムの概要

図1の左に示すように,システム ver.1で扱ったのは, 上服と下服各882枚の組合せという単純な問題だった.このため,組合せ全体の印象を考えず,一方を選んでからもう一方を選ぶユーザが多かった.そこで,図1の右に示すようにアイテムの種類と数を増やし,現実のコーディネート問題に近づけるようにした.具体的には,帽子,靴,鞄の画像各128枚を追加し,組合せ総数を777,924から1.6×10<sup>12</sup>にした.さらに,アイテムの背景を透過し服を自然に重ね合せる提示機能を付加した.

システム ver.1 では,服の色をコーディネートの領域知識に基づき 9 種に分類し[4,5],染色体表現において各色分類に 1bit を割り当てていた.今回は,より細やかに色の違いを探索できるよう,服画像から RGB 値を自動で抽出するデータの前処理機能,および,染色体上の 8bit での RGB 表現を実装した.

#### 3. 粒度切り替え GA の提案

過去の研究で行ったシステム ver.1 の操作実験より,ユーザは,探索前半では漠然としたイメージに基づくおおまかな探索を,探索後半では明確化したイメージに基づく細かな探索を望むことが分かった.そこで本研究では,IECユーザの評価を容易にする手法として,初期段階は探索を粗く,探索がある程度進むと探索を細かくする粒度切り替え GA を提案した.本手法の手続きを図2に示す.

提案手法の探索の粒度調整では,最も細かい粒度で定義した染色体の下位ビットを探索前半では無視し(粗い探索),探索後半で復活させる(細かい探索)ことにした.切り替えのタイミングは,以下の2つの基準を満たした世代とした.1)評価値の平均値が閾値以下,2)探索点間の距離の平均値が閾値(探索領域の一定割合)以下.これらの閾値は応用問題における領域知識で決める.

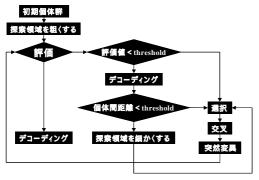


図 2: 粒度切り替え GA の演算手続き

#### 4. 粒度切り替え GA の探索性能の評価

提案手法によってユーザが IEC を操作しやすくなって も、解の探索性能が低下しては結果的に評価回数が増え、 ユーザの負担が増えてしまう.そこで,GAのベンチマーク関数である DeJongF2 関数,Ackley 関数,ガウス関数和を用い,提案手法と通常 GAの探索性能を比較した.GA演算のパラメータは IEC に一般的な値(個体数10,突然変異率8%,交叉率8%,世代数40)とし,100回シミュレーションの平均収束曲線を得た.粒度切り替えの閾値として,評価値の平均には最高点の50%,距離の平均にも探索空間の50%を用いた.

図3にAckley 関数を用いたシミュレーションの結果を示す. 粒度切り替えのタイミング決定に平均評価値・平均距離のどちらを使うかに関わらず,提案手法の性能が通常GAと同等以上であった. 他の関数でも同様の傾向が得られ, 粒度切り替えが探索を低下させないことが分かった.

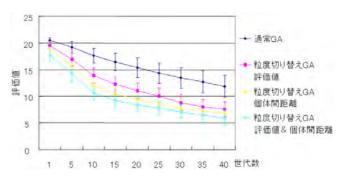


図 3: Ackley 関数を使ったシミュレーションの結果

#### 5. まとめと今後の展望

IEC ユーザの負担軽減のため、収束に伴いおおまかな探索から細かな探索に粒度を切り替える GA を提案し、シミュレーションによって、粒度切り替えは探索性能を低下させないと確認した、今後は、開発した IEC ファッションコーディネートシステムを用い、心理実験によって提案手法のユーザビリティ向上効果を調べたい、

#### 参考文献

- [1] 長町三生: 感性工学 感性をデザインに活かすテクノロジー . 海文堂, 1988
- [2] 高木英行, 畝見達夫, 他: 対話型進化計算法の研究動向. 人工知能学会誌, vol.13,no.5, pp.692-703,1998
- [3] 田中誠, 大崎美穂, 他: IEC ファッションコーディネートシステムの構築と評価. 第 18 回 FSS, pp.207-210, 2000.
- [4] 大沼敦, 萩原昭典, 他: ファッション辞典. 文化出版局,2001
- [5] 日本色彩学会: 新編色彩科学ハンドブック(第2版). 1998

#### 【連絡先】

〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3 同志社大学工学部情報システムデザイン学科 大崎美穂 TEL, FAX:未定 E-mail: mohsaki@mail.doshisha.ac.jp

# 加速度センサを用いた移動カメラ画像の補正

Compensation for moving camera images using acceleration sensors

橋山 智訓 Tomonori HASHIYAMA 矢野 良和 Yoshikazu YANO 田野 俊一 Shun'ichi TANO

電気通信大学

名古屋大学

電気通信大学

University of Electro-Communications

Nagoya University

University of Electro-Communications

**Abstract:** We have developed active frame subtraction systems for eliminating backgrounds of sequential images taken from moving camera. These subtractions are carried out by finding the difference among frame images using a gyro-sensors. These systems are applied to detect the pedestrian from the images obtained by the vehicle cameras. In this paper, we introduce to implement these systems on the autonomous mobile robots. This paper shows the outline of these implementations.

#### 1. はじめに

近年のコンピュータの性能向上に伴い、計算 量が多く、実時間処理が困難であった様々問題 を実時間で処理できるようになってきた。特に 画像処理に関する発展が著しい。特に動画像中 から人物を抽出し、追跡することはセキュリテ ィシステム等、様々な応用が考えられる。 Pfinder[1]は頭、胴等を楕円近似した Blob を用い モデル化する事で人物抽出を行っている。また、 Ptracker[2]ではparticle fileterを用いて移動ロボッ トが人物を追跡可能なシステムを構築している。 これらの手法はいずれも従来の画像処理を工夫 して、システムを実現している。これに対し、 筆者らはこれまでに、座標変換による補正を用 いることで、車載カメラから撮影された動画像 中の移動物体として歩行者を抽出する手法につ いて検討してきた[3]。本手法は加速度センサの 値から、カメラの移動距離および方向を求め、 座標変換により補正するものであり、計算量が 他の画像処理手法と比較して少なく、実時間処 理に適している。同様に、移動カメラの加速度 を用いた座標変換による画像処理手法が提案さ れているが、主として三次元形状復元を目標と している[4]。本稿では、筆者らの提案手法を紹 介し、移動ロボットへの実装について簡単に述 べる。

#### 2. 動的フレーム間差分

#### 2.1. 座標系の定義と座標変換

本稿では、図 1 に示す 2 種類の座標系を用いる。一つはカメラに固定されたカメラ座標系であり、右肩の添字 c にて表す。もう一つは、カメラの光軸方向に f だけ離れた場所に位置する画像平面座標系であり、右肩の添字 i にて表すこととする。

時刻 t におけるカメラ座標系を  $O_t^c - Z_t^c Y_t^c Z_t^c$  とする。 $Z_t^c$ は光軸方向を向いている。この座標

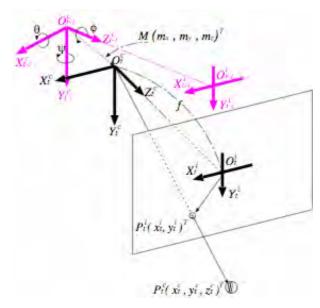


図1座標系

系 で 見 た あ る 物 体 P の 位 置 ベ ク ト ル を  $P_t^c = (x_t^c, y_t^c, z_t^c)^T$  で表す。また、時刻 t における 画像平面座標系を  $O_t^c - X_t^c Y_t^c Z_t^c$  とする  $P_t^c$  から 画像平面へ写像された点を  $P_t^i = (x_t^i, y_t^i)^T$  とする。

 $P_t^c$ から $P_t^i$ への投影が透視投影とすると、 $P_t^c$ から $P_t^i$ への写像は

$$\begin{vmatrix} x_t^i \\ y_t^i \end{vmatrix} = \frac{f}{z_t^c} \begin{vmatrix} x_t^c \\ y_t^c \end{vmatrix} \tag{1}$$

で与えられる。

同様に $P_{t-1}^c$ から $P_{t-1}^i$ への写像は

$$\begin{bmatrix} x_{t-1}^i \\ y_{t-1}^i \end{bmatrix} = \frac{f}{z_{t-1}^c} \begin{bmatrix} x_{t-1}^c \\ y_{t-1}^c \end{bmatrix}$$
 (2)

で与えられる。

物体 P が静止物体であるとき、 $P_t^c$ と  $P_{t-1}^c$  の間の座標変換は、相対回転行列 R と相対並進行列

Mを用いて

$$R = \begin{bmatrix} c_{\phi}c_{\psi} - s_{\phi}s_{\theta}s_{\psi} & -s_{\phi}c_{\theta} & c_{\phi}s_{\psi} + s_{\phi}s_{\theta}s_{\psi} \\ s_{\phi}c_{\psi} + c_{\phi}s_{\theta}s_{\psi} & c_{\phi}c_{\theta} & s_{\phi}s_{\psi} - c_{\phi}s_{\theta}c_{\psi} \\ -c_{\theta}s_{\psi} & s_{\theta} & c_{\theta}c_{\psi} \end{bmatrix}$$

$$\cdot \cdot \cdot (4)$$

$$M = \left(m_x, m_y, m_z\right)^T \tag{5}$$

$$\begin{cases} s_{\alpha} = \sin \alpha \\ c_{\alpha} = \cos \alpha \end{cases} \tag{6}$$

で記述できる。ここで、 $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ はそれぞれ座標系  $O_{t-1}^c - X_{t-1}^c Y_{t-1}^c Z_{t-1}^c$ から見たカメラのロール角変化量,ピッチ角変化量,方位角変化量である。 $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ は、ジャイロセンサを用いて計測する。

また、時刻 t-1 と時刻 t の間の時間は微小であるためその間観測系は直線運動をしているものとし、M は、速度と角度変化量を用いて計算で求まる。

# 2.2. 観測系の運動を補償したフレーム間 の差分

式(1)  $\sim$  (6) より、物体 P が静止物体であるとき、 $P_{t-1}^i$  は  $P_t^i$  及び  $\mathcal{Z}_t^c$  の関数として次式のように表現できる。

$$\begin{cases} x_{t-1}^{i} \left(x_{t}^{i}, y_{t}^{i}, z_{t}^{c}\right) = \frac{\left(R_{11}x_{t}^{i} + R_{12}y_{t}^{i} + R_{13}f\right)z_{t}^{c} + fm_{x}}{\left(R_{31}x_{t}^{i} + R_{32}y_{t}^{i} + R_{33}f\right)z_{t}^{c} + fm_{z}} f \\ y_{t-1}^{i} \left(x_{t}^{i}, y_{t}^{i}, z_{t}^{c}\right) = \frac{\left(R_{21}x_{t}^{i} + R_{22}y_{t}^{i} + R_{23}f\right)z_{t}^{c} + fm_{y}}{\left(R_{31}x_{t}^{i} + R_{32}y_{t}^{i} + R_{33}f\right)z_{t}^{c} + fm_{z}} f \\ \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \end{cases}$$

 $R_{ij}$ は式(4)における行列 R の i 行 j 列要素である。  $z_t^c$  はカメラ座標系における物体 P の  $Z_t^c$  座標値、つまり物体 P までの奥行きであるため、その変域は  $z_{th} < z_t^c < \infty$  である。  $z_{th}$  は正の値であり、  $z_t^c < z_{th}$  はカメラの視界に入っていないため考慮しないものとする。もし正確な  $z_t^c$  の値が分かれば、  $P_{t-1}^i$  と  $P_t^i$  の間の関係は一意に定まるが、一般に  $z_t^c$  は未知パラメータである。そのため、  $P_{t-1}^i$  と  $P_t^i$  の間の関係を求めるためには、各画像座標ごとに最適な  $z_t^c$  を推定する必要がある。ところが、  $z_t^c$  は連続値でありかつ無限の変域をもつため扱いにくい。そこで、式(7)から  $z_t^c$  を消去

した式(8),(9),(10)を用いる。

$$A(x_{t}^{i}, y_{t}^{i})x_{t-1}^{i} + B(x_{t}^{i}, y_{t}^{i})y_{t-1}^{i} + C(x_{t}^{i}, y_{t}^{i})f = 0$$
• • • (8)

$$A(x_{t}^{i}, y_{t}^{i}) = (R_{31}x_{t}^{i} + R_{32}y_{t}^{i} + R_{33}f)m_{x}$$

$$-(R_{11}x_{t}^{i} + R_{12}y_{t}^{i} + R_{13}f)m_{z}$$

$$B(x_{t}^{i}, y_{t}^{i}) = -(R_{31}x_{t}^{i} + R_{32}y_{t}^{i} + R_{33}f)m_{y}$$

$$+(R_{21}x_{t}^{i} + R_{22}y_{t}^{i} + R_{23}f)m_{z}$$

$$C(x_{t}^{i}, y_{t}^{i}) = -(R_{21}x_{t}^{i} + R_{22}y_{t}^{i} + R_{23}f)m_{x}$$

$$+(R_{11}x_{t}^{i} + R_{12}y_{t}^{i} + R_{13}f)m_{y}$$
(9)

$$\begin{cases} x_{t-1}^{i} \left( z_{t}^{c} = z_{th} \right) < x_{t-1}^{i} < \lim_{z_{t}^{c} \to \infty} x_{t-1}^{i} \left( z_{t}^{c} \right) \\ or \\ \lim_{z_{t}^{c} \to \infty} x_{t-1}^{i} \left( z_{t}^{c} \right) < x_{t-1}^{i} < x_{t-1}^{i} \left( z_{t}^{c} = z_{th} \right) \end{cases}$$

$$(10)$$

ある静止物体  $P_t^i$ の移動元である点  $P_{t-1}^i$ は、式 (8), (9), (10)で表される線分上に存在することになる。つまりフレーム間で物体の色が変化していないとすれば、  $P_t^i$ における画素値は線分上の座標点の集合  $S\left(x_t^i,y_t^i\right)$ 中のいずれかにおける画素値と一致する。これより、時刻 t-1 , t におけるアクティブフレーム間差分  $F\left(x_t^i,y_t^i\right)$ を、次のように定義する。

$$F_{t}\left(x_{t}^{i}, y_{t}^{i}\right) \equiv \min_{(u,v) \in S\left(x_{t}^{i}, y_{t}^{i}\right)} \left|I_{t}\left(x_{t}^{i}, y_{t}^{i}\right) - I_{t-1}\left(u,v\right)\right|$$
• • • (11)

 $I_t(x,y)$ は時刻 t の位置 (x,y)における画素値である。 $F(x_t^i,y_t^i)$ が大きな値をもつならば、(x,y)は移動物体であるとみなすことができる。そこで、ある閾値  $\alpha$ を設定し、

$$F_t(x_t^i, y_t^i) > \alpha \tag{12}$$

を満たす $P_t^i$ を移動物体領域とみなすことにする。 一方、閾値以下となった $P_t^i$ は静止物体領域をと みなす。

なお通常のフレーム間差分とは異なり、カメラが移動した結果、新たに見えるようになった 物体や物陰に隠れてしまった物体も、移動物体 領域に含まれることになる。

#### 3. 実験結果

#### 3.1. 実験条件

提案手法を用いて走行中車両から歩行者検出 を行なった結果を示す。実験には CCD カメラ (SONY DFW-VL500) と ジャイロセンサ (DATATEC GU3020) を一台ずつ用いた。

CCD カメラからは、640×480 pixel カラー画像を 30frame/sec でキャプチャした。同時にカメラのロール角、ピッチ角、ヨー角変化量を、ジャイロセンサにより計測した。実験には、取得した画像から車体の写り込んだ下側領域を除いた 640×360 の画像を、256 階調のグレー画像に変換して用いた。

図 2 に入力された連続フレーム画像の一例を示す。これは、時速 33km/h で走る車の前方を人が横断している状況である。

まず前処理として平滑化フィルタを適用した後、アクティブフレーム間差分を行なった。結果を図 3(a) に示す。ここで、静止点と認識された背景領域は黒、移動物体領域は白で表されている。差分の閾値  $\alpha$ は 20 に、 $z_{th}$ は 5.0[m]に設定した。処理には Athlon XP 1700+ 上で 0.10[sec/frame]要した。

比較のために同じ閾値を用いて単純なフレーム間差分を行った結果を図 3(b)に示す。



(a) 時刻 t-1



(b) 時刻 t

図2入力画像



(a) 提案手法による差分



(b) 単純なフレーム差分

図3 フレーム差分の結果

図 3 より提案手法では、道路を横断している人物だけが抽出できている事が分かる。背景の木の葉の周辺で移動物体領域が散在しているのは、風などによって木々が実際に揺れている場合と、時刻 t-1 の画像においては隠れていたものが時刻 t において現れた場合の 2 つが混在している。しかしながら、単純なフレーム差分の結果である (b)と比較して、十分無視できる程度であると考えられる。

また、文献[3]では、図 3(a)の結果を用いテンプレートマッチングによる人物抽出の実験を行い、大幅な速度向上をはかる事ができる事を報告した。さらに、文献[5]のアクティブ探索法を利用する事により、本実験と同一プラットホームによる実験で、0.02 [sec/frame]の計算時間でテンプレート照合ができる事が分かった。

#### 4. まとめと今後

本稿では、筆者らが提案している移動カメラから得られる動画像に対する、座標変換による動的フレーム差分について紹介した。提案手法は座標変換をベースとしているため、従来の画像処理手法と比較して計算量が少なく、実時間処理向けであると考えられる。現在、自律移動ロボット上に本システムを実装している。現在自律移動ロボットの位置検出に関する実験を行っており、発表当日には新しい実験結果等を紹介できる予定である。

#### 参考文献

- [1] C. R. Wren, A. Azarbayejani, T. Darrell and A. Pentland: Pfinder: Real-Time Tracking of the Human Body, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 19, No. 7, pp. 780-785, 1997
- [2] D. Schulz, W. Burgard, D. Fox and A. Cremers: Tracking multiple moving targets with a mobile robot using particle filters and statistical data association, In Proc. of the IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA), pp. 1665-1670, 2001
- [3] 望月, 矢野, 橋山, 大熊: 車載カメラによる 歩行者検出のための背景除去及びアクティ ブ探索を用いたテンプレートマッチングの 高速化,電子情報通信学会 D-II, 掲載決定, 2004
- [4] T. Mukai and N. Ohnishi: Sensor Fusion of a CCD Camera and an Acceleration-Gyro Sensor for the Recovery of Three-Dimensional Shape and Scale, In Proc. of the 2nd International Conference on Information Fusion (FUSION'99), pp.221-228, California, USA, July 6-8, 1999
- [5] 村瀬, V. V. Vinod: 局所色情報を用いた高速物体探索 アクティブ探索法,電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J81-DII, No.9, pp. 2035-2043,1998

#### 連絡先:

橋山 智訓

電気通信大学大学院情報システム学研究科

〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1

Phone + Fax: 0424-43-5669 E-mail: hashiyama@is.uec.ac.jp

### ルール統合を用いたファジィクラシファイアシステムとその応用

#### A Fuzzy Classifier System Using Rule Merging Methods and Its Applications

井上 博行

Hirovuki INOUE

福井大学教育地域科学部

Katsuari KAMEI 立命館大学情報理工学部

亀井 且有

Faculty of Education and Regional Studies, Faculty of Information Science and Engineering,

University of Fukui

Ritsumeikan University

**Abstract:** We had presented an automatic generation method for fuzzy systems using hyper-cone membership functions by fuzzy classifier systems. Also, a rule reduction method using rule merging for fuzzy classifier systems was proposed in order to choose the optimum rule number. In this method, however, there exist some problems that highest performance systems are not obtained, and its application is very simple problem. In this paper, we present an improved fitness function for the fuzzy classifier system using the rule merging method, and apply this method to fuzzy rules generation of the inverted pendulum control.

#### 1 はじめに

ファジィルールの自動生成に関する研究は,数多く行われており,様々な成果を見せている.これらの中でも遺伝的アルゴリズム (GA: genetic algorithm) を用いた手法は,ミシガンアプローチとピッツアプローチに大きく分けられる.その中でもミシガンアプローチをファジィルール獲得に応用したファジィクラシファイアシステム [1]-[3] は,ルールを集団の中で進化させるため,自律ロボットの学習などに有効だと考えられる.しかし,進化モデルや報酬の分配法など問題が多い.

筆者らは、超円錐形メンバーシップ関数 (HCMF: hypercone membership function)[4] で表されたファジィシステムを獲得するファジィクラシファイアシステムを提案している。また、ルール数が少ないコンパクトなファジィシステムを得るため、ルール統合を用いる手法も提案している [5][6].しかし、必ずしも精度の高いシステムが得られるとは限らないという問題があった。また、比較的簡単な応用にとどまっていた。そこで本稿では、ルール統合を用いたファジィクラシファイアシステムの最良の結果を選ぶ基準をを見直し、自動車の直線追従走行と倒立振子のファジィルール獲得に応用する。

## 2 超円錐形メンバーシップ関数 (HCMF) を 用いたファジィクラシファイアシステム

本研究では,前件部および後件部のファジィ集合の位置と大きさの決定を含めたファジィルールの自動獲得を,ファジィクラシファイアシステムの枠組みで考える.そこで,超円錐形メンバーシップ関数 (HCMF) で表現したファジィルールを用いることとする.HCMF を用いることにより,入出力空間上に自由にファジィルールを配置することが可能となる.

#### 2.1 HCMF を用いたファジィルール

本手法では,ファジィルール $R^i$ を以下のように表す.

$$R^i$$
: if  $\boldsymbol{x}$  is  $A_i$  then  $\boldsymbol{y}$  is  $B_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  (1)

ここで,i はルール番号,n はルール数を示す.x と y は入出力ベクトルであり, $A_i$  と  $B_i$  はファジィ集合である.ルール  $R^i$  の前件部と後件部のファジィ集合  $A_i$  と  $B_i$  は,それぞれ直接入出力空間上の領域を指すものとする.したがって,ファジィ集合  $A_i$  と  $B_i$  は以下に示す HCMF で表す.

$$\mu_{A_i}: A_i \to [0, 1] \tag{2}$$

$$\mu_{A_i}(\boldsymbol{x}) = \left(1 - \frac{\|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{a}_i\|}{\alpha_i}\right) \vee 0 \tag{3}$$

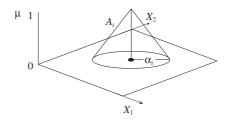


図 1 2 入力の場合の超円錐形メンバーシップ関数

ここで, $a_i$  と  $\alpha_i$  はファジィ集合  $A_i$  の中心座標ベクトルと半径である.このメンバーシップ関数  $\mu_{A_i}$  は,中心  $a_i \in \mathbf{R}^l$  がグレード 1.0 となり,その中心からの距離に比例してグレードが下がる.すなわち, $a_i \in \mathbf{R}^l$  が中心となり,半径が  $\alpha_i$  である超球形をしたファジィ集合である.図 1 に,入力数が 2 の場合の  $\mathrm{HCMF}$  を示す.また,出力空間で定義されるメンバーシップ関数  $\mu_{B_i}$  も同様に定義する.

本ファジィシステムは,n 個のファジィルールが存在するため,入力と出力空間上に n 個の超円錐形メンバーシップ関数が配置される.

次に入力に  $x^*$  が与えられたとき , 出力  $y^*$  を算出する . まず , ルール  $R^i$  の前件部における適合度  $\omega_i$  を求める . メンバーシップ値がそのまま適合度になるので , (3) 式に  $x^*$  を代入し , その値を  $\omega_i$  とする . 次に (4) 式のようなメンバーシップ関数  $\mu_{B_i^*}(y)$  を定義する .

$$\mu_{B_i^*}(\boldsymbol{y}) = \omega_i \wedge \mu_{B_i}(\boldsymbol{y}) \tag{4}$$

このメンバーシップ関数  $\mu_{B_i}{}^*(y)$  の形状は ,  $\mu_{B_i}(y)$  をグレード  $\omega_i$  でカットされた形となる . 各ルールの推論結果の合成である  $\mu_{B^*}(y)$  を (5) 式で求める .

$$\mu_{B^*}(\mathbf{y}) = \bigvee_{i=1}^n \mu_{B_i^*}(\mathbf{y})$$
 (5)

最後に式(6)により非ファジィ化を行(1)、出力値 $(y)^*$ を求める.

$$\boldsymbol{y}^* = \frac{\int_{D_y} \mu_{B^*}(\boldsymbol{y}) \boldsymbol{y} d\boldsymbol{y}}{\int_{D_y} \mu_{B^*}(\boldsymbol{y}) d\boldsymbol{y}}$$
(6)

推論の流れの一例を図2に示す.

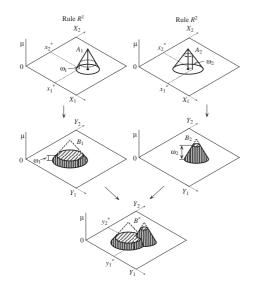


図 2 ファジィ推論の例(2入力,2出力,ルール数2)

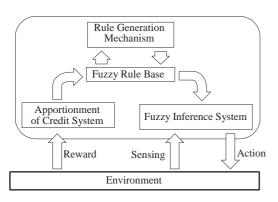


図 3 ファジィクラシファイアシステム

#### 2.2 HCMF を用いたファジィクラシファイアシステム

FCS は , 図 3 に示すように 4 ブロックからなる . 本研究では , HCMF を用いたファジィルールを導入したファジィクラシファイアシステムを用いる . これにより , 適切なファジィルールの配置をファジィクラシファイアシステムで決定する . 各プロックの基本動作を以下に示す .

[Fuzzy Rule Base]

Fuzzy Rule Base では,n 個の HCMF で表されたファジィルールが存在する.

[Fuzzy Inference System]

Fuzzy Inference System では、環境から入力をファジィシステムの入力とし、Fuzzy Rule Base のファジィルールを用いてファジィ推論により環境に対する行動(出力)を決定する。ここでは、2.1 で述べたファジィ推論を行う。

[Apportionment of Credit System]

Apportionment of Credit System は,行動に対して環境から得れる報酬を,各ルールに信頼度として分配する.ここで報酬は,環境に対するファジィシステムの評価であり,信頼度は各ルールに対する評価にあたる.本ファジィクラシファイアシステムでは,適合度が高いルールほど高い信頼度が得られるとする.

本手法では,各ルールへの信頼度  $cf_i$  は,以下の方法で与える.一回の行動を起こす度に,報酬が与えられるものとする.すなわち,1 回のファジィ推論で決定された出力に対して評価が与えられ,その推論においてルールの適合度に応じ信頼度が割り振られる.j 回目のファジィ推論による行動で得られる報酬を, $re_j(j=1,2,\ldots,J)$  とすると,信頼度  $cf_i(i=1,2,\ldots,n)$ 

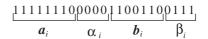


図 4 染色体の例

は次のように与える.

$$cf_i = \sum_{j=1}^{J} \frac{\mu_{ij}}{g_j} \times re_j \tag{7}$$

$$g_j = \sum_{i=1}^N \mu_{ij} \tag{8}$$

ここで  $\mu_{ij}$  は , j 回目のファジィ推論におけるファジィルール  $R^i$  の適合度である .

[Rule Generation Mechanism]

各ルールの信頼度  $cf_i$  を適応度とし,GA を用いて次の世代の新しいルール群を作成する.ここで遺伝情報は,以下のような各ファジィルール  $R^i$  の HCMF パラメータとする.

- ullet ファジィ集合  $A_i$  の中心座標ベクトル  $oldsymbol{a}_i$
- ファジィ集合 A<sub>i</sub> の半径 α<sub>i</sub>
- ファジィ集合  $B_i$  の中心座標ベクトル  $b_i$
- ファジィ集合 B<sub>i</sub> の半径 β<sub>i</sub>

これらのパラメータを図4のように一つの染色体にコーディングする.ファジィルールはn個存在するので,染色体をn個作成し,集団とする.すなわち,一つのルールを1個体とし,一つのファジィシステム内で GA によりルールを更新する.

本手法では,単純 GA をベースにした以下のような遺伝操作を行う.

 $[ ext{Step1}]$  初期集団をランダムに作成する.また,作成したファジィシステムを用いて報酬を得て,各ルールに信頼度  $cf_i$  を割り当てる.この信頼度が適応度になる.

[Step2] 以下のような操作により,次世代の集団を作成する.

Selection: 集団より 2 個体を選択する.ここでは,適応度 比例戦略を用いる.

 ${f Crossover:}$  交叉率  $p_c$  で,選択した 2 個体の遺伝子を交換する.ここでは,1 点交叉を用いる.

Mutation: それぞれの遺伝子を,突然変異率  $p_m$  の確率で ビット反転させる.

Reproduction: 作成された 2 つの子個体を新しい集団に加える.

なお,これらの遺伝演算は,新しい集団の個体数がnになるまで繰り返される.この新しい集団が次世代の集団になる. [Step3] 新しいファジィシステムを実行し,各ルールへの信頼度 $cf_i$ を計算する.すなわち,各個体に適応度が与えられる. [Step4] 終了条件を満たしているなら終了し,そうでない場合は,Step2に戻り新しい集団を作成する.ここでの終了条件は,世代数とする.

# 3 ルール統合を用いたファジィクラシファイアシステム

第3章の手法では,ルール数を固定しているので,得られたファジィシステムが最適なルール数であるとは限らない.また,遺伝操作により信頼度が高いルールの遺伝子が集団内に広がるため,同じようなルールが重複している可能性がある.しかし,不必要なルールを削除するために不用意に個体数を減らすと,GA の操作に影響が出る可能性もある.そこで本研究では,ある一定世代毎に類似したルールを統合することによってルール数を一時的に削減させる手法を導入する.以下にその手順を示す.

[Step1] 初期世代から G-1 世代までは,与えたルール数のままファジィ推論を行う.各世代とも推論結果による信頼度に

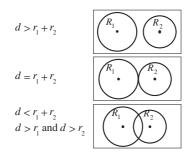


図 5 統合をしない位置関係

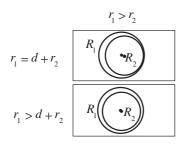


図 6 吸収する位置関係

より,次世代を生成する.

[Step2] G 世代目において次のような操作を行う.

[Step2-1] 後述する手法により,類似するルールを統合する. [Step2-2] 一時的にルール数が削減された状態でファジィ推論を行い,報酬を得る.これらの統合されたルールに対して信頼度を与える.

[Step2-3] この信頼度を適応度とし,削除前のルール数になるまで次世代の個体を遺伝演算により作成する.

[Step3] G-1 世代後までは Step1 と同様の操作を行う . また , G 世代たてば Step2 に戻る .

これによって,ルール数が少ないシステムが生成されると考えられる.

次に,統合するルールの条件を示す.1) 吸収または統合しようとするルール対の後件部メンバーシップ関数が相反する操作を行う場合は統合しない.2) 前件部メンバーシップ関数が離れている,または一部しか重なっていない場合は統合しない(図 5 参照).3) 一方の前件部メンバーシップ関数がもう一方のメンバーシップ関数の中にある場合は一方に吸収する(図 6 参照).4) それぞれの中心間の距離より一方の半径が長い場合,つまり大部分が重なっている場合は統合する(図 7 参照).なお,図中の d は 2 つのルールの中心座標の距離, $r_1, r_2$  はそれぞれのルールの半径である.

統合する 2 つのルールの中心座標を  $(x_1,y_1),(x_2,y_2)$  としたとき,統合されたルールの半径 R と中心座標 (X,Y) は,(9)~(11) 式で求める.

$$R = \frac{\frac{r_1}{2} + \frac{r_2}{2} + d}{2} \tag{9}$$

$$X = \frac{\frac{r_1(x_1 - x_2)}{2d} + \frac{r_2(x_2 - x_1)}{2d} + x_1 + x_2}{2} \tag{10}$$

$$Y = \frac{\frac{r_1(y_1 - y_2)}{2d} + \frac{r_2(y_2 - y_1)}{2d} + y_1 + y_2}{2}$$

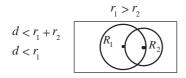


図 7 統合を行う位置関係

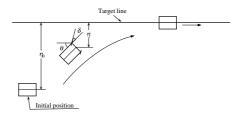
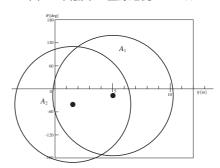
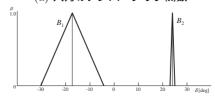


図 8 自動車の直線追従のモデル



(a) 入力のメンバーシップ関数



(b) 出力のメンバーシップ関数

図 9 生成されたファジィルール

文献 [5] , [6] では,得られた報酬の総和とルール数とを基準にし,最良世代を選んでいた.したがって,精度的に良くないものが選ばれるケースがあった.本稿では,得られた報酬の総和のみで最良世代を選び,獲得されたファジィシステムとする.

#### 4 シミュレーション実験

#### 4.1 自動車の直線追従のファジィルール獲得

本手法を,図8のような自動車の直線追従問題に応用した.これは, $\eta$ (直線と走行車両との水平距離)と $\theta$ (走行車両の傾き)より, $\delta$ (走行車両の舵角)を推論する.

ルール数 ( 個体数 n ) を 10 とした.GA の演算は,交叉率 $p_c$  を 25%に,突然変異率  $p_m$  を 3.0%として行った.また,統合のパラメータ G は 5 とした.なお各個体の信頼度  $cf_i(i=1,2,...,n)$  を求めるために与えられる報酬  $re_j$  は,(12) 式で定義する.

$$re_{j} = \frac{1.0}{\left| \left( 1 - \frac{\eta_{j}}{\eta_{0}} \right) \times a\theta_{j} + \frac{\eta_{j}}{\eta_{0}} \times b\eta_{j} \right|}$$
(12)

ここで,a と b は重みであり,それぞれ 0.001 と 0.01 に設定した.

初期集団を変えて 20 試行おこない,ファジィシステムを得(11) た、20 試行のうち,得られたファジィシステムのルール数が2 であったのが8回,3であったのが1回で,残りのルール数は10であった。得られたファジィルールの例(ルール数2)を図9に示す。このルールを用いたシミュレーション結果を図10に示す。少ないルール数にかかわらず,良好に制御できていることが分かる。各試行で得られたシミュレーション結果は,ルール数に関わらず図10のような結果を示した。しかし,ルール数10の場合のルール配置は,ほぼ2~3カ所に集まっていた。これらは,統合の操作ため,似たようなルールが



図 10 シミュレーション結果

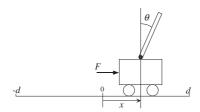


図 11 倒立振子のモデル

できたと考えられる。

#### 4.2 倒立振子のファジィルールの獲得への応用

次に,提案法を図 11 のような倒立振子のファジィ制御ルール獲得に応用する.本研究では,レールの中心付近で倒立させるように台車に加える力を制御することを目的とする.倒立振子のパラメータを次のように設定する.

- 振子の長さ: l = 0.5[m]
- 振子の質量: $m_p = 0.1[\mathrm{kg}]$
- 台車の質量: m<sub>c</sub> = 1.0[kg]
- ullet レールの中心から端までの長さ: $d=2.4[\mathrm{m}]$

倒立振子の状態量は,次の4つとする。

- θ: 鉛直方向に対する振子の角度 [deg]
- $\dot{ heta}$ :振子の角速度  $[\deg/s]$
- x:台車の中央位置からの距離 [m]
- *x*:台車の速度 [m/s]

作成するファジィシステムは ,  $\theta$ ,  $\dot{\theta}$ , x,  $\dot{x}$  から台車に加えるカ F[N] を推論するファジィ制御器である . また , 振子の角度が  $12.0[\deg]$  を超えた場合と台車がレールの両端から落ちた場合は , 失敗したとみなしその時点でシミュレーションは終了する .

ルール数 ( 個体数 n ) を 20 とした.GA の演算は,交叉率  $p_c$  を 25%に,突然変異率  $p_m$  を 3.0%とし,10000 世代を打ち 切り世代数とした.また,統合のパラメータ G は 10 とした.各個体の信頼度  $cf_i(i=1,2,...,n)$  を求めるために与えられる 報酬  $re_s$  は,(13) 式で定義する.

$$re_j = (12.0 - |\eta_j|) + (2.4 - |x_j|)$$
 (13)

信頼度の計算には,4 つの初期位置  $((\theta_0,x_0)=(-10.0,-1.5),$  (-10.0,1.5), (10.0,-1.5) and (10.0,1.5) からのシミュレーションを評価することにより報酬を得て,信頼度を割り当てた.

初期集団を変えて 20 試行おこない , ファジィシステムを得た . 20 試行のうちルール統合処理を行ったものが最良個体として選ばれたのは , 12 回あり , いずれの場合もルールは 2 個に統合されていた . 図 12 , 13 に得られたファジィシステムを用いたシミュレーション結果を示す . このときのルール数は 2 である . 図より , レールの中央付近で振子が倒れず立っているのが分かる .

#### 5 おわりに

本稿では,HCMFを用いたファジィクラシファイアシステムにルール統合法を用いた手法について述べ,自動車の直線 追従走行と倒立振子のファジィ制御ルール獲得に応用した.

今後の課題として, GA により新たに作成されたルールが

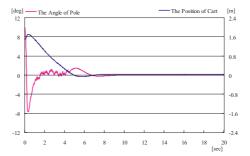


図 12 シミュレーション結果  $(\theta_0, x_0) = (10.0, 1.5)$ 

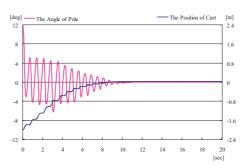


図 13 シミュレーション結果  $(\theta_0, x_0) = (12.0, -2.0)$ 

原因で,前世代と比べ報酬が得られず,前世代まで有効である評価されていたルールが次の世代に受け継がれないような問題が起こっている.これに対し,各ルールの評価方法,世代交代の方法などの検討をする必要がある.また,自律移動ロボットのような問題に応用する必要がある.

#### 参考文献

- [1] M. Valenzuela-Rendon, "The Fuzzy Classifier System: A Classifier System for Continuously Varying Variables," *Proc. of the ICGA '91*, pp.346–353, 1991.
- [2] 古橋,中岡,森川,内川:「多段ファジィクラシファイアシステムによる制御知識獲得」,日本ファジィ学会誌,vol.6,no.3,pp.603-609,1994.
- [3] 中島,村田,石渕:「クラシファイアシステムによる言語的 識別ルールの獲得」,日本経営工学会論文誌,vol.47, no.3, pp.199-206, 1996.
- [4] 井上,亀井,井上:「遺伝的アルゴリズムと超円錐形メンバーシップ関数によるファジィルール自動生成手法の提案」, 日本ファジィ学会誌,vol.8, no.6, pp.1104-1115, 1996.
- [5] 井上,畑瀬,亀井:「統合によるルール削除手法を用いたファジィクラシファイアシステムによるファジィルール自動生成」,第16回ファジィ システム シンポジウム講演論文集,pp.459-462,2000.
- [6] H. Inoue, K. Hatase and K. Kamei, "Fuzzy Classifier System Using Hyper-Cone Membership Functions and Rule Reduction Techniques," Proc. of 10th FUZZ-IEEE, pp.1436–1439, 2001.

#### 問い合わせ先

〒 910-8507 福井市文京 3-9-1 福井大学教育地域科学部

井上博行

TEL: 0776-27-8714 FAX: 0776-27-8911 Email: inoue@edu00.f-edu.fukui-u.ac.jp

## カーネル関数を利用した LVQ クラスタリングと SOM

LVQ Clustering and SOM Using a Kernel Function

#### 井口亮

### 宮本 定明

Ryo Inokuchi

Sadaaki Miyamoto

## 筑波大学 システム情報工学研究科

筑波大学 機能工学系

University of Tsukuba

University of Tsukuba

**Abstract**: This paper aims at discussing clustering algorithm based on Learning Vector Quantization (LVQ) using a kernel function in support vector machines. Furthermore, Self-Organizing Map (SOM) using a kernel function is considered. Examples of clustering as well as SOM map are shown and effects of a kernel function is discussed.

Keywords: SOM, LVQ, Clustering, Kernel function, Support vector machine.

#### 1 はじめに

クラスタリングとは、対象データを外的基準なしに 自動分類する教師なし分類であり、その技法の一つに、 学習ベクトル量子化(Learning Vector Quantization -LVQ)によるクラスタリング [4] がある.また,LVQ は、自己組織化マップ(Self-Organizing Map - SOM) [1] の枠組みで考察されている.

さて近年,サポートベクトルマシン(Support Vector Machine - SVM)[2]が,その理論の深さと実際的な分類性能の優秀さから注目されている. SVM は一般に非線形な教師付き分類を行う方法であり,非線形性を導入する際,高次元空間への写像と,そこでの内積を表すカーネル関数が利用される点に一つの特徴がある.最近,SVMに触発されたクラスタリングの方法が論じられている[3].

本稿では SVM のカーネル関数を利用した LVQ によるクラスタリングアルゴリズムについて提案し,数値例を示す.また,LVQ と密接な関係にある SOM へのカーネル関数の利用についても提案し,カーネル関数を利用した LVQ クラスタリングの性質を考察を行う.

# 2 LVQ クラスタリング

LVQ は , SOM の枠組みで述べられている方法であり , 元々はクラスタリングとは異なる分野で研究されていた .

LVQ によるクラスタリングは,次の信号近似アルゴリズムに基づいている.時間を表す変数を t とし, $t=1,2,\cdots$  と離散的な値をとるものとし, $x(t)\in \mathbf{R}^p(t=1,2,\cdots)$  はある確率分布からとられた信号の無限列であるとする.ベクトル量子化は,有限個のコードブッ

クと呼ばれるベクトル  $m_i \in \mathbf{R}^p, i=1,\cdots,K$  によって信号の近似を行う方法である. $m_i$  の個数を増加させると,確率分布の密度関数を近似することができる.

#### アルゴリズム VQ

 ${f VQ1}$  初期コードブックベクトル  $m_i(1), i=1,\cdots,K$  を決める. $t=1,2,\cdots$  について 収束するまで  ${f VQ2}$  と  ${f VQ3}$  を繰り返す.

$$\mathbf{VQ2}$$
  $m_l(t) = rg \min_{1 \leq i \leq K} \|x(t) - m_i(t)\|$ を求める .

**VQ3** 
$$m_l(t+1) := m_l(t) + \alpha[x(t) - m_l(t)],$$
  
 $m_i(t+1) := m_i(t), i \neq l$ 

なお, $\mathrm{LVQ}$  アルゴリズムにおいては,次の条件を満たす学習率パラメータ  $\alpha(t)$  が用いられる.

$$\sum_{t=1}^{\infty} \alpha(t) = \infty, \ \sum_{t=1}^{\infty} \alpha^{2}(t) < \infty, \ t = 1, 2, \dots$$

アルゴリズム  $\mathbf{VQ}$  をクラスタリングに応用するためには,有限個の個体データ  $x_1,\cdots,x_n$  から,無限信号列 x(t) を定義し,これに  $\mathbf{VQ}$  を用いればよい.最も簡単な定義の方法として,個体データを繰り返し用いることが考えられる.K はクラスターの数を表すのでK=c とする.また,クラスター生成には,最近隣法で個体を割り当てる.このようにすれば,クラスタリングのための単純なアルゴリズム  $\mathbf{LVQC}$  が得られる.なお、中心  $m_i$  は  $\mathbf{LVQC}$  では参照ベクトルと呼ばれる.クラスター中心の更新の方法は,学習の概念に基づいている.

#### アルゴリズム LVQC

LVQC1  $m_i, i=1,\cdots,c$  の初期値を設定する(個体をランダムに選んで, $m_i, i=1,\cdots,c$ と

する . あるいは , ランダムに初期クラスターをまず生成し , 重心を参照ベクトル  $m_i, i=1,\cdots,c$  とする )

LVQC2

$$m_l(t) = \arg\min_{1 \le i \le c} ||x(t) - m_i(t)||$$

を求める.

LVQC3  $m_1(t), \cdots, m_c(t)$  を更新する.

$$m_l(t+1) := m_l(t) + \alpha[x(t) - m_l(t)],$$
  
 $m_i(t+1) := m_i(t), i \neq l$ 

x(t) が表す個体をクラスター  $G_l$  に割り当てる .

#### 3 SOM

SOM は,ランダムな出発点から教師なし学習を経てパターン間の関係を表出させる,2 層ネットワークである.その第一層は入力層である.ほとんどの場合,第2 層は競合層であり,1 次元,あるいはは2 次元グリッドとして構成されている.グリッドの配列としては,正方形配列と六角形配列がある.本稿では,六角形配列を用いた.入力層の各ノードは全ての競合層上のノードに接続されている.ある入力パターンが与えられたとすると,参照ベクトルとの距離が最小になるような勝者ノード  $m_l$  を決める.

しかし,LVQ が勝者ノードのみを学習させるのと違い,SOM では近傍領域  $N_c$  に含まれるすべてのノードが学習される.通常  $N_c$  の半径は時間とともに次第に縮小させていく.学習は,LVQ と同じ以下のような式が用いられる.

$$m_l(t+1) := m_l(t) + \alpha[x(t) - m_l(t)]$$
 (1)

アルゴリズム SOM

 ${f SOM1}$  初期ノード $m_i(1), i=1,\cdots,K$ を決める .  $t=1,2,\cdots$  について収束するまで ${f SOM2}$  と ${f SOM3}$  を繰り返す .

SOM2

$$m_l(t) = \arg\min_{1 \le i \le K} ||x(t) - m_i(t)||$$

を求める.

 ${f SOM3}$  勝者ノード $m_l$  の近傍 $N_c$  に含まれるすべてのノードを更新 .

$$m_l(t+1) := m_l(t) + \alpha[x(t) - m_l(t)],$$
  
 $m_i(t+1) := m_i(t), i \neq l$ 

## 4 高次元空間への写像

サポートベクトルマシンでは,高次元空間を利用し, 非線形な計算を行う.まず,高次元空間へ個体を写像す る非線形関数を考える.高次元空間をSとし,写像を

$$\Phi \colon R^p \to S$$

とする.このとき写像を行う非線形関数は

$$\Phi(x) = (\phi_1(x), \phi_2(x), \cdots)$$

と表すことができる. $\Phi(x)$  が,S 上での個体の値となる.x は p 次元ベクトルだが, $\Phi(x)$  は無限次元を含む高次元ベクトルになる.

また,

$$K(x,y) = \langle \Phi(x), \Phi(y) \rangle \tag{2}$$

とおき , この S 上での内積を  $x,y \in \mathbb{R}^p$  で表現した関数を , カーネル関数という . 例えば ,

$$K(x, y) = \exp(-cnst \parallel x - y \parallel^2)$$
  
$$K(x, y) = (1 + \langle x, y \rangle)^d$$

がある.それぞれ,ガウス型カーネル関数,多項式型カーネル関数と呼ぶ.

カーネル関数にはほかにも様々な形が知られており,応用例もある.K(x,y) がある条件を満たすとき式(2)が成立すると仮定できることが知られている [2].このとき,写像関数  $\Phi(x)$  の計算を行わずに,つまり写像の具体的な形を知る必要なく,S 上での内積の値を得ることができる.

# 5 カーネル関数を利用した LVQ クラスタリング

高次元特徴空間での非類似度として次の式を考える.

$$d_{ik} = \|\Phi(x_k) - m_i\|_s^2 \tag{3}$$

ここで  $m_i$  は高次元特徴空間における参照ベクトルである.アルゴリズム LVQC の参照ベクトルの更新式は次のようになる.

$$m_l(t+1) = m_l(t) + \alpha [\Phi(x_l) - m_l(t)]$$
 (4)

 $m_i$  を明示的に用いないので, $d_{ik}$  やカーネル関数のみによって計算を進める必要がある.そこで, $d_{ik}(t+1)$ を  $d_{ik}(t)$ 、 $d_{lk}$  などから計算する方法を示そう.簡単の

ため, $lpha=lpha(t),\; K_{kk}=K(x_k,x_k),\; K_{kl}=K(x_k,x_l)$ と略記する.

$$d_{ik}(t+1) - (1-\alpha)d_{ik}(t) + \alpha(1-\alpha)d_{il}(t)$$

$$= K_{kk} + \alpha^2 K_{ll} - (1-\alpha)K_{kk} + \alpha(1-\alpha)K_{ll} - 2\alpha K_{kl}$$

$$+ \{(1-\alpha)^2 - (1-\alpha) + \alpha(1-\alpha)\} ||m_i(t)||^2$$

$$= \alpha(K_{kk} - 2K_{kl} + K_{ll})$$

であるから,

$$d_{ik}(t+1) = (1-\alpha)d_{ik}(t) - \alpha(1-\alpha)d_{il}(t) + \alpha(K_{kk} - 2K_{kl} + K_{ll})$$
(5)

と  $d_{ik}$  を更新すればよい.よって,この式によって更新を行い,各個体を  $d_{ik}$  が最も小さいクラスターに再配置することを繰り返せば,カーネル関数を利用した LVQ クラスタリングを行うことができる.

アルゴリズム K-LVQC

K-LVQC1  $d_{ik}$ ,  $i=1,\cdots,c$ ,  $k=1,\cdots,n$  の初期値を設定する.

K-LVQC2

$$d_{lk}(t) = \arg\min_{1 \le i \le c} d_{ik}(t)$$

を求める.

K-LVQC3  $d_{ik}$  を式 (5) によって更新する.

## 6 カーネル関数を用いたSOM

カーネル関数を利用した SOM は , LVQC と同様に 導くことができる .

$$d_{ik}(t+1) = (1-\alpha)d_{ik}(t) - \alpha(1-\alpha)d_{il}(t) + \alpha(K_{kk} - 2K_{kl} + K_{ll})$$
(6)

と  $d_{ik}$  を更新すればよい . このとき ,  $m_i$  の値を明示的に用いない . 用いるのはグリッドにある  $m_i$  の位置だけである .

アルゴリズム K-SOM

K-SOM1  $d_{ik}$ ,  $i=1,\cdots,c$ ,  $k=1,\cdots,n$  の初期値を設定する.

K-SOM2

$$d_{lk}(t) = \arg\min_{1 \le i \le c} d_{ik}(t)$$

を求める.

 ${f K-SOM3}$  勝者ノード  $m_l$  の近傍  $N_c$  に含まれるすべてのノードに対する  $d_{ik}$  を式 (6) によって更新する .

## 7 数值例

#### 7.1 人工データ

ここでは,個体数 150 の 2 次元人工データに対して,カーネル関数を利用した LVQ クラスタリングと SOM を行った.LVQ クラスタリングの結果を図 1 に,SOM の結果を図 2 に示す.カーネル関数を利用した LVQ クラスタリングは分類に成功している.カーネル関数によって高次元空間への写像されたデータがどのような 状態にあるのかをカーネル関数を利用した SOM によって可視化している.

#### 7.2 実データ

ここでは,特徴の異なる次の2つの実データを用いて,カーネル関数を利用した LVQ クラスタリングを行う.

Iris data[6] は , アヤメ科の花の 3 品種の寸法を表す 個体数 150 の 4 次元データである . このデータは統計 学の実験の題材として用いられたもので , データ解析 の例としてよく用いられる .

Wisconsin breast cancer data[6] は,乳癌の癌細胞に関する個体数 683 の 9 次元データである.このデータは,ある癌細胞群について,その濃度や含まれる細胞の形状の一貫性などについて  $1\sim10$  の 10 段階で評価した整数値データである.各個体は,その特徴により良性 (benign) と悪性 (malignant) に分類される.このデータは医学の分野での症例判別やパターン認識のサンプルとして用いられる.

他のクラスタリング手法との収束するまでの繰り返し回数,収束に要した時間,および誤分類数の比較を行い,表 1, 2 に示す.なお,sFCM は標準的ファジィc-平均法,eFCM はエントロピー正則化ファジィc-平均法 [4],K-sFCM,K-eFCM[5] はそれらのカーネル関数を利用したものとする.

### 8 おわりに

本稿では、SVM の手法をもとに高次元空間への写像を利用した LVQ クラスタリングと SOM を提案し、非線形なデータに対する数値例でその効果を確認した.

今後の課題としては, LVQ によるクラスタリングやカーネル関数を利用した SOM の様々な変形アルゴリズム, また様々なデータへの応用とその評価などが考えられる.

表 1: BCW data における各手法の比較

K I. Be ii data le to i o be i o be i					
アルゴリズム	収束回数	収束時間	誤分類数		
sFCM	10.45	$9.1 \times 10^{-2}$	28		
eFCM	12.75	$1.45\times10^{-2}$	27		
LVQC	5000	$3.3\times10^{-3}$	27		
K-sFCM	9	1827.94	21		
K-eFCM	17.24	126.54	23		
K-LVQC	5000	$1.39\times10^{-1}$	20		
	1				

表 2: Iris data における各手法の比較

アルゴリズム	収束回数	収束時間	誤分類数
sFCM	22.75	$1.71 \times 10^{-2}$	16
eFCM	21.45	$8.7 \times 10^{-3}$	17.02
LVQC	5000	$3.9\times10^{-3}$	16
K-sFCM	32.65	103.39	17
K-eFCM	39.79	4.25	13.9
K-LVQC	5000	$2.05 \times 10^{-2}$	14.98

#### 問い合せ先

**∓** 305-8573

茨城県 つくば市 天王台 1-1-1 筑波大学 機能工学系 宮本研究室

井口 亮

TEL (0298)53-6553

FAX (0298)53-5207

E-mail ryo@odin.esys.tsukuba.ac.jp

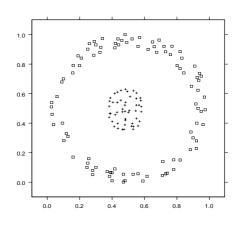


図 1: K-LVQC の適用結果  $(c=2,\alpha=0.4,cnst=20)$ 

# 参考文献

- T.Kohonen, Self-Organizing Maps, Springer-Verlag, Heidelberg, 1995.
- [2] V.Vapnik, Statistical Learning Theory, Wiley, New York, 1998
- [3] M.Girolami, Mercer kernel based clustering in feature space, *IEEE Trans. on Netural Networks*, Vol.13, No.13, pp780-784, 2002.
- [4] 宮本定明, クラスター分析入門, 森北出版, 1999.
- [5] S.Miyamoto and D.Suizu, Fuzzy c-Means Clustering Using Kernel Functions in Support Vector Machines, J. of Advanced Computational Intelligence, Vol.7, No.1, pp25-30, 2003.
- [6] "UCI repository of machine learning databases and domain theories", FTP address:ftp://ftp.ics.uci.edu/pub/machine-learning-databases

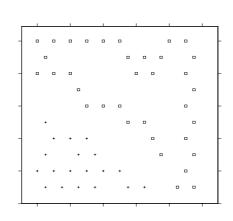


図 2: K-SOM によるマップ ( $\alpha = 0.04, cnst = 20$ )

# 最適補完戦略を用いた

# 線形クラスタリングにおける欠測値の処理

# Linear Fuzzy Clustering of Incomplete Data with Optimal Completion Strategy

#### 本多 克宏, 市橋 秀友

Katsuhiro HONDA, Hidetomo ICHIHASHI 大阪府立大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

**Abstract**: Although fuzzy clustering is a useful tool for revealing local structure of data, it is not directly applicable to the case of incomplete data. Four strategies for doing Fuzzy c-Means clustering of incomplete data sets were proposed by Hathaway and Bezdek, but only two of them have been considered in linear fuzzy clustering. In this paper, we apply the remaining two strategies, which are based on the optimal completion, to linear fuzzy clustering. The characteristic features are tested using artificially generated incomplete data sets.

### 1. はじめに

Bezdek らの Fuzzy c-Varieties (FCV) 法 [1] はクラスターのプロトタイプとして線形多様体を用いることにより線形のクラスタリングを行う手法で,局所的な主成分分析とみなすことができる.しかし,実世界のデータの分析では,しばしば欠測値の処理が問題となる.Fuzzy c-Means (FCM) 法 [1] における欠測値の処理法としては,種々の方法が提案されており,Hathawayら [2] はそれらを 4 種類の戦略としてまとめている.しかし,線形クラスタリングにおいては,それらのうち,2 種類に対応するものしかこれまで考慮されていない.本研究では,FCV 法では残りの 2 種類の戦略について定式化を行い,性能の比較を行う.

# 2. 線形ファジィクラスタリングにおける種々の欠測値の処理法

m 次元の観測値からなる n 個の標本データ  $x_i=(x_{i1},\cdots,x_{im})^\top,\ i=1,\cdots,n$  を C 個のクラスターに分割する問題を考える.データ集合をいくつかの線形クラスターに分割する FCV 法では,互いに線形独立な単位ベクトル  $a_{ck}$  により張られる p 次元の線形多様体をクラスターのプロトタイプとし,標本データと線形多様体との距離を分類尺度とすることにより,以下の目的関数の最小化を考える [1] .

$$L_{fcv} = \sum_{c=1}^{C} \sum_{i=1}^{n} u_{ci}^{\theta} \Big\{ \| \boldsymbol{x}_{i} - \boldsymbol{b}_{c} \|^{2} - \sum_{k=1}^{p} \boldsymbol{a}_{ck}^{\top} R_{ci} \boldsymbol{a}_{ck} \Big\}$$

$$R_{ci} = (\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{b}_c)(\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{b}_c)^{\top}$$

ただし, $u_{ci}$  は標本データ $x_i$  の第cクラスターへの帰

属度を表すメンバシップであり,c に関する和が 1 となる確率的制約を満たすものとする. $b_c$  は第c クラスターの中心である.メンバシップのべき乗はファジィ分割を得るために用いられたもので, $\theta$  が大きいほどあいまいなデータ分割が得られるようになる.

以下では、線形ファジィクラスタリングにおける欠 測値の処理法を、Hathaway ら [2] に倣って 4 種類に分 類することを考える。

#### 2.1 完全データを用いる戦略

もし、データ集合の中で欠測値を含む標本データの 比率が小さい場合には、単純な戦略として欠測値を含むすべての標本データを削除して完全データのみを用いる手法が利用できる.ただし、欠測値の数が多い場合には分析に用いられる標本データ数が極端に少なくなり、有効ではない.

#### 2.2 部分的な距離を用いる戦略

観測値のみを用いて部分的な距離を計算することで,すべての観測値を有効に利用しながらメンバシップを求める戦略がある.本多ら[3]は,データ行列の要素ごとの近似に基づく線形クラスタリング法を提案し,観測値に対応する要素についてのみ近似を行うことで欠測値を処理する目的関数を,以下のように提案している.

$$L_{fcv'} = \sum_{c=1}^{C} \sum_{i=1}^{n} u_{ci}^{\theta} \sum_{i=1}^{m} h_{ij} \left( x_{ij} - \sum_{k=1}^{p} a_{ckj} f_{cik} - b_{cj} \right)^{2}$$

ここで, $a_{ck}=(a_{ck1},a_{ck2},\cdots,a_{ckm})^{\top}$  は第 c クラスターにおける第 k 主成分ベクトルを, $f_{cik}$  は第 c クラスターにおける第 i 標本データの第 k 主成分得点を表

す.また, $h_{ij}$  は  $x_{ij}$  が観測されているか否かを表す 2 値変量である.クラスタリングアルゴリズムは,主成分ベクトル,主成分得点,クラスター中心およびメンバシップの更新を繰り返すアルゴリズムとなる.

#### 2.3 最適値を逐次補完する戦略

第 3 の戦略は,データ行列中の欠測値をあたかも未知パラメータであるかのようにみなして,繰り返しアルゴリズムの中で逐次最適な値で補完しながらデータ分割を行う方法である.第  $\phi$  標本データの欠測値を推定する際には, $x_\phi$  の観測された変量を並べたベクトルを  $x_\phi^O$ ,観測されなかった変量を並べたベクトルを  $x_\phi^M$  とし, $a_{ck}$  および  $b_c$  についても,観測値および欠測値に対応して,それぞれ二つのベクトルに分割すると, $x_\phi^M$  の最適な推定値は,

$$\boldsymbol{x}_{\phi}^{M} = \left\{ \sum_{c=1}^{C} u_{c\phi}^{\theta} \left( I - \sum_{k=1}^{p} \boldsymbol{a}_{ck}^{M} \boldsymbol{a}_{ck}^{M\top} \right) \right\}^{-1} \times \left\{ \sum_{c=1}^{C} u_{c\phi}^{\theta} \left( \sum_{k=1}^{p} \boldsymbol{a}_{ck}^{M} \boldsymbol{a}_{ck}^{O\top} (\boldsymbol{x}_{\phi}^{O} - \boldsymbol{b}_{c}^{O}) + \left( I - \sum_{k=1}^{p} \boldsymbol{a}_{ck}^{M} \boldsymbol{a}_{ck}^{M\top} \right) \boldsymbol{b}_{c}^{M} \right) \right\}$$
(1)

と求められる.クラスタリングアルゴリズムは,主成分ベクトル,クラスター中心およびメンバシップの更新と欠測値の補完を繰り返すアルゴリズムとなる.

#### 2.4 最近隣プロトタイプに基づいて補完する 戦略

2.3 節ではクラスターごとの推定値の重み付き平均値を補完しているために,いずれのプロトタイプからも離れた値となることがある.そこで,メンバシップが最大となるクラスターにおける推定値を補完する戦略が考えられる.第 c クラスターにおける推定値を  $x_{\phi c}^M$  とした際の第  $\phi$  標本データと第 c プロトタイプの 2 乗距離を  $D_{c\phi}^2$  とおくと,補完すべき推定値を  $x_{\phi}^M=x_{\phi l}^M$  とする.ただし, $D_{l\phi}^2=\min\{D_{1\phi}^2,\cdots,D_{C\phi}^2\}$  とした.

#### 3. 数值実験

図1に示した3次元24個のデータ集合を用いて数値実験を行った.ランダムに選んだ8個,16個または24個のサンプルの一つの要素を欠測値と置き換えたときに,初期分割を替えながら行った100回の試行においておのおのの欠測値処理戦略で二つの直線状の構造を正しくとらえた割合を調べる実験を5回繰り返したときの平均値を表1に示す.表1から,欠測値の数が少ない場合は完全データを用いる戦略と他の戦略には大きな差がないといえる.一方,欠測値が多い場合に

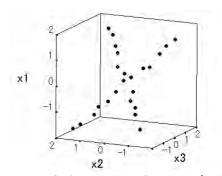


図 1: 実験に用いた 3 次元人工データ

表 1: 二つの直線構造をとらえた割合の比較(%)

欠測値	戦略1	戦略 2	戦略 3	戦略 4
0 個	85.0	88.0	85.0	85.0
8個	85.6	85.8	91.2	91.6
16 個	85.6	76.8	78.8	90.6
24 個	N/A	57.6	46.0	59.8

は,目的関数の最適値よりも最近隣プロトタイプに基づいて補完することで,初期分割への依存が減ることが分かる.また,補完を行わずに観測値のみを考慮する手法も初期分割への依存度が比較的低い.

### 4. おわりに

本論文では、Hathaway らにより分類された 4 種類の欠測値処理戦略を線形ファジィクラスタリングに当てはめ、各手法の特性を比較した、最適補完戦略に基づく欠測値の処理法は、確率モデルにおいて尤度最大化の原理に基づいて適宜欠測値を補完しながら最適化をはかる EM アルゴリズム [4] と関連が深い、確率モデルにおける欠測値補完法との関連についてのより深い考察が今後の課題である。

# 参考文献

- [1] J. C. Bezdek: Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press (1981)
- [2] R. J. Hathaway and J. C. Bezdek: Fuzzy c-Means Clustering of Incomplete Data; *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Part B*, Vol. 31, No. 5, pp. 735-744 (2001)
- [3] 本多克宏, 杉浦伸和, 市橋秀友, 荒木昭一, 久津見洋: 最小2 乗基準を用いた Fuzzy *c*-Varieties 法における欠測値の 処理法; 日本ファジィ学会誌, Vol. 13, No. 6, pp. 680-688 (2001)
- [4] A. P. Dempster, N. M. Laird and D. B. Rubin: Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm; J. of the Royal Statistical Society, Series B, Vol. 39, pp. 1-38 (1977)

#### 連絡先

〒 599-8531 大阪府堺市学園町 1-1

大阪府立大学大学院工学研究科 本多 克宏

TEL: 072-254-9355 FAX: 072-254-9915

E-mail: honda@ie.osakafu-u.ac.jp

### リレーショナルクラスタリングへのノイズクラスターの応用 Noise Cluster for Relational Clustering

市橋秀友

本多克宏

Hidetomo ICHIHASHI

Katsuhiro HONDA

#### 大阪府立大学

Osaka Prefecture University

Abstract: Gaussian mixture models (GMM) for density estimation uses maximum likelihood approach, whereas Fuzzy c-Means (FCM) clustering is based on an objective function method. The close relationship between them has been pointed out. When applying the robust fuzzy clustering approach by Davé to the GMM, careful parameter setting is required. From the consideration of the Gustafson and Kessel's constraint we propose a way of defining a parameter in a fuzzy counterpart of the GMM. Numerical examples show that the Davé's noise clustering approach is quite robust for detecting linear clusters from heavily noisy data sets. This approach is further applied to a relational version in which clusters are formed using the matrix R of relational data corresponding to pairwise distances between objects.

#### I はじめに

ガウス混合モデル (Gaussian Mixture, Normal Mixture)[1] や決定論的アニーリング (Deterministic Annealing, DA)[2] とファジィクラスタリングにはいくつかの類似性がある [3,4,5,6] . FCM 法にエントロピー正則化 [7] や K-L 情報量正則化 [8] を導入すれば,ガウス混合モデルと類似のクラスタリング法となる.パラメータ $\lambda$ の値が FCM 法でのファジイ化係数に対応していて,決定論的アニーリングによって,クラスタリング結果を改善できる.また,Davé らのノイズクラスタリング法[5,9] とロバスト統計分野の M-推定とが共通点を持つことも指摘されている [5] .

KL 情報量正則化 FCM 法 (KLFCM 法)[8] にノイズクラスタリング [5, 9] を採用する方法 [10] が提案されているが,本研究では,その際に考慮すべきパラメータ値の選び方について,Gustafson-Kessel の制約条件を導入したロバストクラスタリング法 (GKLFCM 法) との比較から考察する.そして,この方法を個体間相互の非類似度や距離のみから分類するリレーショナルクラスタリング法に応用し,ノイズを含む場合でも,データの分布を反映した線形,楕円形,円形のいろいろな形状のクラスターが形成されることを示す.

#### II KL 情報量正則化 FCM 法と G-K 制約による ノイ ズクラスタリング

Bezdek による FCM 法では,メンバシップを求めることで個体の集合をファジィクラスターに分割する.クラスターの重心ベクトルをr次元ベクトル $v_i$ とし,個体 kがクラスターiに属する度合いをメンバシップ  $u_{ik}$ とする.目的関数は次のように定められている.

$$J_m = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n (u_{ik})^m d_{ik}$$
 (1)

ただし,メンバシップ  $u_{ik}$  は非負で,c 個のクラスターについての和は各個体毎に 1 であるという制約条件

 $\sum_{i=1}^{c} u_{ik} = 1$  の下で最小化する .

$$d_{ik} = (\boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{v}_i)^T A_i^{-1} (\boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{v}_i)$$
 (2)

は , ユークリッド距離やマハラノビス距離などの 2 乗で , 事前に選ばれた重み付き距離である . 通常は  $A_i$  を単位行列としてユークリッド距離の 2 乗が用いられる

メンバシップのべき乗による FCM 法では,十分遠くにある個体はどのクラスターにもほぼ等しいメンバシップを持つようになるが,エントロピー正則化では,0 あるいは 1 に近づく [7] . また,KL 情報量で正則化する KLFCM 法では,ファジィ化係数を  $\lambda=2$  とすればガウス混合モデル [1,3,4] と同じアルゴリズムとなる [8] . FCM 法では行列  $A_i$  は単位行列とされることが多いが,Gustafson-Kessel による修正 FCM 法 [11] では  $A_i$  の要素も繰り返しアルゴリズムの中で求められる.

本章では,Gustafson-Kessel [11] による  $|A_i|$  の大きさを制約する方法を KLFCM 法での第 c+1 クラスターに採用した GKLFCM 法でのロバストクラスタリングについて述べる.KLFCM 法に c+1 番目のクラスタに対する Gustafson-Kessel の制約条件を追加し目的関数を

$$J_{\lambda K} = \sum_{i=1}^{c+1} \sum_{k=1}^{n} u_{ik} d_{ik} + \lambda \sum_{i=1}^{c+1} \sum_{k=1}^{n} u_{ik} \log \frac{u_{ik}}{\pi_i}$$

$$+ \sum_{i=1}^{c+1} \sum_{k=1}^{n} u_{ik} \log |A_i| \tag{3}$$

制約条件を

$$\sum_{i=1}^{c+1} u_{ik} = 1 \tag{4}$$

$$|A_{c+1}| = K \tag{5}$$

とする .K は定数である . 第 c+1 クラスタがノイズクラスタである  $.|A_{c+1}|$  はノイズクラスターの主成分の分散 .K はそれを小さな正の

値に制約して,ノイズクラスターのメンバシップ値を大きくするように設定する.主成分の分散の積を1より小さくする場合は  $\log |A_{c+1}|$  は負となる.

#### III Davé によるノイズクラスタリングの適用

 $\mathrm{Dav\'e}$  のノイズクラスタリング法 (NFCM 法) は,第 c+1 番目のクラスタをノイズクラスタとしてその目的 関数を

$$J_m = \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{n} (u_{ik})^m d_{ik} + \delta \sum_{k=1}^{n} (u_{c+1})^m$$
 (6)

とする.ただし,制約条件を, $\sum_{i=1}^{c+1}u_{ik}=1$ とする.この目的関数を最小化すると,i=1,...,cについて  $d_{ik}>\delta$ である  $x_k$  は第 c+1 番目のクラスターである Jイズクラスターに属するようになる.したがって, $\delta$  は正で小さな値を指定すればよい. $\delta$  を正で大きな値にすれば Jイズクラスターに含まれるデータは少なくなり,零や負にすればすべてのデータが Jイズクラスターに含まれる.

本章では KLFCM 法に Davé のノイズクラスタリングを採用し (NKLFCM 法),目的関数を

$$J_{\lambda\Delta} = \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{n} u_{ik} d_{ik} + \delta \sum_{k=1}^{n} u_{c+1 k}$$

$$+ \lambda \sum_{i=1}^{c+1} \sum_{k=1}^{n} u_{ik} \log \frac{u_{ik}}{\pi_{i}}$$

$$+ \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{n} u_{ik} \log |A_{i}|$$

$$+ \sum_{i=1}^{n} u_{c+1 k} \log K$$

$$= \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{n} u_{ik} d_{ik} + \Delta \sum_{k=1}^{n} u_{c+1 k}$$

$$+ \lambda \sum_{i=1}^{c+1} \sum_{k=1}^{n} u_{ik} \log \frac{u_{ik}}{\pi_{i}}$$

$$+ \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{n} u_{ik} \log |A_{i}|$$

$$(7)$$

とする.ただし, $d_{ik}$ は式(2)で,

$$\Delta = \delta + \log K \tag{8}$$

である.式 (7) より,K は  $|A_{c+1}|$  に対応していて,ノイズクラスター内の主成分の分散の対数の和を定数  $\log K$  に対応させている. $|A_i|$ ,i=1,...,c に比べて K が小さいと,以下に示すように第 c+1 クラスターのメンバシップ値が大きくなる.その際の距離の閾値と分散の閾値が  $\delta$  と K である. $\mathrm{Dav\acute{e}}$  の  $\mathrm{NFCM}$  法では  $\delta$  は正とすべき

であるが,第 c クラスターの主成分の分散の積が 1 以下の場合は  $\log |A_c|$  は負の値をとるので,NKLFCM 法ではノイズクラスターにデータが含まれるように  $\Delta$  を負の値にすべきである.

未知パラメータは最適性の必要条件より ,  $i \leq c$  の とき ,

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} u_{ik} x_k}{\sum_{k=1}^{n} u_{ik}}$$
 (9)

と求まる.また,

$$W_k = \sum_{j=1}^{c} \pi_j \exp\left(-\frac{1}{\lambda} d_{jk}\right) |A_j|^{-1/\lambda}$$

$$+ \pi_{c+1} \exp\left(-\frac{\Delta}{\lambda}\right)$$
(10)

とおくと, $i \leq c$ のとき,

$$u_{ik} = \pi_i \exp\left(-\frac{1}{\lambda} d_{ik}\right) |A_i|^{-1/\lambda} / W_k \tag{11}$$

i=c+1 のとき ,

$$u_{ik} = \pi_{c+1} \exp\left(-\frac{\Delta}{\lambda}\right) / W_k \tag{12}$$

とそれぞれ求まる .  $\exp\left(-\frac{\Delta}{\lambda}\right)=\exp\left(-\frac{1}{\lambda}\delta\right)K^{-1/\lambda}$  であるので K を小さくすればノイズクラスターのメンバシップが大きくなる .

行列  $A_i$  は  $i \leq c$  のとき ,

$$A_{i} = \frac{\sum_{k=1}^{n} u_{ik} (\mathbf{x}_{k} - \mathbf{v}_{i}) (\mathbf{x}_{k} - \mathbf{v}_{i})^{T}}{\sum_{k=1}^{n} u_{ik}}$$
(13)

となる.また,

$$\pi_i = \frac{\sum_{k=1}^n u_{ik}}{\sum_{j=1}^{c+1} \sum_{k=1}^n u_{jk}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n u_{ik}$$
 (14)

である.アルゴリズムは KLFCM 法と同様である.

FCM 法やノイズ FCM 法とロバスト M-推定との類似性が Davé & Krishnapuram[5] によって論じられている.

#### IV ノイズリレーショナルクラスタリング

対象間の類似度や距離を表す関係行列からデータの分布形状に合わせて線形,楕円形,円形にクラスターを形成する KLFCM 法によるリレーショナルクラスタリング (RKLFCM 法) [14] が提案されている。そこでは,クラスター重心からの距離  $d_{ik}$  が陽に表されるので上記のノイズクラスタリングを取り入れることは容易である.対象相互間のユークリッド距離の 2 乗からなる関係行列を  $R=(d_{ij}^R)$  とし, $X^*=(x_1,...,x_n)^\top$  を中心化した行列を  $Q_nX^*$  とする.中心化した x の内積からなる行

列は

$$X_0 X_0^{\top} = -\frac{1}{2} Q_n R Q_n \tag{15}$$

と表される  $.W_i=(w_{i1},...,w_{ir})$  を r imes r行列で  $w_{i1},...,w_{ir}$  は  $A_i$  の固有値  $(\delta_1^2,...,\delta_r^2)$  に対応する固有ベクトルとする . 固有ベクトルは  $w_{il}^Tw_{il}=1$  と基準化する .  $\Delta^2=\mathrm{diag}(\delta_1^2,...,\delta_r^2)$  は固有値の対角行列である . 特異値分解により

$$(n\pi_i)^{-\frac{1}{2}}M_i^{\frac{1}{2}}X_i = F_i\Delta_iW_i^{\top}$$
(16)

と表されるので

$$d_{ik} = (\boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{v}_i)^{\top} A_i^{-1} (\boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{v}_i)$$
$$= n \pi_i u_{ik}^{-1} \boldsymbol{f}_{ik}^{\top} \boldsymbol{f}_{ik}$$
(17)

と書ける.ただし, $F_i=({\pmb f}_{i1},...,{\pmb f}_{in})^\top$  である. $F_i$  を求めるために, $n\times n$  行列  $K_i$  を次のように定め,式(16)を用いて次式の2 行目のように書き換える.

$$K_{i} = (n\pi_{i})^{-1} M_{i}^{\frac{1}{2}} X_{i} X_{i}^{\top} M_{i}^{\frac{1}{2}}$$
$$= F_{i} \Delta_{i}^{2} F_{i}^{\top}$$
(18)

 $X_iX_i^ op$  は第 i クラスター重心に中心化した x の内積からなる行列であり, $X_0X_0^ op$  または R から求められる.  $F_i$  と  $\Delta_i$  は  $K_i$  の固有値分解 (18) から求められる.

各クラスターの多次元空間の次元数 r は  $K_i$  の正の固有値の数から推定される.ここで,決定変数  $F_i$  を削減するために Tipping & Bishop [15] による未知パラメータ(決定変数)を減らすための方法を用いる.

 $x_k$  とクラスター重心  $v_i$  の間の 2 乗距離は

$$d_{ik} = n\pi_i u_{ik}^{-1} (\mathbf{f}_{ik}^{\top} \mathbf{f}_{ik}')$$

$$+ \frac{1}{\sigma_i^2} (\frac{u_{ik}}{n\pi_i} (\mathbf{x}_k - \mathbf{v}_i)^{\top} (\mathbf{x}_k - \mathbf{v}_i))$$

$$- \mathbf{f}_{ik}^T (\Delta_i^p)^2 \mathbf{f}_{ik}')$$
(19)

である.ただし, $f'_{ik}=(f_{ik1},...,f_{ikp})^{\top}$ で, $(x_k-v_i)^{\top}(x_k-v_i)$ は $X_iX_i^{\top}$ の対角要素である.また,

$$|A_i| \simeq \left(\prod_{l=1}^p \delta_{il}^2\right) \sigma_i^{2(r-p)} \tag{20}$$

とする.したがって,NKLFCM法のリレーショナル版 (NRKLFCM 法)の目的関数は式(7)と同じように定められ,Pルゴリズムも同様の不動点反復法が導かれる.

### V 数值例

Davéのノイズクラスタリングを採用した KLFCM 法 (NKLFCM 法) の有効性を検証するために , 人工データを用いて数値実験を行った . データは図のような楕円状の2つのクラスターと直線状のクラスターからなる2次元データに一様乱数でノイズを付加したものである .

Fig.1 に GKLFCM 法,Fig.2 に NKLFCM 法の結果を示す.パラメータは GKLFCM 法では c=3, $\log K=-2.0$ , $\lambda=1.5$ ,NKLFCM 法では c=3, $\lambda=2.0$ , $\Delta=-3.5$  とした.左に示す学習曲線は,50 回以降は変化していないため省略している.Table 1 は,Fig.1 で用いたデータについて,30 回の試行における成功率(Fig.1 のように分類された割合)と目的関数値を示したものである.失敗(Failure)での目的関数値は最小のものを記載している.Davé によるノイズクラスタリングは Gustafson-Kessel の制約条件を用いるよりも,われわれの直感によく一致する分類を高い頻度で得ることができる.

Table 2 は 4 つの線形クラスターにノイズを付加した Fig.2 のデータに対し NKLFCM 法を適用した結果で、ノイズデータを 10 個から 500 個まで変化させた場合のクラスタリング成功率と目的関数値を示したものである、線形クラスターは 140 個のデータから成っている、失敗時の目的関数値は最も小さい値を記載している、ノイズ量が増加するにつれてクラスタリング成功時と失敗時の目的関数値の差が減少していて、目的関数値のみからクラスタリングの成否を自動判別するのは困難になる、しかし、Fig.2 の下図に示すような大量のノイズが含まれる場合でも、線形のクラスターを高い頻度で抽出することができている.

Fig.2 の上段の図はノイズデータ数が 10 , c=4 ,  $\lambda=2.0$  ,  $\Delta=-2.0$  とした場合で青色のひし形で示すクラスターにノイズデータが含まれてしまっている .  $\Delta>-2.0$ ではすべての試行でノイズクラスターにはデータが含まれなかった . FCM 法に Davé のノイズクラスタリングを適用する場合 (NFCM 法) では  $\delta<0$  とするとすべてがノイズクラスターに含まれるが , KLFCM 法に適用する場合は  $|A_i|$  の大きさが考慮されるために負の値にすべき場合がある . 中段の図はノイズデータ数が 10 , c=4 ,  $\lambda=2.0$  ,  $\Delta=-3.5$  とした場合 , 下段の図はノイズデータ数が 500 , c=4 ,  $\lambda=2.0$  ,  $\Delta=-3.5$  の場合である .

Fig.3 は 3 次元データ集合を 3 つの線形クラスターと ノイズクラスターに分類した結果を示している.80 個のデータに 50 個のノイズデータを付加してある.パラメータは c=4 ,  $\lambda=2.0$  ,  $\Delta=-10.0$  である.Fig.4 は リレーショナル版である NRKLFCM 法の結果で,関係行列 R は 4 つの線形クラスター内の 140 個のデータと 100 個のノイズデータから相互の距離を  $L_1$  ノルムの 2 乗で求めたものを用いた.ユークリッド距離の 2 乗やさらにその値に 50 をプラスして R を作成した場合も同じクラスタリング結果が得られた.

### VI おわりに

K-L 情報量正則化による FCM 法 (KLFCM 法) に Gustafson-Kessel の制約項を導入した GKLFCM 法に よりロバストなクラスタリング結果が得られることか

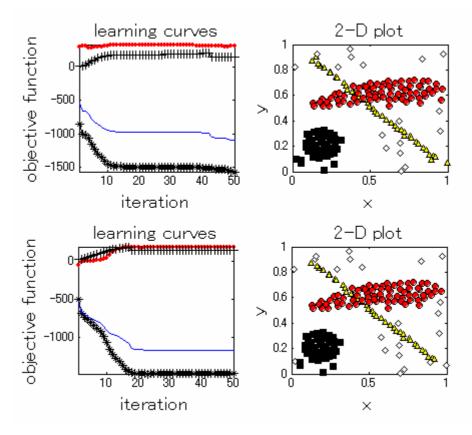


Fig.1 Top: Result of GKLFCM, Bottom: Result of NKLFCM.

Table 1 Success rates and objective function values for the data sets in Fig.1.

	Success	Failure	
GKLFCM	17 (57%) -1480.5	13 (43%) -1436.3	
NKLFCM	25 (83%) -1587.0	5 (17%) -1481.0	

Table 2 Success rates of the NKLFCM algorithm for data sets in Fig.2.

Number of noise data	Success	Failure
10	27 (90%) -1743.5	3 (10%) -1384.9
20	23 (77%) -1800.2	7 (23%) -1457.7
30	25 (83%) -1897.6	5 (17%) -1625.8
200	28 (93%) -2533.5	2 ( 7%) -2172.6
300	30 (100%) -2874.0	0 ( 0%)
500	18 (60%) -3587.8	12 (40%) -3443.6

As the number of noise data increases, the difference in the objective function values between success and failure cases becomes smaller.

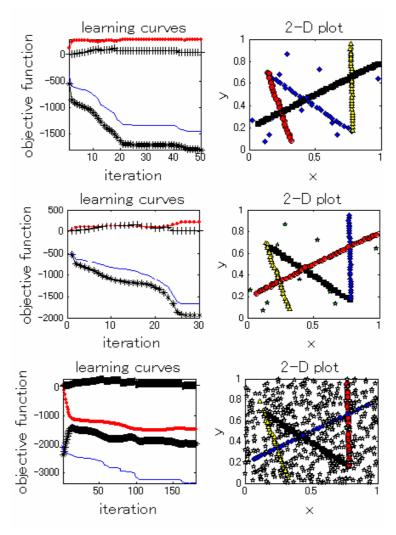


Fig.2. Results of NKLFCM for data sets with four linear clusters and noise data.

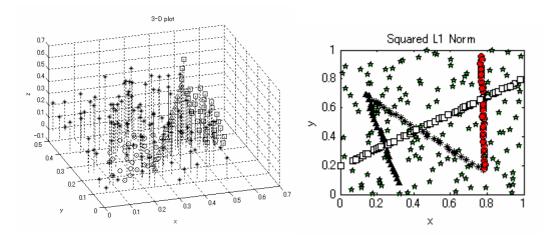


Fig.3 Result of NKLFCM for 3-D data sets. Fig.4 Result of NRKLFCM

ら,KLFCM 法に Davé のノイズクラスタリングを取り入れる際のパラメータ値の設定法について考察した.多くのノイズが含まれたデータから,線形クラスターを抽出できることから画像のエッジ検出など広い応用が期待できる.また,リレーショナルクラスタリングにも有効であることを示した.

#### References

- 1. R. O. Duda and P. E. Hart: *Pattern Classification and Scene Analysis*, Wiley, New York(1973).
- K. Rose: Deterministic Annealing for Clustering, Compression, Classification, Regression, and Related Optimization Problems, Proc. of the IEEE, Vol.86, No.11, pp.2210-2239(1998)
- 3. 赤穂昭太郎: EM アルゴリズム-クラスタリングへの適 用と最近の発展-,日本ファジィ学会誌,Vol.12, No.5, pp.594-602, (2000)
- 4. 宮本定明: クラスター分析入門, ファジィクラスタリングの理論と応用, 森北出版, (1999)
- R. N. Davé, R. Krishnapuram: Robust Clustering Method: A unified View, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol.5, No.2, pp.270-293(1997)
- 6. R. J. Hathaway: Another interpretation of the EM algorithm for mixture distributions, *Statistics and Probability Letters*, Vol.4, pp.53-56(1986)
- 7. 宮本定明,馬屋原一孝,向殿政男: ファジィc-平均 法とエントロピー正則化法におけるファジィ分類関 数,日本ファジィ学会誌,Vol.10, No.3, pp.548-557, (1998)
- 8. 宮岸聖高, 市橋秀友, 本多克宏: K-L 情報量正則化 FCM クラスタリング法, 日本ファジィ学会誌, Vol. 13, No. 4, pp. 406-417, (2001)
- 9. R. N. Davé: Characterization and detection of noise in clustering, *Pattern Recognition Letters*, Vol.12, pp.657-664(1991).
- H. Ichihashi and K. Honda: Robust Clustering in Fuzzy c-Means with Regularization by Cross Entropy, Proc. of 1st International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, Vol.1, pp.471-475 (2002).
- 11. D.E.Gustafson and W.C.Kessel: Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix, *Proc. IEEE CDC*, Vol.2, pp.761-766, (1979)
- 12. R. N. Davé and Sumit Sen, "Robust fuzzy clustering of relational data," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol.10, no.6, pp.713-727, 2002.

- R. J. Hathaway, J. W. Davenport and J. C. Bezdek: Relational duals of the c-means clustering algorithms, *Pattern Recognition*, Vol.22, No.2, pp.205-212(1985).
- 14. H. Ichihashi, K. Honda, T. NARITA, "Relational Fuzzy c-Means with Regularization by K-L Information for Partitioning Data Set into Elliptic Clusters," Proc. of the Fourth International Conference on Intelligent Technologies (InTech'03), pp.616-625, 2003.
- 15. M.E. Tipping, C.M. Bishop, "Mixtures of probabilistic principal component analysers, "Neural Computation, vol.11, pp.443-482 1999.

# ファジィクラスター分析と応用

$F_{11ZZV}$	Cluster	Analysis	and	its	Application
ruzzy	Clustel	Allalysis	anu	105	Application

津田 栄	上江洲 弘明	金川 秀也	清水 誠一	山下 元
Ei Tsuda	Hiroaki Uesu	Syuya Kanagawa	Seiichi Shimizu	Hajime Yamashita
国学院高校	早稲田大学	武蔵工業大学	山田小学校	早稲田大学
Kokugakuin	Waseda	Musashi Institute of	Yamada Elementar	y Waseda
SR.H.S.	University	Technology	School	University

Abstract: We often use fuzzy graph to analyse inexact information such as human behavior, mental process and so on. Concerning cluster analysis of a fuzzy graph, it is difficult to decide the optimal level of fuzzy clustering as to a partition tree. In this paper, we would not only discuss a decision method, but also illustrate its practical effectiveness with the case study concerning sociometory analysis.

### 1. クラスタリングレベルの分析

ファジィグラフをクラスター分析した結果は、分割樹形図として図示されるが、ここで、最適なカットレベルzをどう判断するかという問題が生ずる。一般に、zが1に近づけばクラスター数xは増加し、zが0に近づけばクラスターサイズyは増加する。筆者等は、この状態をファジィ決定を応用して評定し、分割樹形図のカットレベルzの最適値の決定法を説明する。

クラスター分岐度の評価関数をp(z), クラスターサイズの評価関数をq(z)とする。また、 $R_z$ のクラスター数をx(z)、 $R_z$ の最大クラスターサイズをv(z)とする。

① クラスター数, クラスターサイズに条件のない場合:

$$p(z) = \frac{x(z)-1}{a-1}$$
  $q(z) = \frac{y(z)-1}{b-1}$ 

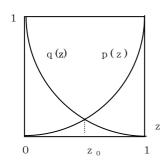
ただし、 $R_1$ のクラスター数を a、 $R_0$ のクラスターサイズを b とする。

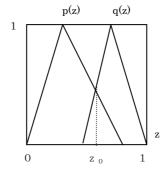
次に、関数 p(z)と q(z)のファジィ決定 p(z)  $\wedge q(z)$ の最大化決定を求めると、最適値  $z=z_0$  が決まる。

② クラスター数, クラスターサイズに条件のある場合:

$$p(z) = \begin{cases} \frac{x(z) - f + 1}{g - f + 1} & (f - 1 \le x(z) \le g) \\ \frac{h - x(z) + 1}{h - g + 1} & (g \le x(z) \le h + 1) \\ 0 & (x(z) \le f - 1) \\ x(z) \ge h + 1 \end{cases}$$

$$q(z) = \begin{cases} \frac{n - y(z) + 1}{n - m + 1} & (m \le y(z) \le n + 1) \\ \frac{y(z) - l + 1}{m - l + 1} & (l - 1 \le y(z) \le m) \\ 0 & (y(z) \le l - 1) \\ 0 & (y(z) \ge n + 1) \end{cases}$$





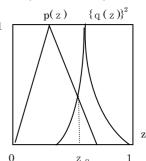


図 1.1 ファジィ決定①  $p(z) \land q(z)$  図 1..2 ファジィ決定②  $p(z) \land q(z)$  図 1.3 ファジィ決定③  $p(z) \land \{q(z)\}^2$ 

ただし、クラスター数の条件 [最小値、最適値、最大値] を [f, g, h]、クラスターサイズの条件 [最小値、最適値、最大値] を [I, m, n] とする。次に、関数 p(z)と q(z)のファジィ決定 p(z)  $\wedge q(z)$ の最大化決定を求めると、最適値  $z=z_0$  が決まる。

③ クラスター数, クラスターサイズに条件と重み のある場合:

補題: y(1)=1のとき、f=2, g=h=a, m=b, I=2であれば、①と②の結果は一致する。一般に、 $z_0$  は区間値となるので、その最大値を

2. ソシオメトリー分析への応用

最適値として用いる。

ソシオメトリー分析において,ファジィ友好グラフをクラスター分析すると分割樹形図ができる。

- ① 条件のない場合:ファジィ決定  $p(z) \land q(z)$  の最大化決定は z  $_0$ =0.58 となる。
- ② 条件のある場合:ファジィ決定  $p(z) \land q(z)$  の最大化決定は  $z_0=0.74$  となる。

ただし, [f, g, h] = [3, 5, 7], [I, m, n] =[1, 2, 4] とする。

③ 条件と重みのある場合:ファジィ決定 $\{p(z)\}^3$   $\land q(z)$ の最大化決定は $z_0$ =0.59 となる。ただし,条件は②と同じとする。

### 参考文献

[1] 西田, 竹田: ファジィ集合とその応用, 森北出版, 1978.

- [2] C.Romsburg: Cluster Analysis for Researchers Lifetime Learning Publication, 1984.
- [3] 津田,山下:ファジィグラフを応用したソシオメトリー分析法,日本ファジィ学会誌6巻3号,1994. [4] 洲之内,山下:ファジィ情報分析,共立出版,
- [5] 山下: ファジィ理論と応用, 学文社, 1997.

1995.

- [6] 山下, 須田: ファジィ数学入門, 森北出版, 1997.
- [7] 津田,山下,箭内,稲井田,上江洲:ファジィ決定を応用したクラスタリングレベル分析,日本ファジィ学会大会 FD3-2, 1999.
- [8] 津田, 箭内, 山下: Decision Analysis of Optimal Fuzzy Cluster Level, Asian Fuzzy Systems SymposiumIV 1T2E-4, 2000.
- [9] 津田,山下:ファジィ理論を応用したクラスタリングレベル分析,日本数学会秋季大会応用数学分科会 13,2000.

[10] 津田, 金川:ファジィクラスタリングのレベル分析, 日本知能情報ファジィ学会 SSWS B4-1, 2004.

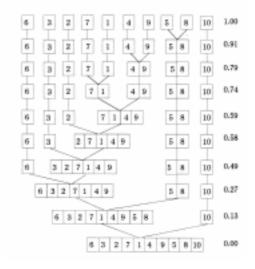
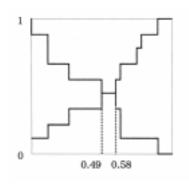


図 2.1 分割樹形図



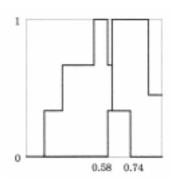




図 2.2 ファジィ決定① p(z)∧q(z)

図 2.3 ファジィ決定② p(z)∧q(z)

図 2.4 ファジィ決定③  $\{p(z)\}^3 \land q(z)$ 

# 希少さを考慮した類似度のクラスタリング

# Clustering using the similarity in consideration of rare of attribute value

松本 麻奈美

江本 全志

向殿 政男

Manami Matsumoto

Masashi Emoto 明治大学

Masao Mukaidono

Meiji University

#### Abstract

The traditional similarity is calculated by using values of only two objects. However, usually in actual society, similarity obtained from two objects changes by people. For example, degrees of similarity of a Northern European and a Japanese are different in the case where two persons of blond hair are seen. In 2003, we have proposed similarity based on uniqueness measure. The similarity use a subset of all objects regarded as knowledge in an information system and change by knowledge. In this paper, we consider clustering using similarity based on uniqueness measure and its properties.

# 1 はじめに

昨今、さまざまな類似度が提案されてきた。一般的 なものとして、ユークリッド距離やハミング距離等が あり、クラスタリングや広い分野にて使われている。そ れらの類似度は、全体集合を考慮せずに2つの対象の 値のみから類似度を求めている。そのため異なるデー タベースを用いても、比較する対象間の属性値が同じ であれば、類似度が変わることはない。しかし現実社 会では、2つの対象から得られる類似度が人によって 変わるのが普通である。例えば、金髪の2人を、金髪 の多い北欧の人から見た場合と黒髪の多い日本人から 見た場合とでは、この2人の類似度は異なるというよ うにである。そこで、この概念に倣い、データ全体から 見た対象同士を比較し、データ内における希少なデー タを重視する類似度を提案した [2][3]。異なるデータ ベースを用いた時に比較する対象間の属性値が同じ場 合、対象間の類似度が変わる事を可能にした。さらに、 より改良を重ねることで人の感覚に近い類似度として 表し、類似度の数学的性質を示した[4]。本論文では、 希少さを考慮した類似度を用いて、クラスタリングを 行い、その性質を明らかにする。

# 2 希少さを考慮した類似度

人間は対象(人間や動物など)を認識するときに、ある属性の属性値(毛の有無、目の大小など)の希少具合から大まかに似ていると判断することがある。例えば、2人の双子でない日本人が写っている写真と同じ

日本人達に髭を付け足した写真があるとする。これらを日本人が見た場合とアラブ人が見た場合に対して比較することを考える。日本人が2つの写真を見た場合、髭のない被写体よりも髭がある被写体の方が類似して見える。これは、日本人が髭を持つ人を見慣れていないためである。しかしアラブ人が2つの写真を見た場合でも、髭を持つ被写体の方を似ているように感じる。これは、日本人は髭のない人が多いという知識を持っているためである。もし2枚の写真の被写体がアラブ人であれば、髭のない方を似ているように感じる。この考え方は、[4]にて定義した類似度の考え方に通ずるものである。本章では、提案した類似度の定義と特徴を簡単に記す。

### 2.1 数式

まずは、情報システムについて定義する。本論文では2値の情報システムについて取り上げる。

定義 1 情報システムは属性によって特徴付けられた対象のデータベースであり、 $I=(U,A,V,\rho)$  で表される。U は対象の全体集合、A は属性の全体集合、V はドメインの全体集合を表す。ドメインとはある属性の値の集合。 $\rho:(U\times a_j)\to D_j$  は、対象と属性を入力するとその属性値を返す関数である。 $D_j$  は属性  $a_j$  に対するドメインである。

次に、一致度について定義する。

定義 2 任意の1つの属性  $a_k \in A$  における 2 つの対象  $u_i, u_i \in U$  の一致度を式  $M(u_i, u_i, a_k)$  として表す。

$$M(u_i, u_j, a_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } \rho(u_i, a_k) = \rho(u_j, a_k) \\ 0 & \text{if } \rho(u_i, a_k) \neq \rho(u_j, a_k). \end{cases}$$
(1)

定義1の式を用いて、対象の部分集合における属性 値の確率を定義する。

定義 3 知識  $X \in U$  における対象  $u_i$  の属性  $a_k$  の値の 起こる確率を次のように定義する。

$$P(u_i, a_k, X) = \frac{\sum_{u_j \in X} M(u_i, u_j, a_k)}{|X|}.$$
 (2)

定義3は、属性値から見た部分集合 X における対象  $u_i$  の割合であると、表すことが出来る。

定義3から得られた確率を用い、属性値の組み合わ せの希少さを次に定義する。

定義 4 定義3で定義した確率を用い、2つの属性値 の組み合わせの希少さを次のように定義する。

$$C(u_{i}, u_{j}, a_{k}, X)$$

$$= \begin{cases}
1 - P(u_{i}, a_{k}, X)^{2} \\
\text{if } M(u_{i}, u_{j}, a_{k}) = 1 \\
1 - 2 \times P(u_{i}, a_{k}, X) \times P(u_{j}, a_{k}, X) \\
\text{if } M(u_{i}, u_{j}, a_{k}) = 0.
\end{cases}$$
(3)

定義4で定義された希少さを用い、2つの対象間の 類似度を定義する。

定義 5 部分集合  $X \subseteq U$  における 2 つの対象  $u_i, u_i \in$ U の希少さの和を利用し、類似度を計算する。

$$S_{uni}(u_i,u_j,X)=rac{\displaystyle\sum_{k=1}^{|A|}(C(u_i,u_j,a_k,X) imes M(u_i,u_j,a_k))}{\displaystyle\sum_{k=1}^{|A|}C(u_i,u_j,a_k,X)}$$
. 性に限り評価する用いるだけで  $Y\subseteq A$  を用意して  $Y\subseteq A$  を見を  $Y\subseteq A$  を見を  $Y\subseteq A$  を用意して  $Y\subseteq A$  を用意して  $Y\subseteq A$  を用意して  $Y\subseteq A$  を見を  $Y\subseteq A$  を見を  $Y\subseteq A$  を見を

#### 特徴 2.2

本章の最初に述べた概念と 2.1 節にて述べた式の共 通点を挙げる。対象の集合 U が 2 枚の写真の他、人 種の異なる髭のある無しに関連した写真数枚の被写体 になる。属性集合 A は人を見分ける要素(髭、目等) であると考えられる。その時、アラブ人が日本人を見 たときに使われる知識 X は、その人が持つ知識全て ではなく、その人の知識内の日本人に対する部分であ る。逆に、アラブ人を見た場合には、その人の知識内 のアラブ人に対する部分を知識 X として持つといえ る。すなわち、人に合わせた知識分けをしているとい

う点で非常に優れた類似度であると考えられる。そし て、これを利用し、どのように知識を変更すれば、出 力として得たい情報が得られるかについて次章で考え る必要がある。

また、1 属性ごとの希少さという概念を類似度に入 れることにより、知識の変化から順序関係を変えるこ とが可能であることもまた、[2]にて実証された。

しかし、希少さのために、類似度が 0/0 になること がある。それは、知識の要素が全て同じときである。 確率が全て1となるため、希少さは0になる。したがっ て、希少さの和から類似度の分母が 0 となり、計測不 能となる。ここでは、0/0を1として解釈するのが自 然と思われる。なぜなら、全ての属性において 0/0 と なる場合、比較する対象の全ての属性値が同じである ためである。

#### クラスタリングとその性質 3

本章では、希少さを用いた類似度からクラスタリン グとその性質を導き出す。まずは、クラスタリング手法 として最短距離法や最長距離法など多くの手方がある が、その多くは、推移律が成り立つかどうかに基づいて いる。そこで、本論文では類似度を求めた後に -cut を 行い、もし  $S_{uni}(A,B,X) \geq 1$  かつ  $S_{uni}(B,C,X) \geq 1$ ならば  $S_{uni}(A,C,X) \geq 1$  とする。したがって、この条 件をみなすとき、A,B,C は同じクラスとみなされる。 ただし、A=C もありえると考えるため、大雑把なク ラスタリングとなる。

クラスの分かれ方を見る傾向として 2 属性と 3 属 性に限り評価する。また、対象の知識の集合  $X\subseteq U$ を用いるだけでなく、属性に対しても属性の部分集合  $Y \subseteq A$ を用意し、あらゆる可能性を試す。

2 つの属性から起こる属性値の組み合わせは 4 種類 ある。すなわち、 $\{\{0,0\},\{0,1\},\{1,0\},\{1,1\}\}$ である。こ れらを対象の組み合わせ  $\{u_1, u_2, u_3, u_4\}$  であると定義 する。対象をクラスタリングした時に得られる組み合 わせは、 $2^4 - 1 = 15$  通り存在する。クラスタリング 時に得られた結果を示す。

表1の結果より、全種の組み合わせを得ることは できなかった。\*の組み合わせの場合、属性が1種類  $Y = \{a_1\}, Y = \{a_2\}$  の時だけ得られる組み合わせで ある。これは1つの要素しか見ないために、全ての対 象の知識 X に対応する (15 通り)。例を挙げる。属性 の知識集合が  $Y = \{a_1\}$  であるとき、それぞれの対 象における属性値の組み合わせは、 $\{u_1, u_2, u_3, u_4\}$  =

表 1: クラスタリングにより現れた組み合わせ

クラス数	集合
1	{{1,2,3,4}}
2	$\{\{1,2\}\{3,4\}\}^* \{\{1,3\}\{2,4\}\}^* \{\{2,3,4\}\{1\}\}$
	$\{\{1,3,4\}\{2\}\}\ \{\{1,2,4\}\{3\}\}\ \{\{1,2,3\}\{4\}\}$
3	$\{\{3,4\}\{1\}\{2\}\}\ \{\{2,4\}\{1\}\{3\}\}\ \{\{1,3\}\{2\}\{4\}\}$
	{{1,2}{3}{4}}
4	{{1}{2}{{3}{{4}}}
×	$\{\{1,4\}\{2,3\}\}\ \{\{1,4\}\{2\}\{3\}\}\ \{\{2,3\}\{1\}\{4\}\}$

<sup>{}</sup> 内の数字は、1...u1 2...u2 3...u3 4...u4 の省略

 $\{\{0\},\{0\},\{1\},\{1\}\}$  となる。すなわち、どの対象を知識としても  $\{\{u_1,u_2\},\{u_3,u_4\}\}$  としか分けることが出来ない。

得ることのできなかった組み合わせについて考察する。表 1 では、 $\times$  の付いた欄にあたる。属性値を  $\{u_i\}=\{\rho(u_i,a_1),\rho(u_i,a_2)\}$  として記述する時、それぞれの対象がクラスとして結合できない組み合わせの属性値をみる。各々の対象は  $\{u_1,u_4\}=\{\{0,0\},\{1,1\}\}$ 、 $\{u_2,u_3\}=\{\{0,1\},\{1,0\}\}$  であり、相反する組み合わせであることが分かる。これらの類似度は知識によらず 0 になるため、 $u_1$  と  $u_4$ 、 $u_2$  と  $u_3$  のみで結合されることはありえない。

### 3.2 3 属性

3 属性のときに起こる対象の組み合わせを表 2 に 表す。

表 2: 3 属性で起こる組み合わせ

	$a_1$	$a_2$	$a_3$
$u_1$	0	0	0
$u_2$	0	0	1
$u_3$	0	1	0
$u_4$	0	1	1
$u_5$	1	0	0
$u_6$	1	0	1
$u_7$	1	1	0
$u_8$	1	1	1

8 種類の対象に対しクラスタリングを行った結果として、表 3 に表す。

2 属性のクラスタリングと比べ、表すことの出来る組み合わせの数は少ない。偏りを持つのが特徴である。

表 3: 3 つの属性から得られるクラスタリング結果

クラス数	各クラスの要素数	得られた数/数
1	8	1/1
2	1 - 7	8/8
	2 - 6(*2)	12/28
	4 - 4(*1,*3)	3/35
3	1 - 1 - 6	12/28
	2-2-4(*2)	6/210
4	1 - 1 - 1 - 5	24/56
	2-2-2-2(*2,*3)	3/105
5	1 - 1 - 1 - 1 - 4	14/70
6	×	-
7	1-1-1-1-1-1-2	12/28
8	1-1-1-1-1-1-1-1	1/1

(\*1)...属性の知識集合の要素が 1 つ(\*2)...属性の知識集合の要素が 2 つ

(\*3)…対象の知識集合  $X = \{u_1, ..., u_8\}$  に対応

属性が 3 種類  $Y=\{a_1,a_2,a_3\}$  ならば、2 つの要素を持つクラスが複数になることはない ((\*) 以外)。これは、3 種の属性値そのものが特徴であり、それだけで1 つの対象とみなすことが出来るためである。表 3 中の (\*2) が付く組み合わせは、偶数個の要素を持つクラスしか持たない。表 3 中の (\*) が付く組み合わせは、2 値の組み合わせ ((\*1) なら 0,1 の 2 種類、(\*2) なら00,01,10,11 の 4 種類 ) が大きくクラスタリングに影響したと考えられる。したがって、(\*1) の組み合わせは2 個以下でクラスを分けるのに用いるのに対し、(\*2) の組み合わせは 4 個以下でクラスに分けるのに使用される。そのため、属性の知識集合 Y において $2^{|Y|}$  個以下のクラスを作ることが出来ると考えられる。

上記について、例を挙げて説明する。2 つのクラスに分けるときの組み合わせについて属性の集合からの規則を表4に表す。また、対象の集合からの規則性を表5に表す。

表 4: クラスタリングの規則性 1

クラス	属性の知識集合	クラス分けの判断
{{1}{{2,,8}}}	$Y = \{a_1, a_2, a_3\}$	$   \begin{cases}     a_1, a_2, a_3 \\     = \{0, 0, 0\}   \end{cases} $
{{1,2}{3,,8}}	$Y = \{a_1, a_2\}$	${a_1, a_2} = {0, 0}$
$\{\{1,,4\}\{5,,8\}\}$	$Y = \{a_1\}$	$\{a_1\} = \{0\}$

{} 内の数字は、1...u<sub>1</sub> 2...u<sub>2</sub> 3...u<sub>3</sub> 4...u<sub>4</sub> 5...u<sub>5</sub> 6...u<sub>6</sub>

7...u<sub>7</sub> 8...u<sub>8</sub> の省略

表4から、クラスの分かれ方には属性の知識集合が 大きく関わることが分かる。属性の知識集合の要素数 が大きいほど、クラスタリング後に出来た2クラス間 の要素数の差が大きくなる。表5では、対象の知識集 合の分布から対称性が分かる。中央の値に近づくほど

<sup>\*...</sup>属性の知識集合 Y が、 $Y \neq \{a_1,a_2\}$  のみに出る組み合わせ

表 5: クラスタリングの規則性 2

衣 3. ノノヘノリノノの規則注 4		
クラス	対象の知識集合	
{{1}{{2,,8}}}	X  = 1 (1)	
	X  = 3 (7)	
	$ X  = 4 \ (1)$	
$\{\{1,2\}\{3,,8\}\}$	$ X  = 1 \ (2)$	
	X  = 2 (1)	
	$ X  = 3 \ (15)$	
	X  = 4 (3)	
	X  = 5 (14)	
	$ X  = 6 \ (1)$	
	X  = 7 (2)	
$\{\{1,,4\}\{5,,8\}\}$	全ての組み合わせ	

{} 内の数字は、 $1...u_1$   $2...u_2$   $3...u_3$   $4...u_4$   $5...u_5$   $6...u_6$   $7...u_7$   $8...u_8$  の省略

() 内の数字は、クラスタリングにて現れた個数

ほぼ出現数は高くなる。これは、2つのクラスに分かれるときだけでなくクラスが増えた状態に関しても、ほぼ同じである。表4と表5から、属性の知識集合の要素数が大きいほど、対象の知識集合の数が少ないといえる。すなわち、属性の知識と対象の知識の間で巧みにバランスをとることが可能であると考えられる。例えば、ある一定の属性の知識が必要であるならば、それに合う対象の知識数も自ずと限定されてくるという具合にである。

3 つの属性のクラスタリングでは算出することの出来なかった組み合わせを、表 6 に表す。

表 6: 全く得ることのできなかった組み合わせ

クラス数	各クラスの要素数
2	3 - 5
3	1 - 2 - 5
	1 - 3 - 4
	2 - 3 - 3
4	1 - 1 - 2 - 4
	1 - 1 - 3 - 3
	1 - 2 - 2 - 3
5	1 - 1 - 1 - 2 - 3
	1 - 1 - 2 - 2 - 2
6	1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 3
	1-1-1-1-2-2

# 4 終わりに

先の論文 [2][3] から、希少さを用いた類似度の特性を表した。知識(対象の集合)を入れ替えることにより、対象間の順序関係が変わるということである。本論文から、希少さの類似度を使ったクラスタリングの性質を表した。属性を2つと3つに限定したものの、規則性は明らかである。

また、考えられる応用として、多入力・多出力にお

ける認識がある。人は特定の人の特徴(口の大きさ等)を思い出すことで、その特定の人を思い出す。また、特定の人を見ることで、他のよく似た人を思い出したり、印象語(かわいい等)を持つ。これらの人の作用は、データベースが同じであっても、持っている知識やアルゴリズムを使い分けることで可能となる現象ではないだろうか。そこで、私達の考え方として、まずはどういう知識(対象や属性)が必要とされるかを考えることを目標とした。

今後の課題は、その応用を生かすためにクラスタリングの特徴をどのように用いるかにある。また、希少さの類似度を用いたクラスタリングは、本論文の規則以外にもまだまだ何かしらの規則があると考えられる。まずは、規則をさらに掘り下げていくことが重要になる。

# 参考文献

- [1] 山口 智浩, 脇谷 康一, 谷内田 正彦: "情報量を考慮した関係記述の類似度に基づく家の初期構造概念の学習", 情報処理学会 ジャーナルアブストラクト(Vol37, No.11 004), 1996.11
- [2] 松本 麻奈美, 江本 全志, Rolly Intan, 向殿 政男: "属性値の希少さを考慮した類似度の提案", 第19回ファジィシステムシンポジウム講演論文 集, pp693-696, 2003.9
- [3] Manami Matsumoto, Masashi Emoto, Rolly Intan, Masao Mukaidono: "A Proposal of Similarity between Two Objects based on Uniqueness Measure", International Conference on Intelligent Technologies 2003, 2003.12
- [4] Masashi Emoto, Rolly Intan, Manami Matsumoto, Masao Mukaidono: "Mathematical Properties of Similarity Dealing with Uniqueness Measure", International Conference on Intelligent Technologies 2003, 2003.12

### 連絡先

**〒** 214-8571

神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1 6404 室 明治大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻 松本 麻奈美

電話 (FAX):044-934-7442 E-mail:cat-tail@cs.meiji.ac.jp

# PCR を用いた適応的 DNA 分子に基づく計算アルゴリズム

Computation Algorithm based on Adaptive DNA molecules by Using Polymerase Chain Reaction

明治大学 理工学部 電気電子工学科(応用DNAコンピューティング研究所) 小野 治 坪井勇政 山本常人 Zuwairie Ibrahim 渡辺心平

### 1. 研究目的

本研究は、Adleman-Lipton パラダイムに基づいた DNA コンピューティングにおける課題の一つである使用分子 の量的爆発という問題を改善することを目的とし、DNA コンピューティングの新しい手法として PCR を用いた 適応的 DNA 分子に基づく計算アルゴリズムを構築する。また、そのアルゴリズムを最短経路問題に適用し、計算機シミュレーションを行うことでその有効性を検証する。

### 2. DNA コンピューティング

### 2.1 Adleman-Lipton パラダイム

演算には、信号とその制御が必要である。現在の電子計算機において、それらは電子の流れであり、オンとオフの2状態によってその流れを調整することである。このオンとオフのパターンによってデータ値や命令が表現され、その命令をデータ値に与えることにより演算が実行できるのである。

DNA コンピューティングでは DNA の構成要素の一つである 4 種類の塩基が演算に必要となる信号であり、その塩基の並びがデータ値の表現に利用される。一方、命令はデータ値を表現した DNA 分子同士の連結や、増幅、あるいは、分離というような化学的操作によって実現され、これらの操作により DNA という信号を制御する。そして、DNA 計算において命令の役割を担う化学的操作を組み合わせることでアルゴリズムを構築することができるのである。

この DNA 分子が計算を行うというパラダイムを実験によって実証したのが Adleman である。Adleman は実際の DNA を用いて 7 ノードの有向ハミルトン経路問題を解くことに成功した。この手法が提案された後, Liptonがブール式の充足可能性問題を解き、この手法を一般化したことから現在、この手法は Adleman-Lipton パラダイムと呼ばれている。そのアルゴリズムを以下に示す。

### Algorithm

Step1.【符号化·連結】ランダムな経路を生成する。

Step2.【抽出】 $v_{in}$ から始まり $v_{out}$ で終わる経路のみ残す。

Step3.【抽出】ちょうど7個の頂点を含む経路のみ残す。

Step4.【抽出】各頂点を一度だけ通るものを残す。

Step5.【検出】経路が残っていればそれがハミルトン経路である。残っていなければハミルトン経路は存在しない。

### 2.2 Adleman-Lipton パラダイムの問題点

Adleman-Lipton パラダイムによる DNA を用いた計算 は、超並列計算を可能にし、エネルギー効率やストレー ジとしての有用性など非常に高いポテンシャルをもつ。 しかし、このパラダイムにはいくつかの問題点が存在す る。例えば、アルゴリズムが解くべき問題に強く依存し ているという点や、化学反応による計算の精度の問題な どがある。しかし、ここでは、問題規模と使用分子の量 との関係について検討したい。Adleman-Lipton パラダイ ムでは、問題規模が大きくなるにしたがって、計算手順 の数は線形的な増加で収まるが、連結反応に必要となる DNA 断片量が指数関数的に増加し、量的な爆発を起こし てしまう。この問題の原因は、生成可能なすべてのパタ ーンを分子の連結によって作り出し、その生成物にフィ ルタをかけるように条件を満たさない分子を段階的にふ るい落としていくという非効率なアルゴリズムにある。 つまり、このアルゴリズムで解を検出するためには、す べてのパターンを作り出せるだけの十分な量の DNA 分 子をあらかじめ準備しなければならない点に原因がある のである。このために、問題規模の増大によってパター ン数が急激に増加し、必然的に大量の分子を必要とする ことになる。

### 2.3 適応的 DNA 分子に基づく計算アルゴリズム

上述の問題点を改善するために、本研究では、「学習」と「強化」の概念を導入した適応的 DNA 分子に基づく計算アルゴリズムを構築する。

アルゴリズムには結果をフィードバックする手続きを

加える。これにより、最終的に検出される分子を知識として記憶し、その結果を次の計算に利用することによって、結果を再び新たな知識として蓄えるという知識変化の機能をもつ「学習」型 DNA 計算アルゴリズムを構築できる。また、この知識構造を変化させるために、検知結果として得られる DNA 分子をポリメラーゼ連鎖反応(PCR)によって増幅させ、用いる分子濃度を動的に変化させることで問題に適応した分子環境を作り出すという「強化」手続きを導入している。この手続きによって、用いる分子を削減し、解の精度を向上させることができるのではないかと考えるが、そのことについては、シミュレーションを行い、検討する。ここで、アルゴリズムを以下に示す。

### Algorithm

Step1【符号化】与えられた問題をDNA分子で表現する。 Step2.【連結】符号化した DNA 断片を連結させる。 Step3【抽出】生成配列から解候補である配列を抽出する。 Step4.【切断】抽出した配列を切断する。

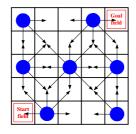
Step5.【増幅】切断した配列を PCR 増幅させる。

Step6. Step2 から Step5 までを繰り返す。

### 3. 最短経路問題への適用シミュレーション

### 3.1 適用問題

n×nの正方形探索空間において、その空間の右下の領域を探索開始地点、左上を目的地点としたときの最短経路を発見するという問題に対して前述のアルゴリズムを適用する。ただし、移動体は壁に接しない位置において隣接する上下左右、斜めの8方向の領域に移動可能とする。



Figl. 探索空間

### 3.2 符号化と連結

領域i に図2()に示すような塩基配列を割り当てる。ここでは、これを領域用配列と呼ぶことにする。領域用配列は、 $P_i$ ,  $N_i$ という領域固有の配列と、その間に挟まれる配列 、 で構成される。配列 、 は切断操作によって分割される部位となる配列である。

また、領域 i から移動可能なすべての領域 j に対して

図 2( )に示すような配列を作成し、これを移動用配列と呼ぶことにする。ただし、記号「~」は相補対を表す。

設計したすべての領域用配列と移動用配列を用いて連結操作を行う。この操作によって移動用配列は相補関係にある領域用配列を見つけ出し、二本鎖分子を形成する。ここで、各分子の連結によって様々なパターンの結合配列が生成されるが、用いる各符号化配列は等濃度の状態であれば、連結させる DNA 分子の選択は等確率で行い、その連結はランダムに行われる。また、連結によって得られる塩基配列は、それぞれ異なった長さをもつようにしなければならない。計算機シミュレーションでは連結させる分子ごとにその連結回数をランダムに決定し、結合した塩基配列を生成するようにしている。

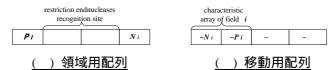


Fig. 2 符号化塩基配列

### 3.3 抽出と切断

抽出は、連結によって得られる様々なパターンの DNA 塩基配列の中から、解の候補となる塩基配列のみを取り 出すという過程である。シミュレーションで扱う最短経 路問題において解となるためには少なくとも生成された 配列が開始地点の領域から始まり目的地点の領域で終わ るという特徴をもつ必要がある。さらに、解候補の中で も連結した分子の長さが短い配列の方が求める最適解で ある可能性が高いということは明らかである。従って、 この二つの特徴点を満たしているものを抽出し、その配 列を最短経路問題における優良解候補配列とする。この 最良解候補配列を抽出するために、先頭と末端の領域用 配列が開始地点の領域と目的地点の領域であるかどうか の判定を行い、その判定条件を満たす配列を生成させる のだが、どの程度の数を作り出すのかが問題となる。そ こで、計算機上では、パラメータによってその数を指定 できるようにした。従って、一定のパターンが作成され た時点で、その操作を終了し、そこで得られた配列の中 から、最も短い配列を最良解候補配列として抽出するよ うにしている。

最良解候補配列が抽出された時点で、その配列に対して結合配列を切断するという操作を行う。

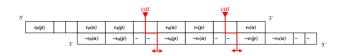


Fig. 3 塩基配列の切断

本来であれば、切断部位であるかの条件判断を行い、その位置が切断認識部位であればそこから切り離すとい

う流れでプログラム化されるのであろうが、連結に用いるすべての配列はワトソン・クリックの 相補性による結合によって制限酵素の認識部位が現れるように設計しているので、あらためてそのような条件判断の処理をおこなう必要はない。ただし、これは、制限酵素による切断反応がすべての認識部位で行われ、再び領域用配列を取り出せるという過程のもとでのことである。このプログラムでは、切断が理想的に行われると仮定しているため、先に述べたような条件判断を行っていない。

### 3.4 増幅と反復計算

PCR 増幅は、切断した二本鎖塩基配列を変性により一本鎖に解離させ、その塩基配列にプライマーを付着、伸長させることにより実現される操作である。この PCR 操作を行うことで、抽出した最良解候補配列を構成する各移動用配列を増幅することができる。計算機シミュレーションでは、取り出した配列がどのような経路を移動してきたかを参照し、その移動で必要となった移動用配列の濃度値を高めることによりこの過程を実現することができる。ここで、1回の計算サイクルで濃度差をどの程度つけるかということが問題になるが、これは、パラメータとして、その増幅率を指定し、その増幅率に基づいて濃度差を与えることにする。

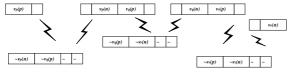


Fig. 4 一本鎖分子への解離



Fig. 5 プライマー

濃度差のある移動用配列に符号化した領域用配列と移動用配列を加え、反復計算をさせる。再び実行される連結操作では、各移動用配列に濃度差があるので、その差に応じて連結させる配列の選択を行わなければならない。つまり、濃度の高い移動用配列は連結する確率が低くなるはずであり、それに応じた塩基配列の選択が必要とされる。この濃度差に対応した連結させる配列の選択確率の決定が、1回目の処理と異なる点である。

連結・抽出・ 切断・増幅の サイクルを繰り返すことによって、連結させる分子の選択確率を増減させ、最終的には最適解の検出を行うのだが、どの程度のサイクル数を反復させるかが問題になる。反復計算の中で、ひとつの最良解候補配列を検出する回数が増えるとその配列を

構成している移動配列が増幅されていき、さらにその配列を検出する確率が増える。そして、最終的には、その配列が必ず検出されるようになるであろう。しかし、どの程度の繰り返し計算を行えば、検出する配列を収束させられるのかはわからない。この点については、実際にシミュレーションを行って検証していくことにする。

### 3.5 シミュレーション結果

表 1 は Adleman-Lipton パラダイムに対するシミュレーション結果である。表の中段は頂点数を 36,49,64 としたときの使用分子のパターン数であり、下段は理論的に求めた経路パターンの総数である。ただし、この経路総数は移動方向を 4 方向に限定したものである。

本研究で構築した適応的アルゴリズムを用いた場合の シミュレーション結果を表 2 に示す。

また、表 2 に示した試行回数 2 回のときと試行回数 10 回のときの分子パターン数を取り出し、Adleman-Lipton 手法との比較を行ったものが表 3、表 4 である。

Table 1 解検出に要するパターン数

頂点数	6 <b>×</b> 6	7×7	8×8	
パターン数	$1.3 \times 10^3$	$3.3 \times 10^{3}$	$1.7 \times 10^4$	
経路総数	$4.6 \times 10^4$	$5.6 \times 10^5$	$6.9 \times 10^6$	

Table 2 用いる分子のパターン数

試行回数/field	25	36	49	64	81
2	3.7.E+02	5.8.E+02	9.5.E+02	2.0.E+03	3.2.E+03
4	2.1.E+02	3.9.E+02	6.8.E+02	1.4.E+03	2.3.E+03
6	1.1.E+02	2.6.E+02	4.8.E+02	1.0.E+03	1.6.E+03
8	6.4.E+01	1.7.E+02	3.4.E+02	7.2.E+02	1.2.E+03
10	3.5.E+01	1.2.E+02	2.4.E+02	5.2.E+02	8.4.E+02
12	2.0.E+01	7.8.E+01	1.7.E+02	3.7.E+02	6.1.E+02
14	1.1.E+01	5.3.E+01	1.2.E+02	2.7.E+02	4.3.E+02
16	6.1.E+00	3.5.E+01	8.8.E+01	1.9.E+02	3.1.E+02
18	3.4.E+00	2.4.E+01	6.2.E+01	1.4.E+02	2.2.E+02
20	1.9.E+00	1.6.E+01	4.4.E+01	9.8.E+01	1.6.E+02

Table 3 用いる分子の削減率(試行回数2回)

頂点数	5 <b>x</b> 5	6 <b>x</b> 6	7 <b>x</b> 7	8 <b>x</b> 8	9 <b>×</b> 9
Adleman-Lipton	7.1.E+2	1.3.E+3	3.3.E+3	1.7.E+4	2.0.E+4
Adaptive Algorithm	3.7.E+2	5.8.E+2	9.5.E+2	2.0.E+3	3.2.E+3
分子使用率 [%]	52.1	44.6	28.8	11.8	16.0

Table 4 用いる分子の削減率(試行回数 10 回)

頂点数	5 × 5	6 <b>x</b> 6	7×7	8 <b>x</b> 8	9 <b>×</b> 9
Adleman-Lipton	7.1.E+2	1.3.E+3	3.3.E+3	1.7.E+4	2.0.E+4
Adaptive Algorithm	3.5.E+1	1.2.E+2	2.4.E+2	5.2.E+2	8.4.E+2
分子使用率 [%]	4.9	9.2	7.3	3.1	4.2

# 3.6 考察

表3から本研究で構築した適応的アルゴリズムは、頂点数が25 あるいは36 程度の問題規模では、Adleman-Lipton 手法で使用する分子の50%程度の量を必要としていたのと比べ頂点数が64,81 となるとその量は10%台となる。問題規模の増大に伴い、無駄な経路が急激に増加するため、そのような経路の生成を削減していくこの手法が有効であることを示す結果となった。また、実際に、このアルゴリズムにしたがって化学的実験を行うと余計な分子間の結合が減少し、無駄な連結を防ぐばかりではなく、予期せぬ連結によって起こるエラーを軽減することができるという利点も得られるのではないかと考える。

このアルゴリズムを用いることで、使用する分子の量を削減することができ、その有効性を示すことができたが、化学操作の繰り返し計算には限度があり、この回数の増加が計算量の爆発を招いてしまうおそれがある。従って、極力反復回数を減らし、より効率的な解の検出が実現できるようにしたい。そこで、本研究で構築したアルゴリズムを並列化アルゴリズムに拡張し、その結果について考察してみる。

並列化アルゴリズムは次のようにして実現する。

tube 0, tube 1, ・・・, tube n という n このチューブを 用意し、それぞれのチューブに対して適応的アルゴリ ズムを適用し数回の試行を行う。

n 本のすべてのチューブを混合させる。 混合した溶液に適応的アルゴリズムを適用する。

表2から頂点数64の探索空間において作成するパターン数を98とすると試行を20回繰り返さなければならないことがわかる。そこで、4本のチューブを用いて100パターン作成する試行を並列的に10回繰り返した後、すべてのチューブを混合させ、さらに試行を繰り返してみることにする。

この問題に対する結果は平均して 18 回の試行で解を検出することができたというものであった。並列化によって若干の改善を図ることはできたが、抜本的な解決には至らなかった。しかし、このような並列化と本研究で構築したアルゴリズムを効果的に組み合わせることによって使用分子の量を削減するのと同時に計算量を抑えるより効率的なアルゴリズムを開発できるのではないかと考える。

本研究では、構築したアルゴリズムを最短経路問題という一つの最適化問題に対して適用して、その結果を検討考察したにとどまり、このアルゴリズムが最適化問題すべてに対して有効であるかという点までには至っていない。また、構築したアルゴリズムにはPCRによって増幅させる割合や反応させる分子の量というようなパラメータの設定、与えられた問題に対して DNA 分子でどう表現するのか、解候補の中から増幅し再び計算に利用す

る分子はどの分子か、というような問題が存在する。その中でも DNA による符号化と増幅させる分子の決定がこのアルゴリズムの重要な因子であり、問題に応じてそれらを適切に設定する必要がある。

### 4. まとめ

DNA コンピューティングが高いポテンシャルをもつということは事実であるが、この計算パラダイムには解決しなければならない課題が多く残っている。その課題の中で、問題規模の増大に伴う DNA 分子の量的爆発という問題が存在する。本研究では、その改善を行うために PCR を用いた適応的 DNA 分子に基づく計算アルゴリズムを構築した。このアルゴリズムには新たに「切断」という操作を加え、計算で使用した分子を次の計算にフィードバックするという機構を考案した。また、フィードバックによって再び使用される分子には PCR による増幅を行い、用いる塩基配列に応じて濃度差が生じるようになっている。これにより、解候補となる分子を絞り込み、解の検出を行うことができる。

このアルゴリズムを用いて、計算機シミュレーションを最短経路問題に対して行い、Adleman-Lipton パラダイムによって得られる結果と比較検討した。使用する分子の量の削減率から、解検出に必要ではない経路の生成を削減し、最適解を求めるというこの手法の有効性が示せたと考える。さらに、このアルゴリズムの化学的実験への実装によって予期せぬエラーも軽減することができるのではないかという点にも注目したい。

また、反復回数を減らし、より効率的な解の検出を実現するために構築したアルゴリズムの並列化を試みた。 しかし、並列化は大きな改善にはならなかった。この点に関しては更なる研究調査が必要であると考えている。

### 参考文献

[1] 小野治, 山本浩司, 山本常人, 望月一成: リストプロセッシングによる DNA コンピューティングの計算機シミュレーション, 平成 14 年電気学会全国大会,vol.3, pp.136, 2002

[2] 小野治,山本常人,山本浩司,望月一成:リストプロセッシングシミュレーションによるDNAコンピューティングの化学的規模推定,日本シミュレーション学会大会第 21 回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス計算電気・電子工学シンポジウム発表論文集,pp.203-206,2002

[3] O. Ono, T. Yamamoto, K. Yamamoto, I. Mochiduki: Chemical Scale Prediction and Engineering Application of DNA Computing by Using Simulation of List Based Processing, Abstracts of Late-Breaking Posters of the 8th International Meeting on DNA Based Computers, 2002

[4] O. Ono, K. Yamamoto, T. Yamamoto, I. Mochiduki: Application and Evaluation of DNA Computing Simulation by List Based Processing, *Proc.* 2002 IEEE International Conference on Control Applications, pp.825-829, 2002

# クラスタPCシステムへのDNAコンピューティングアルゴリズムの実装

Integration of DNA Computing Algorithm to a PC Cluster System

### 明治大学 理工学部 電気電子工学科(応用DNAコンピューティング研究所)

### 坪井勇政 小野 治 山本浩司 Zuwairie Ibrahim 桑原聡 松川拓也

#### **Abstract**

本研究では DNA コンピューティングシミュレーションの構築においてダイナミックプログラミング法を適用し、実装環境として PC クラスタを利用した、並列 DNA コンピューティングアルゴリズムについての提案を行う。ダイナミックプログラミング法は NP 完全問題のような計算困難な問題に対し多段決定によって解を導く手法であり、これを DNA コンピューティングアルゴリズムに適用した。更に、扱う問題の規模や計算処理時間を向上させるために PC クラスタを用いた並列化実装を行っている。本提案シミュレーションによって従来より大きな規模の問題を扱えるようになり、 DNA コンピューティングの特性予測を行うことが可能となる。

### **Key words**

DNA コンピューティング、並列シミュレーション、PC クラスタ、ダイナミックプログラミング法、NP 完全、ハミルトン経路問題

### 1.はじめに

本研究は、DNA コンピューティングシミュレーションの構築においてダイナミックプログラミング法(以下 DP と略記)を適用し、実装環境として PC クラスタを利用した、並列 DNA コンピューティングアルゴリズムの提案を行うものである。 DNA コンピューティングは 1994 年にその理論が発表されて以来、計算機科学・分子生物学などを中心として様々な角度から研究アプローチがなされてきた。しかし、現段階においては、実用に向けて未だ数々の課題を抱えている。そこで、実用に向けてより効果的な方法をもたらす手段としてコンピュータシミュレーションは不可欠であると判断し、本研究ではその提案に至っている。特に、扱う問題において、従来よりも大きな規模に対して高速に解を与えられるようにすることを目的とし、PC クラスタを用いた並列環境下での DP 適用 DNA コンピューティングアルゴリズムの有用性の評価を行う。

# 2. DNA コンピューティング

DNA コンピューティングとは生物の遺伝情報を司る DNA 分子の超並列的な結合を演算に応用させたアルゴリズムである。この理論の特徴的な部分は、 DNA 分子が非常に微小であることと、 DNA 塩基の持つ相補性によって超並列的に結合および複製を行える点であり、 NP 完全問題のような膨大な計算量を有するような問題に対して解を与えられる手法である。この DNA コンピューティング理論(「を最初に考案した L.Adleman は 7 ノードのハミルトン経路問題に対して実際に問題を解くことに成功

している。DNA 計算は、問題に対して DNA 分子による符号化を行い、DNA 分子の相補性と超並列性を利用した結合と分離によって演算が行われる仕組みを持つ。

### 3.PC クラスタによるパラレルプロセッシング

PC クラスタとは一般的な汎用計算機をネットワークによって結合させ並列処理を行うための計算システムである。互いに独立したプロセッサ構成(分散メモリ型)であり、データ交換にはメッセージパッシング方式を採る。このメッセージパッシング方式を提供するライブラリが MPI(Message Passing Interface)であり、既存の言語(C,C++,Fortran77/90,Java)によってプログラム作成を行うことができる。シングルプロセッサマシンに比べ、計算速度、メモリ量において優れているため、PC クラスタを利用することで大規模計算を行うことができるようになる。本研究で用いた PC クラスタは 6 ノードの計算システムであり、その概要は以下の通りである。

### PC クラスタ概要

CPU : Pentium 4 2.2 GHz #1,2 2.8 GHz #3-6

Mem : DDR266 SDRAM 1024MB (respectively)

HDD : 40GB #1 80GB #2-6

Hub : 100Base-TX #1,2 1000Base-TX #3-6

OS : SuSE Linux 7.3 karnel 2.4.20

MPI : MPICH 1.1

### 4.提案法

### DP 適用並列 DNA コンピューティングシミュレーション

DNA 計算理論に DP を適用し PC クラスタを用いた並列環境下でハミルトン経路問題を解くためのシミュレーションの構築法について説明する。図 1 に提案法のオペレーションフローと各セグメントにおけるタスクを示す。まず、問題を解くためには DNA 塩基によって問題の符号化を行う必要がある。ここでは、図 2 に示すようにノードの符号化に対してその塩基配列を用いて経路符号化を行い、この経路ブロックの結合と探索によって問題を解く。

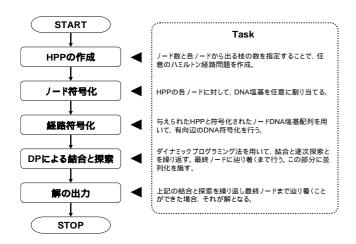


図1 提案法のオペレーションフローと各セグメントにおけるタスク

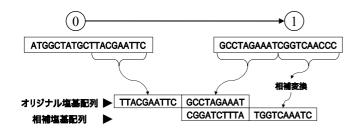


図2 HPP における DNA 塩基による経路ブロックの定義

Adleman パラダイムに基づくと、あらかじめ解の候補を DNA 塩基配列の結合によって大量に生成し、その中から解の抽出を行うが、この方法はだと問題規模が大きくなると、解の候補を十分に生成することができないため解を導けない。そこで、このアルゴリズム自体を見直し、経路ブロックの結合において DP を適用する。DP を適用することで結合と解候補探索を同時に行うため、無駄な結合を低減させることが可能となる。更に、規模および実行速度の向上を図るために、このアルゴリズムを PC クラスタ上で並列実装している。PC クラスタの特性上、データ交換により発生するオーバーヘッドはパフォーマンスにおいて著しい低下をもたらすため、処理の分割は図 3 に示すように、各計算ノードに独立して割り当てている(1 ノードあたりの有向辺の数を 3 と仮定)。この方法によって最終的に最も速く解を発見したプロセスから解の出力を行う。

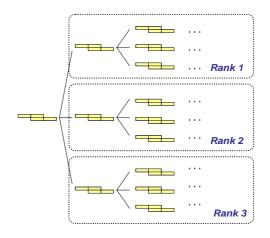


図3 並列実装における各ランクのロードステータス

### 5.シミュレーション結果と考察

提案法に基づいて、DP を適用した場合のシングルプロセッシングおよびパラレルプロセッシングによるノード数と解を導くまでの時間を計測した結果を図 4 に示す。また、並列環境下でDPを適用したモデルと非DPモデルによるノード数と解を導くまでの時間を計測した結果を図 5 に示す。

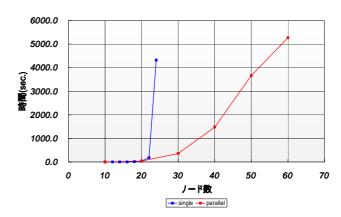


図4 DP 適用時のパラレルとシングルの問題規模と実行時間

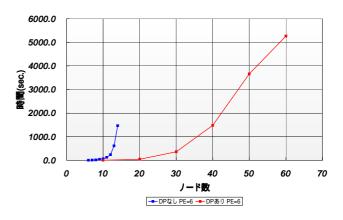


図5 並列環境下での DP 適用と非 DP モデルの問題規模と実行時間

図4から明らかなように、DPを適用したモデルにおいてはシングルプロセッサ環境では24ノードまでの問題しか扱えないが、6プロセスによる並列環境では60ノードの問題を解くことに成功している。問題規模の増加に伴う計算量の悪化は指数関数的であるため、PCクラスタの計算ノードを増やしても線形増加による効果をもたらすことはできないが、規模の上限を押し上げるためにこの方法は有効であると考えられる。

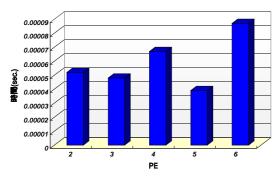


図6 10 ノードにおけるプロセス数と実行時間の関係

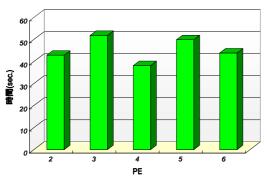


図7 20 ノードにおけるプロセス数と実行時間の関係

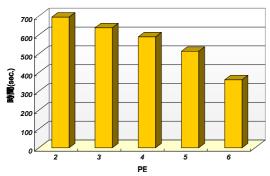


図8 30 ノードにおけるプロセス数と実行時間の関係

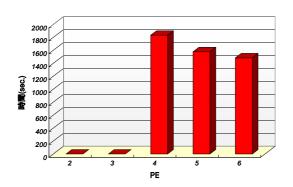


図9 40 /ードにおけるプロセス数と実行時間の関係

DP の有用性を示すために、並列環境下で DP を適用したモデルと非 DP モデルとの扱える問題規模と実行時間を測定した結果を図 5 に示す。 DP を適用しない場合は、並列環境であっても14 ノードまでのハミルトン経路問題に対しての解しか与えられない。これは、時間的に扱えないというよりも、解の候補を物理メモリ上に展開できないため、解候補探索を行っても、解を発見できないからであると考えられる。すなわち、Adlemanパラダイムを計算機シミュレーションによって実現しようとした場合は、比較的小規模な問題において飽和してしまうと言える。よって DP による効果的な結合と探索を並列環境で実現することが理想的であると考えられる。

次に、問題規模と並列処理のプロセス数との関係について調べるために、10 ノードから 40 ノードまでの問題に対してプロセス数別の実行時間を計測し、その結果を図 6~図 9 に示す。これによると、比較的小規模問題(20 ノード以下)に対しては、プロセス数の増加と処理時間の短縮において一般性を発見できない。しかし、30 ノード以上の問題に対しては、プロセス数を増やすことによって実行時間の短縮が認められる。すなわち、計算量がある程度膨大になった場合において、並列処理は有効に機能していると考えられる。また図 9 に示すように、問題規模が大きくなると、少ないプロセス数では解を与えることができない。これにより並列処理と DP の有効性が確認できる。

これらのことから次のことが結論付けられる。規模の大きな NP 完全問題を DNA コンピューティングによって扱う場合、 DP のようなアルゴリズムが必要である。また、これを並列環境で実装することで、規模・速度の向上を図ることができる。 PC クラスタによる並列実装においては、ある程度規模が大きくないとその効果が認められない場合があることがわかる。

### 6.まとめ

DNA コンピューティングにおけるスケールアップが成立しない問題に対して、DP を適用し並列実装することで、この問題に対するひとつの解決策を提案した。より大きなサイズの問題を扱えるようになることで、DNA コンピューティングの特性予測が可能になり、その応用に対して柔軟性が増したと考えられる。

### 参考文献

- [1]L. Adleman: "Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems", *Science*, Vol. 266, pp.1021-1024, 1994
- [2] P.パチェコ 著,秋葉 博 訳「MPI 並列プログラミング」 培風館, 2001
- [3] 小野 治, 山本 浩司, 山本 常人, 望月 一成: 「リストプロセッシングによる DNA コンピューティングの計算機シミュレーション」, 平成 14 年電気学会全国大会, vol.3, pp.136, 2002
- [4] O.Ono, K.Yamamoto, T.Yamamoto, I.Mochiduki: "Application and Evaluation of DNA Computing Simulation by List Based Processing", IEEE International CCA2002, pp.825, 2002

# 3軸加工用CLデータからの法線情報の自動生成と 可変ゲインを用いた磨き力の制御

Generation of Normalized Tool Vector from 3-Axis CL Data and Polishing Force Control with Variable Gain

○永田寅臣<sup>†</sup>, 楠本幸裕<sup>†</sup>, 安田仁徳<sup>†</sup><sup>†</sup>, 塚本 治<sup>†</sup><sup>†</sup>, 津田邦博<sup>†</sup><sup>†</sup>, 尾本正明<sup>†</sup><sup>†</sup><sup>†</sup>, 都 博之<sup>†</sup><sup>†</sup><sup>†</sup>, 芳賀善九<sup>†</sup><sup>†</sup><sup>†</sup>, 長谷哲男<sup>†</sup><sup>†</sup><sup>†</sup>, 渡辺桂吾<sup>§</sup>
<sup>†</sup>福岡県工業技術センター, <sup>†</sup><sup>†</sup>株式会社エーエスエー・システムズ, <sup>†</sup><sup>†</sup><sup>†</sup>株式会社メイホー, <sup>§</sup>佐賀大学

Fusaomi NAGATA<sup>†</sup>, Yukihiro KUSUMOTO<sup>†</sup>, Kiminori YASUDA<sup>††</sup>, Osamu TSUKAMOTO<sup>††</sup>, Kunihiro TSUDA<sup>††</sup>, Masaaki OMOTO<sup>†††</sup>, Hiroyuki MIYAKO<sup>†††</sup>, Zenko HAGA<sup>†††</sup>, Tetsuo HASE<sup>†††</sup>, Keigo WATANABE<sup>§</sup>

†Interior Design Research Institute, Fukuoka Industrial Technology Center, Agemaki 405-3, Ohkawa, Fukuoka, JAPAN
††ASA SYSTEMS INC., 3-3 Nakabarushinmachi, Tobata, Kitakyushu, Fukuoka, JAPAN
†††MEIHO CO. LTD., Ganda 811-1, Nohgata, Fukuoka, JAPAN

§ Graduate School of Science and Engineering, Saga University, Honjomachi-1, Saga, JAPAN

**Abstract**: In this paper, a method is proposed to generate normalized tool vectors from 3-axis cutter location data (CL data). The CL data with normal vectors are referred as not only the desired trajectory of tool's translational motion but also the force direction to be given to a mold. In other words, the CL data allow the polishing robot based on an industrial robot to realize a teaching-less operation of motion and force. The proposed robot also controls the polishing force consisting of the contact and kinetic friction forces, in which the force feedback gain in each direction is changed according to the force error. The effectiveness and promise of the proposed polishing robot have been proved by actual polishing experiments using an aluminum mold with curved surface.

### 1. はじめに

経済産業省の平成14年度即効型地域新生コンソーシアム研究開発事業「自由曲面金型のスーパー磨き自動仕上げシステムの開発」により、多軸制御用カッタロケーションデータ(CLデータ)に基づき、教示レスで動作させることができる金型磨きロボットを開発してきた1.20. 磨きロボットの位置/力制御系における目標値として多軸制御用CLデータを直接参照することで、アーム先端に装着した軸付き砥石の並進軌道および砥石の押付方向の教示工程をそれぞれ省略することが可能である. 加えて、軸付き砥石に作用する磨き力(押付力と摩擦力の合力)を繊細に制御しながら研磨できることを大きな特徴とする. 図1には開発した磨きロボットの外観を示す.

本研究では、まず、汎用の3次元CAD/CAMで作成した3軸加工用のCLデータから法線ベクトルの情報を自動生成し、多軸制御用CLデータを構成する手法について述べる。これにより、多軸制御用CAMを導入していないユーザにおいても磨きロボットの利用が可能になる。つぎに、磨き力の制御性能に大きな影響を及ぼす力フィードバックゲインを誤差に応じて可変とすることで、過大な操作量の発生に伴うオーバシュートを軽減させる方法について検討する。最後にこれらの実験結果について報告する。

### 2. 3軸加工用CLデータからの法線情報の生成

多軸制御機能を持たない3次元CAD/CAMのメインプロセッサが生成するCLデータの各行には、そのモデルが作成された時に設定されたワーク座標系における座標値

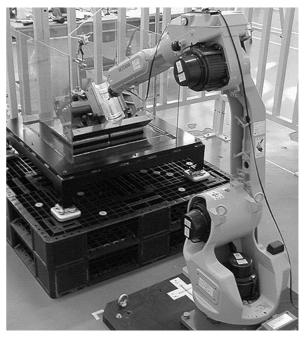
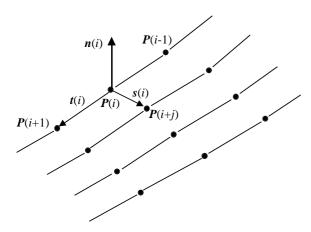


Fig. 1 Mold polishing robot with a flexible tiltable jig

 $P(i) = [xyz]^T$ が記述されている. i は i 番目の行(ステップ)数を表す. 図2には点P(i) における法線ベクトルの算出 イメージを示す. まず,工具進行方向を表すベクトル $t(i) = [t_x t_y t_z]^T$  は次式で与えられる.

$$\boldsymbol{t}(i) = \boldsymbol{P}(i+1) - \boldsymbol{P}(i) \tag{1}$$

つぎに、P(i)以降の100ステップの中からP(i)との最短距



**Fig. 2** Generation of normalized tool vector at P(i)

離に存在する点 P(i+j)  $(1 \le j \le 100)$  を検索し、P(i) と P(i+j) からベクトル  $s(i) = [s_x s_y s_z]^T$  を作成する.

$$\mathbf{s}(i) = \mathbf{P}(i+j) - \mathbf{P}(i) \tag{2}$$

なお、 $\mathbf{s}(i)$  は $\mathbf{t}(i)$  と平行とならないように選定する. 自由 曲 面 上 の 点  $\mathbf{P}(i)$  に お け る 正 規 化 法 線 ベ ク ト ル  $\mathbf{n}(i) = [n_x n_y n_z]^T$  は、 $\mathbf{t}(i)$  と  $\mathbf{s}(i)$  それぞれに垂直なベクト ルとして次式から求めることができる.

$$\begin{cases} n_x t_x + n_y t_y + n_z t_z = 0 \\ n_x s_x + n_y s_y + n_z s_z = 0 \\ (n_x)^2 + (n_y)^2 + (n_z)^2 = 1 \end{cases}$$
 (3)

この処理をCLデータ内の全ステップに対して行うことで、多軸制御用の法線情報が付加されたCLデータ $\tilde{P}(i) = [P^T(i) \ n^T(i)]^T (i=1,2,3,\cdots l)$ を生成させることができる。ただし、l はCLデータ内の全ステップ数である。提案する磨きロボットでは、P(i) とn(i) をそれぞれ、砥石の並進移動および砥石の押付方向の目標値に用いる。

### 3. 可変ゲインによる磨き力の制御

図1に示した金型磨きロボットの本体は、(株)安川電機製のオープンインタフェイスを有する産業用ロボットMOTOMAN UP-6であり、アーム先端には(株)ニッタ製の6自由度力覚センサを介してボールエンド形状の軸付き砥石を装着している。このほか、オイルミスト機能のためにワークの傾斜角度を調節できるフレキシブルジグを備えている。磨き力 $\mathbf{F}(k) = [F_x(k) F_y(k) F_z(k)]^T$ ( $\mathbf{k}$ : 離散時刻)は、次式で与えられるインピーダンスモデル追従型力制御法によりフィードバック制御される $^{1.2}$ .

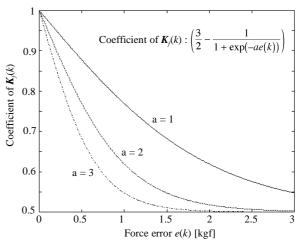
$$\mathbf{v}_{n}(k) = e^{-\mathbf{M}_{d}^{-1}\mathbf{B}_{d} \Delta t} \mathbf{v}_{n}(k-1)$$

$$-\left\{e^{-\mathbf{M}_{d}^{-1}\mathbf{B}_{d} \Delta t} - \mathbf{I}\right\} \mathbf{B}_{d}^{-1} \tilde{\mathbf{K}}_{f} \left\{\mathbf{F}(k) - \mathbf{F}_{d}\right\} \quad (6)$$

磨き力は,砥石の押付力と砥石に作用する運動摩擦力との合力であり,力覚センサから観測されるツール座標系での X, Y, Z各方向の力覚値の合力として求めることができる。 $M_d$ =  $\operatorname{diag}(M_{dx}, M_{dy}, M_{dz})$ と $B_d$ =  $\operatorname{diag}(B_{dx}, B_{dy}, B_{dz})$ はそれぞれ,目標慣性行列および目標粘性行列である。 $F_d = [F_{dx}F_{dy}F_{dz}]^T$ は目標とする磨き力ベクトルであり, $\Delta t$ とIはそれぞれ,サンプリング幅と単位行列である.また, $\tilde{K}_f(k)$ はカフィードバックゲイン行列であり,次式で与えられる.

$$\widetilde{K}_{f}(k) = \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{1 + \exp(-ae(k))}\right) \operatorname{diag}(K_{fx}, K_{fy}, K_{fz}) \quad (7)$$

ただし、 $e(k) = ||F(k)| - |F_a||$ である。式(7)で与えられる対角行列の係数部分は、定数 a を設定することで図3のように勾配を変化させることができる。ロボットアーム先端の砥石工具がジグザグパスに沿って移動しているときなど、進行方向が90度あるいは180度変化する場合に、ロボットの各関節の小さなガタなど機構上の特性により、瞬間的に望ましくない振動が発生し、結果として大きな力誤差が誘発される。式(7)により、比較的大きな力誤差が発生した場合には $K_f(k)$ の効果を緩やかにし、挙動を安定に保つことができるものと期待される。図3には3とおりのa



**Fig. 3** Relation between coefficient of  $K_j(k)$  and force error e(k)

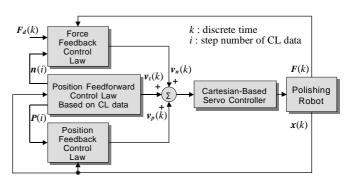


Fig. 4 Block diagram of the mold polishing robot using CL data with normal vectors

に対する係数の変化を示している。実験ではa=2を妥当値として見積もり、使用することとした。

図4には提案する磨きロボットのデカルト座標系における制御系のブロック線図を示す.  $v_n(k)$  と  $v_n(k)$  はそれぞれ,カフィードバック制御則からの法線方向速度および CLデータに基づくフィードフォワード制御則からの接線方向速度を表す.  $v_p(k)$  は位置フィードバック制御則からの速度である. この場合,n(i) を参照することで砥石とワークの接触地点における法線方向から  $v_n(k)$  を発生させることができる. また, $F_d(k)$  は磨き力の目標値であり,x(k) は順キネマティクスで得られる工具先端のデカルト座標である.

従来、デカルト座標系における位置と力のハイブリッ ド・コントローラを持つ制御系は、例えばツール座標系な どの拘束フレームに沿って3自由度すべてに関する位置の 軌道と3自由度すべてに関する力の軌道が設定できるコン トローラとして構成されていた<sup>3)</sup>. この場合, これら6つの 拘束を同時に満たすような制御はできないが、作業内容に 応じてスイッチ行列を設定することで3自由度の各方向に おいて位置と力のどちらかのモードが選択されていた. し かし、本システムでは自由曲面を有するワークに対して指 定された磨き力を発生させながらCLデータに沿った研磨 作業を行う必要があるため、作業全域を見る場合にはこれ ら6つを拘束しながら制御しなければならない. このた め、ベース座標系においてあえて力制御系と位置制御系を 緩やかに干渉させている. これにより、磨き力を目標値に 追従させる機能と、CLデータで与えられる0.2 mm 程度 のピックフィード機能を共に実行させながら磨きロボット を制御できるようになった. ただし、力制御系と位置制御 系の各3方向のゲインは、力制御系が工具の経路を乱さな いような、また位置制御系が磨き力の安定性に大きく影響 しないような程度で実用上問題とならないように注意深く 選定されなければならない. 次節で述べる実験では、位置 制御系におけるピックフィード方向の閉ループゲインを小 さく設定することで力制御系に緩やかに干渉させている.

### 4. 磨き実験

提案する金型磨きロボットの特徴を整理すると次のようになる $^{1,2}$ .

- 1) 従来,回転トルクにより研削力を発生させていた軸付き 砥石を回転させず,回転をロックして磨く.ただし, ボールエンド形状の砥石の外周を均一に消費しながら磨 くために,ロボットの手先の第6軸を用いて低速回転 (-60~60 deg/s)を併用する.
- 2) ボールエンド形状の軸付き砥石の姿勢をベース座標系の Z軸に固定する. すなわち, 砥石の姿勢を変化させず磨 きを行う. また, 回転による研削力ではなく, 砥石の押 付力と接線方向の速度により発生される運動摩擦力によ

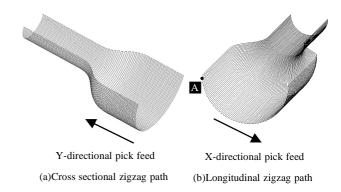


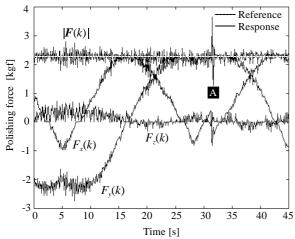
Fig. 5 Zigzag tool paths without normal vector generated from a 3D CAD/CAM

り磨く.

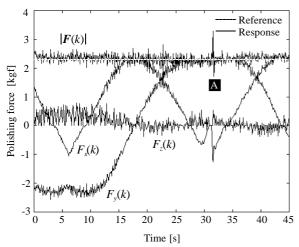
- 3) 砥石の押付力と摩擦力との合力を磨き力として定義し、 この磨き力が目標の値となるようにフィードバック制御 を行いながら磨く.
- 4) 磨き力の制御機能により、1 mm 程度のワーク固定位置 の不確かさを吸収しながら磨くことができるため、位置 決め精度を保証するための特殊な治具などを必要としない.

本章では、提案手法の有効性を検証するために行った自由曲面を有するペットボトル金型の磨き実験について述べる。実験で使用したアルミ製のワークはマシニングセンタで機械加工されているため、表面には工具経路に沿って0.3 mm程度の高さを持つカスプマークが発生している。機械加工後の磨き工程では、面だれや大きな傷を発生させることなくカスプマークを均一に除去した後、使用する砥石の粒度を次第に細かくしながら磨くことで表面粗さを小さくすることが目的とされる。図5には市販の3次元CAD/CAM(Unigraphics)で作成した3軸加工用のCLデータを示す。それぞれ、断面方向(Y方向)と縦方向(X方向)のジグザグパスであり、ピックフィードは0.2 mmである。熟練者による手磨き時と同様、磨き効率を高めるために、このようにお互いが直交した工具経路を交互に使用する。

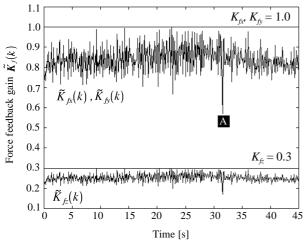
さて、実験では最初に、開発した法線ベクトル生成プログラムを用いてこれら二つのパスを多軸制御加工用CLデータに変換した。その後、生成されたCLデータを図1の磨きロボットに入力して磨き実験を行った。その結果、目標軌道への追従性および磨き力の安定性ともに優れた性能を確認することができた。図6と図7にはそれぞれ、カフィードバックゲイン行列に $K_f(k)$ および $\tilde{K}_f(k)$  を用いた場合の磨き力F(k)の変化の一例を示している。このとき使用された目標軌道は図5(b)に示した縦方向のジグザグパスであり、A点ではピックフィード方向と直交する方向に砥石の進行方向が変化しているため、オーバシュートが発生しやすい傾向にあった。A点では砥石の側面をエッジ方向に押し付けているため、カセンサからのZ方向の力覚値は小さくなっている。なお、図6および図7内のX方向とY方向の



**Fig. 6** Force sensor measurements with constant  $K_f$ 



**Fig. 7** Force sensor measurements with variable  $\tilde{K}_{i}(k)$ 



**Fig. 8** Force feedback gain  $\tilde{K}_f(k)$ 

力覚値の変化に周期性があるのは、力覚センサを固定しているロボットの第6関節を低速回転させているためである。この場合  $\tilde{K}_f(k)$  は式(7)に基づき図8のように調整されている。また、図9には本実験で式(6)を用いて得られた磨き力の誤差と法線方向速度との関係を示す。これらの結果から、提案手法はジグザグパスに起因する工具進行方向の非線形な変化に伴うオーバシュートを減少させるために有

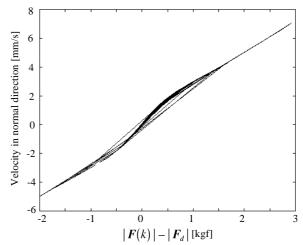


Fig. 9 Relation between the force error and normal velocity

効であることが確認された.

### 5. おわりに

本稿では汎用の3次元CAD/CAMが算出する3軸加工用CLデータ(点群データ)をもとに、法線ベクトルの情報が付加された多軸制御用CLデータを自動生成させる手法を提案した。生成されたCLデータを磨きロボットに適用することで、砥石の並進軌道および砥石の押付方向の教示工程をそれぞれ省略することが可能となった。また、カフィードバックゲインを誤差に応じて可変とすることで、過大な操作量の発生に伴うオーバシュートを軽減させることができた。

### 参考文献

- F. Nagata, Keigo Watanabe, Y. Kusumoto, et al.: New Finishing System for Metallic Molds Using a Hybrid Motion/Force Control, Procs. of 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2003), pp. 2171-2175, (2003)
- 2) 永田,楠本,渡辺ら:ボールエンド砥石のためのハイブ リッド・モーション/力制御法の開発とペットボトル 金型の磨きロボットへの適用実験,精密工学会誌, Vol. 70, No. 1, pp. 59-64, (2004)
- John J, Craig, Introduction to ROBOTICS -Mechanics and Control Second Edition-, Addison Wesley Publishing Co., (1989)

### [連絡先]

〒831-0031 福岡県大川市上巻405-3 福岡県工業技術センター インテリア研究所 技術開発課 システム研究室 永田寅臣 TEL: (0944) 86-3259 FAX: (0944) 86-4744 E-mail; nagata@fitc.pref.fukuoka.jp URL http://fmv5.fitc.pref.fukuoka.jp/

# ディスクリプタ表現の冗長性を利用したファジィ制御器の設計

Fuzzy Control System Design using Redundancy of Descriptor Representation

根布谷 岳志田中 一男大竹 博Takashi NebuyaKazuo TanakaHiroshi Ohtake電気通信大学電気通信大学電気通信大学The University ofThe University ofThe University of

Electro-Communications Electro-Communications

Abstract This paper presents fuzzy control system design using redundancy of descriptor representation. We define a descriptor Takagi-Sugeno fuzzy controller that contains a wider class of fuzzy controllers, e.g., state feedback fuzzy controller, dynamic state feedback fuzzy controller, etc., as special cases. Hence some kinds of fuzzy control system designs can be discussed only by the controller representation. A stabilizing fuzzy controller is designed by numerically solving LMI stabilization conditions derived in this paper. Simulation results show the effectiveness of fuzzy control system design using redundancy of descriptor representation.

# 1 はじめに

ファジィモデルに基づく制御[1,2]は厳密な線形化手法な どの他の非線形制御手法 [3] に比べると「自然に・簡単に・ 効果的に」非線形制御を実現できることが特徴である。ファ ジィモデルに基づく制御では、非線形システムを高木・菅野 ファジィモデルで自然に表現し、並列分散的補償を用いて制 御器を簡単に構成し、LMIの形で表現された制御器設計条 件を解くことにより効果的にフィードバックゲインを求める ことができる。実際、高木・菅野ファジィモデルは任意のス ムースな非線形システムを任意の精度で近似 [4] できること が知られており、多くの非線形の実システムがファジィモデ ルに置き換えて制御[5]されている。しかし、入力変数に非 線形性を有するシステムに対しては、本手法の適用が難し い。文献[6]では、このシステムに対して、動的状態フィー ドバックの有効性を論じた。本論文では、ディスクリプタ表 現の冗長性を利用した新しいファジィ制御器の設計法を提案 する。この設計手法は従来のファジィモデルに基づく制御の 設計法や入力変数に非線形性を有するファジィシステムに対 する動的状態フィードバック [6] を特殊の場合として含んだ より一般的な設計手法である。最後に、設計例を通して本設 計手法の有効性を示す。

# 2 ファジィモデルの構築と安定化可 能条件

本章では、ファジィモデルの構築と安定化可能条件のこれまでの成果を要約する。[1, 2]

次のような非線形システムを考える。

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t)) \tag{1}$$

ここで、 $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \cdots x_n(t)]^T$  は状態変数、 $u(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \cdots u_m(t)]^T$  は入力変数である。Sector nonlinearity の考え方 [2] を適用することで、(1) 式のシステムを (2) 式の高木・菅野ファジィモデルで厳密に (global あるいは semi-global に) 記述することができる。

### モデル規則 *i*:

If  $z_1(t)$  is  $M_{i1}$  and  $\cdots$  and  $z_p(t)$  is  $M_{ip}$ 

then 
$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}_i \boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}_i \boldsymbol{u}(t)$$
  $i = 1, 2, \dots, r$  (2)

ここで、 $z_j(t)$   $(j=1,2,\cdots,p)$  は前件部変数であり、本論文では状態変数や外部変数だけでなく、入力変数にも依存する変数であるとする。 $M_{ij}$  は i 番目のモデル規則で j 個目のファジィ集合であり、r はモデル規則の数を示している。このモデルの非ファジィ化表現は次のようになる。

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{r} w_i(\boldsymbol{z}(t)) \{ \boldsymbol{A}_i \boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}_i \boldsymbol{u}(t) \}}{\sum_{i=1}^{r} w_i(\boldsymbol{z}(t))}$$
$$= \sum_{i=1}^{r} h_i(\boldsymbol{z}(t)) \{ \boldsymbol{A}_i \boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}_i \boldsymbol{u}(t) \}$$
(3)

ここで、 $oldsymbol{z}(t) = [z_1(t) \cdots z_p(t)]$  であり、

$$w_i(oldsymbol{z}(t)) = \prod_{i=1}^p M_{ij}(z_j(t))$$

である。ただし、メンバーシップ関数の特性上、次のような 条件を満たす。

$$\sum_{i=1}^r w_i(oldsymbol{z}(t)) > 0, \quad w_i(oldsymbol{z}(t)) \geq 0 \quad i = 1, 2, \cdots, r$$

また、

$$h_i(oldsymbol{z}(t)) = rac{w_i(oldsymbol{z}(t))}{\displaystyle\sum_{i=1}^r w_i(oldsymbol{z}(t))} \geq 0,$$

$$\sum_{i=1}^r h_i(\boldsymbol{z}(t)) = 1$$

である

並列分散的補償では、(2)式のファジィモデルに対して次のような制御器を設計する。

制御規則 i:

If 
$$z_1(t)$$
 is  $M_{i1}$  and  $\cdots$  and  $z_p(t)$  is  $M_{ip}$ 

then 
$$\boldsymbol{u}(t) = -\boldsymbol{F}_i \boldsymbol{x}(t) \quad i = 1, 2, \dots, r$$
 (4)

この非ファジィ化表現は(5)式のようになる。

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

(3) 式と (5) 式からなる制御系の安定条件 [1, 2] は次のように得られている。

$$X > 0 \tag{6}$$

$$-XA_{i}^{T} - A_{i}X + M_{i}^{T}B_{i}^{T} + B_{i}M_{i} > 0$$

$$-XA_{i}^{T} - A_{i}X - XA_{j}^{T} - A_{j}X$$

$$+M_{j}^{T}B_{i}^{T} + B_{i}M_{j}$$

$$+M_{i}^{T}B_{i}^{T} + B_{j}M_{i} > 0 \quad i < j$$
(8)

ここで

$$M_i = F_i X$$

である。(6) ~ (8) 式の LMI 条件を解くことによって (3) 式を安定化可能なフィードバックゲインを求めることができる。しかし、(5) 式のファジィ制御器を用いる場合、前件部変数z(t) が u(t) に依存していると、計算すべき操作量が (5) 式の右辺の u(t) にも含まれるため、操作量(入力変数)の決定が困難となる。この計算が困難な場合には、たとえ (6) ~ (8) 式の LMI 条件を解くことによって安定なフィードバックゲインを求めることができても、この制御器を適用できない。文献 [6] と本論文で提案する設計法は z(t) が u(t) に依存していても適用可能である。

### 3 設計条件の導出

ディスクリプタ表現とは状態空間表現の自然な拡張である。そのディスクリプタ表現とは、ある変数の微係数にかかる行列 E が非正則であることを許容することができるのが特徴である。この行列を利用することで状態空間表現では扱えないシステムをディスクリプタ表現の冗長性を利用することで扱うことができる。(3) 式のファジィシステムに対してディスクリプタ表現の冗長性を利用したファジィ制御器の表現を(9) 式のように考える。

$$\boldsymbol{E} \dot{\boldsymbol{u}}(t) = \sum_{i=1}^{r} h_i(\boldsymbol{z}(t)) \{ \boldsymbol{K}_i \boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{F}_i \boldsymbol{x}(t) \}$$
(9)

E=I のとき、ファジィ動的状態フィードバック制御器 [6] となり、入力変数に非線形性を有するシステム (z(t)) が u(t) に依存するシステム) を安定化することができる。また、E=0、 $K_i=I$  のとき、(5) 式の状態フィードバック制御器に帰着

する。このように、(9) 式は様々なタイプの制御器を含んだより一般的な表現となっている。

(3) 式と(9) 式から、以下のディスクリプタ表現を得る。

$$\boldsymbol{E}^* \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\boldsymbol{z}(t)) \boldsymbol{A}_i^* \hat{\boldsymbol{x}}(t)$$
 (10)

ここで、

$$m{E}^* = \left[ egin{array}{ccc} m{I} & m{0} & m{0} & \ m{0} & m{0} & m{0} & \ m{0} & m{0} & m{E} \end{array} 
ight],$$

$$oldsymbol{A}_i^* = \left[ egin{array}{ccc} 0 & oldsymbol{A}_i & oldsymbol{B}_i \ oldsymbol{I} & -oldsymbol{I} & 0 \ oldsymbol{F}_i & 0 & oldsymbol{K}_i \end{array} 
ight],$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}(t) = [\boldsymbol{x}(t) \ \boldsymbol{x}(t) \ \boldsymbol{u}(t)]^T$$

である。

Theorem 1に本論文で導出した(10)式の安定条件を示す。

**Theorem 1** (11) 式、(12) 式を満たす  $X^*$  が存在するとき、(10) 式のシステムは安定である。

$$\boldsymbol{X}^{*T}\boldsymbol{E}^{*} = \boldsymbol{E}^{*T}\boldsymbol{X}^{*} \geq 0 \tag{11}$$

$$\mathbf{A}_{i}^{*T}\mathbf{X}^{*} + \mathbf{X}^{*T}\mathbf{A}_{i}^{*} < \mathbf{0} \quad i = 1, 2, \cdots, r$$
 (12)

ここで

$$\boldsymbol{X}^* = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X} & 0 & 0 \\ \boldsymbol{X}_{21} & \boldsymbol{X}_{22} & \boldsymbol{X}_{23} \\ 0 & 0 & \boldsymbol{X}_{22} \end{bmatrix}$$
 (13)

である。

(証明)

リアプノフ関数の候補を以下のように考える。

$$V(\hat{\boldsymbol{x}}(t)) = \hat{\boldsymbol{x}}^T(t) \boldsymbol{E}^{*T} \boldsymbol{X}^* \hat{\boldsymbol{x}}(t)$$
(14)

(3) 式の解軌道に沿った (14) 式の時間微分は次のようになる。

$$\begin{split} \dot{V}(\hat{\boldsymbol{x}}(t)) &= \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}^T(t) \boldsymbol{E}^{*T} \boldsymbol{X}^* \hat{\boldsymbol{x}}(t) + \hat{\boldsymbol{x}}^T(t) \boldsymbol{E}^{*T} \boldsymbol{X}^* \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t) \\ &= \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}^T(t) \boldsymbol{E}^{*T} \boldsymbol{X}^* \hat{\boldsymbol{x}}(t) + \hat{\boldsymbol{x}}^T(t) \boldsymbol{X}^{*T} \boldsymbol{E}^* \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}(t) \\ &= \sum_{i=1}^r h_i(\boldsymbol{z}(t)) \{ \hat{\boldsymbol{x}}^T(t) \boldsymbol{A}_i^{*T} \boldsymbol{X}^* \hat{\boldsymbol{x}}(t) + \hat{\boldsymbol{x}}^T(t) \boldsymbol{X}^{*T} \boldsymbol{A}_i^* \hat{\boldsymbol{x}}(t) \} \\ &= \sum_{i=1}^r h_i(\boldsymbol{z}(t)) \hat{\boldsymbol{x}}^T(t) \{ \boldsymbol{A}_i^{*T} \boldsymbol{X}^* + \boldsymbol{X}^{*T} \boldsymbol{A}_i^* \} \hat{\boldsymbol{x}}(t) < 0 \end{split}$$

よって、

$$\mathbf{A}_{i}^{*T}\mathbf{X}^{*} + \mathbf{X}^{*T}\mathbf{A}_{i}^{*} < \mathbf{0} \quad i = 1, 2, \cdots, r$$
 (15)

であればすべての時刻 t において  $\dot{V}(\hat{m{x}}(t)) < 0$   $(\hat{m{x}}(t) 
eq m{0})$  となる。

(証明終)

Remark 1 ファジィ制御器 (5) 式を設計するための (6) ~ (8) 式の LMI 条件数は  $(r^2+r)/2+1$  個であるが、(9) 式を設計するための (11) 式、(12) 式の LMI 条件数は r+1 個と非常に少なくすることができる。この差は r が大きくなるほど顕著になることから、多変数システムへの適用を考えると本設計法の有効性は明らかである。

Corollary 1  $K_i = I$ 、E = 0 のとき (12) 式の条件は

$$\begin{bmatrix} & \boldsymbol{X}_{21} + \boldsymbol{X}_{21}^T \\ \boldsymbol{A}_i^T \boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}_{21} + \boldsymbol{X}_{22}^T \\ \boldsymbol{B}_i^T \boldsymbol{X} + \boldsymbol{M}_i + \boldsymbol{X}_{23}^T \end{bmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} * & * & * \\ -\boldsymbol{X}_{22} - \boldsymbol{X}_{22}^T & * & * \\ -\boldsymbol{X}_{23}^T & \boldsymbol{X}_{33} + \boldsymbol{X}_{33}^T \end{vmatrix} < 0 \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (16)$$

となり、(11) 式の条件は

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{X}^T > 0 \tag{17}$$

となる。ここで  $m{M}_i = m{X}_{33}^T m{F}_i$  である。\* は対称に位置する行列の転置行列を表している。

Corollary 2  $K_i \neq I$ 、 $E \neq 0$  のとき、(12)式の条件は

$$\left[egin{array}{c} m{X}_{21} + m{X}_{21}^T \ m{A}_i^Tm{X} - m{X}_{21} + m{X}_{22}^T \ m{B}_i^Tm{X} + m{M}_i + m{X}_{23}^T \end{array}
ight.$$

$$\begin{vmatrix}
* & * & * \\
-\mathbf{X}_{22} - \mathbf{X}_{22}^T & * & \\
-\mathbf{X}_{23}^T & \mathbf{N}_i + \mathbf{N}_i^T
\end{vmatrix} < 0 \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (18)$$

となり、(11) 式の条件は

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{X}^T > 0$$

$$\boldsymbol{X}_{32}^T \boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}^T \boldsymbol{X}_{33} > 0 \tag{19}$$

となる。ここで  $M_i = X_{33}^T F_i, \ N_i = X_{33}^T K_i$  である。

### 4 設計例

(20) 式のような入力変数に非線形性を有するシステム [8] の安定化を考える。

$$\dot{x} = -\sin x + x^2 u^3 \tag{20}$$

(20) 式は  $x(t) \in [-a, a], \ u(t) \in [-b, b]$  という条件の下で次のようなファジィモデルに変換することができる。

モデル規則 1:

If 
$$z_1(t)$$
 is  $M_{11}$  and  $z_2(t)$  is  $M_{12}$ 

then 
$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}_1 x(t) + \mathbf{B}_1 u(t)$$

モデル規則 2:

If 
$$z_1(t)$$
 is  $M_{11}$  and  $z_2(t)$  is  $M_{22}$ 

then 
$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}_2 x(t) + \mathbf{B}_2 u(t)$$

モデル規則 3:

If 
$$z_1(t)$$
 is  $M_{21}$  and  $z_2(t)$  is  $M_{12}$ 

then 
$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}_3 x(t) + \mathbf{B}_3 u(t)$$

モデル規則 4:

If 
$$z_1(t)$$
 is  $M_{21}$  and  $z_2(t)$  is  $M_{22}$ 

then 
$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}_4 x(t) + \mathbf{B}_4 u(t)$$

ここで、

$$A_1 = -1, A_2 = -1, A_3 = \epsilon, A_2 = \epsilon$$

$$\mathbf{B}_1 = 0$$
,  $\mathbf{B}_2 = a^2 b^2$ ,  $\mathbf{B}_3 = 0$ ,  $\mathbf{B}_4 = a^2 b^2$ 

$$z_1(t) = -\frac{\sin(x(t))}{x(t)}, \ z_2(t) = x(t)^2 u(t)^2$$

である。 $\epsilon>0$  は微小な値である。本設計例では  $\epsilon=0.0001$  とする。メンバーシップ関数は次のように得られる。

$$M_{11}(z_1(t)) = \frac{z_1(t) + \epsilon}{-1 + \epsilon},$$

$$M_{21}(z_1(t)) = \frac{-z_1(t) - 1}{-1 + \epsilon}$$

$$M_{12}(z_2(t)) = \frac{z_2(t)}{a^2b^2},$$

$$M_{22}(z_2(t)) = \frac{a^2b^2 - z_2(t)}{a^2b^2}$$

非ファジィ化表現は次のようになる。

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{4} h_i(\boldsymbol{z}(t)) \{ \boldsymbol{A}_i x(t) + \boldsymbol{B}_i u(t) \}$$
 (21)

ここで、 $z(t) = [z_1(t), z_2(t)]$ 、

$$h_1(\mathbf{z}(t)) = M_{11}(z_1(t)) \times M_{12}(z_2(t)),$$

$$h_2(z(t)) = M_{11}(z_1(t)) \times M_{22}(z_2(t)),$$

$$h_3(\mathbf{z}(t)) = M_{21}(z_1(t)) \times M_{12}(z_2(t)),$$

$$h_4(z(t)) = M_{21}(z_1(t)) \times M_{22}(z_2(t))$$

である。(20) 式のシステムは入力変数に非線形性を有していることから(9) 式の制御器において E=1 とする。

 $a=\pi$ 、b=10、として Corollary 2 の LMI 条件を解くと、次のようなフィードバックゲインと  $X^*$  を得る。

$$F_1 = -1.9662 \times 10^{-22}, K_1 = -0.5140$$

$$\mathbf{F}_2 = -1.6900 \times 10^{-11}, \ \mathbf{K}_2 = -0.5140$$

$$F_3 = 1.0246 \times 10^{-24}, K_3 = -0.5140$$

$$F_4 = -1.6919 \times 10^{-11}, K_4 = -0.5140$$

$$\boldsymbol{X}^* = \left[ \begin{array}{ccc} 0.0000 & 0 & 0 \\ -0.1398 & 0.1398 & 0.0000 \\ 0 & 0 & 1.8007 \end{array} \right] \times 10^8$$

 $x(0) = \frac{\pi}{2}$ 、u(0) = 0 の初期値に対するシミュレーション結果を図 1 に示す。本手法によって設計された制御器はオリジナルシステム (20) 式の安定化を保証している。

 $z_2(t)$  が u(t) の関数であることから従来の (5) 式の制御器を適用することができない。そこで、従来の (5) 式の制御器

を適用するために (20) 式の入力変数を  $u(t)^3 \simeq u(t)$  のように近似し、ファジィモデルに変換すると次のようなファジィモデルを得る。

### モデル規則 1:

If 
$$z_1(t)$$
 is  $M_{11}$  and  $z_2(t)$  is  $M_{12}$ 

then 
$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}_1 x(t) + \mathbf{B}_1 u(t)$$

### モデル規則 2:

If 
$$z_1(t)$$
 is  $M_{11}$  and  $z_2(t)$  is  $M_{22}$ 

then 
$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}_2 x(t) + \mathbf{B}_2 u(t)$$

### モデル規則 3:

If 
$$z_1(t)$$
 is  $M_{21}$  and  $z_2(t)$  is  $M_{12}$ 

then 
$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}_3 x(t) + \mathbf{B}_3 u(t)$$

### モデル規則 4:

If 
$$z_1(t)$$
 is  $M_{21}$  and  $z_2(t)$  is  $M_{22}$ 

then 
$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}_4 x(t) + \mathbf{B}_4 u(t)$$

#### ここで、

$$A_1 = -1, A_2 = -1, A_3 = \epsilon, A_2 = \epsilon$$

$$B_1 = 0$$
,  $B_2 = a^2$ ,  $B_3 = 0$ ,  $B_4 = a^2$ 

$$z_1(t) = -\frac{\sin(x(t))}{x(t)}, \ z_2(t) = x(t)^2$$

である。このモデルに対しては(6)式から(8)式のLMI条件はinfeasibleであった。したがって、従来の安定条件は保守的であることが推測される。一方、今回導出した安定条件はfeasibleであり、(理論的に証明することは困難であるが)保守性が軽減されていると思われる。

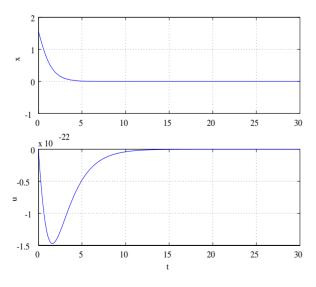


図 1: シミュレーション結果

# 5 まとめ

本論文では、ディスクリプタ表現の冗長性を利用した入力 変数に非線形性を有するシステムに対する設計法を提案し、 リアプノフ関数を用いた制御器設計のための LMI 条件を導 出した。最後に、設計例を通して本設計手法の有効性を明ら かにした。

# 参考文献

- [1] 田中一男:アドバンストファジィ制御,共立出版 (1994)
- [2] K. Tanaka and H. O. Wang: Fuzzy Control Systems Design and Analysis, JOHN WILEY & SONS, INC (2001)
- [3] R. Sepulcher, M. Jankovic and P. Kokotovic: Constructive Nonlinear Control, Springer (1997)
- [4] H. O. Wang, J. Li, D. Niemann and K. Tanaka, T-S fuzzy Model with Linear Rule Consequence and PDC Controller: A Universal Framework for Nonlinear Control Systems, 9th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, San Antonio, May, pp.549-554 (2000)
- [5] K. Tanaka, T. Hori and H. O. Wang: A Multiple Lyapunov Function Approach to Stabilization of Fuzzy Control Systems, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 582-589(2003)
- [6] 田中一男、根布谷岳志: 入力変数に非線形性を有するシステムのファジィ制御, 第 13 回インテリジェント・システム・シンポジウム, pp. 60-63(2003)
- [7] K. Tanaka, T. Hori and H. O. Wang: Dynamic Output Feedback Designs For Nonlinear Systems, 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 3, pp. 56-61(1999)
- [8] Steven F. Glover: Modeling and Stability Analysis of Power Electronics Based Systems(2003) http://nerc.aticorp.org/papers/modeling.pdf
- [9] Hassan K. Khalil: Nonlinear Systems third edition, Prentice Hall(2002)

### 連絡先:

根布谷 岳志

電気通信大学 知能機械工学科

〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

Phone: 0424-43-5430 Fax: 0424-84-3327

E-mail: nebuya@rc.mce.uec.ac.jp

# MITRAM を用いた調布駅周辺の交通シミュレーションと信号制御評価

The traffic simulation and signal control evaluation around the Chofu station using MITRAM  $\,$ 

石川 亮<sup>1)</sup> 矢ノ崎 知佳<sup>1)</sup> 本多 中二<sup>1)</sup> 風間 洋<sup>2)</sup> 猪飼 國夫<sup>3)</sup> Ryo Ishikawa Chika Yanosaki Nakaji Honda Hiroshi Kazama Kunio Yikai

1) 電気通信大学 Univ. of Electro communications 2) **(株)**京三製作所 Kyosan Electric Mfg Co. ltd. 3) (株)エム・アイ・ベンチャー MI Venture's Corp.

Abstract: Especially for traffic congestion dissolutions, such as a city part, reexamination of a signal control is effective. However, it is almost impossible from a cost side, a safe side, to perform these measures in trial. In such a case, a road traffic simulator demonstrates the validity. We are doing research and development in the road traffic simulator MITRAM that models the action of each vehicle using fuzzy inferences from a driver's viewpoint, and are reproduced. This research performs a simulation for actual road traffic using MITRAM. And the results of a simulation are verified as compared with the observation value of some real traffic. Moreover, effects, such as formulation of signal control, are also considered through a simulation.

# 1 はじめに

現代社会において増加した自動車交通量により引き起こされる慢性的な交通渋滞や環境問題,交通事故などが大きな社会問題となっている.これらを解決するためには,交通状況に応じた適切な道路設計が必要である.特に市街地においては信号交差点から交通渋滞が発生することが多く,信号制御の見直しによって多くの渋滞を解決できる可能性がある.しかし,実交通において実験的に信号制御を変更することは,危険や混乱を招くために事実上不可能である.

これらの問題を解決するために,微視的アプローチによる道路交通シミュレータ MITRAM (MIcroscopic model for analuzing TRAffic jaMs in the city area)の研究開発を行っている [1][2][3][4].本研究では MITRAM を用い,東京都調布市街地の交通状況を再現したシミュレーションを行う.そして,各信号交差点を地点制御および系統制御した場合の交通流を評価して制御方法,制御パラメータの最適化をおこなう.これらを通じて道路交通シミュレータ MITRAM が実用的な交通解析に応用可能であることを示す.

# 2 MITRAMの概要

道路交通シミュレータ MITRAM は車両単位で交通 流を再現する微視的アプローチを採用しており,市街 地交通等のシミュレーションに適している.MITRAMでは設定した道路上においてFMV(Fuzzy Model Vehicle)と呼ぶ仮想車両を多数走行させることで交通状況を再現する.各FMVは運転者の視点から得られる情報を元に自律的に運転判断を行う.MITRAMのシステム概要を図1に示す.MITRAMは道路や自動車などの情報を含むデータベース部とシミュレーションを行う演算処理部,シミュレーションの結果を出力する表示統計部から構成される.

MITRAM ではシミュレータ上を走行する仮想車両 (FMV)が周囲の状況を認識して自律的に判断を下す ことで車両挙動を決定する.この判断は現実の運転者 判断を模擬したものであり、そのモデリングには4つ の規範を設けた. それは追従制限,側方制限,対向制 限,前方制限である.各車両は図2に示すように各規 範をモデル化した論理を持っており、これらを並列に 駆動する. 最終的には各制限論理の中から支配的にな るべきもの(最も安全側の判断を下したもの)を選択 して出力する論理を上位に構えている.また各制限論 理の内部は同図下側に示すように2入力1出力の関数 機能を持つ演算子を他段に接続した構造となっている. この演算子には四則演算や論理演算のほか,ファジィ 推論や任意のグラフ関数を定義することが出来る.こ のように MITRAM の運転動作モデルは,詳細に至る まで分解可能な構造であり,モデル全体の見通しを良 くしている.このことはモデルの調整や拡張のしやす

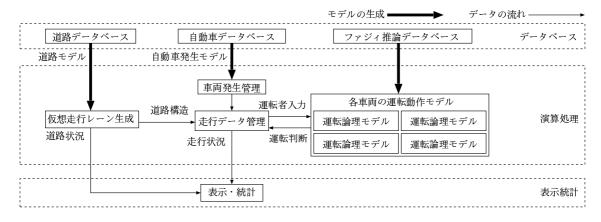


図 1: MITRAM のシステム概要

さという面で優位性がある.

ファジィ推論の例として図 3 に追従運転モデルの一部を示す.この図で入力 A は前車間距離,入力 B は自車速度である.例えば,車間距離が 24 (m) で自車速度が 12 (m/s) であれば,車間距離は「遠」で自車速度は「適」であるから,この組み合わせのルールとして出力は「微加」となり,出力値である加減速度は 4 ( $m/s^2$ ) が出力される.

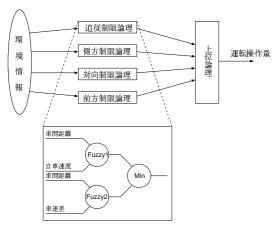
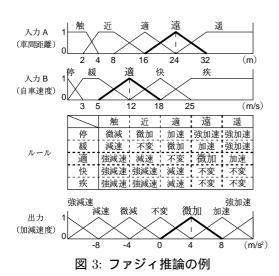


図 2: 運転動作モデル概要



このようなモデルをシミュレーション上を走行する

全ての車両が持つことで,各車両は実交通の運転者と 同様に自律的に判断して走行する.

# 3 シミュレーションモデルの検証

### 3.1 解析対象路線

本研究で解析対象とする路線を図4に示す.この路線は京王線調布駅付近を中心とした旧甲州街道の約1(km)の区間である.交差点付近を除いて全ての区間で対向2車線(片側1車線)の道路である.この区間には信号交差点が5ヶ所含まれている.この路線の北側(図の上側)には比較的交通量の多い甲州街道が通っているが,本研究ではそれは含めないものとした.図中には後に参照する旅行時間の計測地点A,Bも重ねて示している.

# 3.2 交通量,分岐率の設定

シミュレーションにおける車両発生量,分岐率を設定するために,対象路線における実交通測定を行った.測定は路上駐車車両などの影響が比較的少ない時間を選び,平日14時00分~15時20分に行った.各交差点毎に全ての流入路の計測を10分間行い,その結果を集計した.

計測結果の例として下石原 1 交差点での集計値を表 1 (交通量),表 2 (分岐率)に示す.他の交差点についても同様に集計値を得ており,そのデータを元にシミュレーションの車両発生量と各交差点での分岐率を設定する.

### 3.3 旅行時間による検証

本シミュレーションモデルの精度を検証するために,対象路線における旅行時間の計測値を実交通とシミュレーションとで比較する.まず,実交通において図4

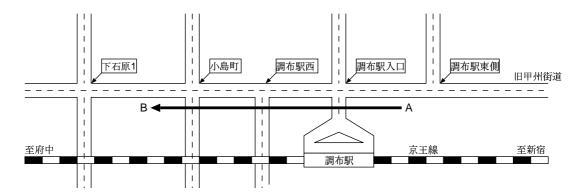


図 4: 解析対象路線

表 1: 交通量の測定結果(下石原1交差点)

流入方向	流入台数(台/時間)					
	普通車 大型車 タクシー バス					
東	240	54	0	18		
西	168	18	6	12		
南	456	174	0	0		
北	432	120	0	12		

表 2: 分岐率の測定結果(下石原1交差点)

流入方向	分岐率(%)			
	左折	右折		
東	20	65	15	
西	6	79	15	
南	4	94	2	
北	8	92	0	

に示す A-B 間の約 550 (m) の区間で,約 30 分間の測定を行い平均旅行時間を求めた.同様にシミュレーションにおいても同区間を対象にして平均旅行時間を算出した.

表3に旅行時間の実測結果とシミュレーションでの計測結果の比較を示す.この結果によると一割程度での差異が見られるが,シミュレーション結果がほぼ現実通りに交通の様子を再現できているといえる.また旅行時間をヒストグラムでも比較して,実交通とシミュレーションの結果がほぼ一致していることを確認している.

表 3: 旅行時間の計測結果

	平均旅行時間(秒)
実測結果	177
シミュレーション結果	161

# 4 信号制御設計への応用

### 4.1 地点制御

一般に孤立交差点における地点制御では,交差点走行車両の総遅れ時間,すなわち交差点での車両停止時間の総和を評価値とし,これを最小にする信号制御が最適とされている[5].しかし,実交通において安易に信号制御パラメータを変化させることは安全上の理由からも困難であり,また総遅れ時間の計測にも大がかりな設備が必要である.この場合,実交通を精度良く再現できる道路交通シミュレータを利用するのが有効である.

本研究では信号制御のパラメータとして,信号の切替え周期の長さであるサイクル長と,サイクル内での青時間配分率であるスプリットを変数として,これらの最適化を行う.各交差点においてサイクル長とオフセットを変えてシミュレーションを行い,その時の交差点総遅れ時間を計測する.その値の一番小さいサイクル・オフセットの組合せを最適パラメータとする.実験の結果の一部を図5に示す.また全ての交差点において求められた最適パラメータを表4に示す.また同表には,実交通で実際に行われている制御のパラメ・タ,および交通需要から理論的に導く Webster の最適サイクル長,飽和度比によるスプリット値も参考のため合わせて示す.

以上のように実交通では実験的な手法での最適化が 困難な信号制御パラメータの設定を本シミュレータを 利用することで行うことが可能である.

### 4.2 系統制御

市街地などのように比較的短い間隔で複数の信号交差点が存在する交通環境においては,各交差点で信号制御を同期させる系統制御方式を行う場合がある.系統制御では,対象となる系統方向の各交差点のサイクル長を揃えることで,各交差点の同期をとる.これにより系統方向を走行する車両の停止回数を減らすことが

表 4: 最適パラメータ

	サイクル長(秒)			スプリット(%)			
交差点名	実交通	シミュレーション	Webster の式	実交通	シミュレーション	飽和度比	
下石原 1	135	45	42	27	44	43	
小島町	60	25	24	54	47	60	
調布駅西	57	21	23	68	71	74	
調布駅入口	92	93	97	60	49	53	
調布駅東側	50	29	22	60	91	90	

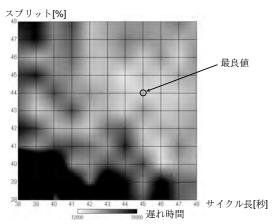


図 5: 遅れ時間(下石原1交差点)

でき、交通の流れをスムーズにすることが期待できる。本研究では旧甲州街道沿いを系統方向として、対象となる連続5ヶ所の交差点間で系統制御を適用した場合のシミュレーションを行う、対象交差点のうち、最もサイクル長の長い調布駅入口交差点を重要交差点として、それ以外の交差点のサイクル長を前節で求めた調布駅入口交差点の最適サイクル長93(秒)に揃えて系統をとるものとする、なお、スプリットについては前節のシミュレ・ションで求めた各交差点毎の最適値をそのまま用いる事とし、青現示開始のオフセットは全て0秒とした。

以上の条件でシミュレーションを行い,総遅れ時間,平均旅行時間,平均停止回数を計測した.なお,総遅れ時間はシミュレーション範囲全体を対象とし,平均旅行時間と平均停止回数は図4のA-B区間(系統方向)のみを対象とした.また前節で求めた地点最適制御を行った場合と,実交通で実際に行われている信号制御を行った場合についても同様の計測を行い比較する.その結果を表5に示す.

この結果から地点最適制御を適用した場合と比較して系統制御では総遅れ時間はあまり変わらないものの,系統方向の車両の旅行時間と停止回数がかなり改善していることが分かる.また,実交通で実際に行われている信号制御は,本研究で求めた地点最適制御などよりもかなり交通の流れが悪いことも明らかである.これは現実の交通では安全性など交通の円滑さとは異な

表 5: 地点制御と系統制御の比較

制御方法	遅れ時間	平均旅行	平均停止		
	(秒)	時間(秒)	回数 (回)		
系統	57,593	66	1.66		
地点最適	52,564	94	3.26		
実交通	119,518	161	3.83		

る評価を採り入れて信号制御設計が行われているためである.

### 5 おわりに

本研究では調布市街地を対象として道路交通シミュレータ MITRAM を用いたシミュレーションを行った.シミュレータには交差点の遅れ時間や旅行時間などの交通流評価機能を新たに加え,これを用いて信号制御の最適設計を行った.また旧甲州街道上の交差点群を系統制御した場合のシミュレーションを行い,地点最適制御との比較を行った.このように,制御方式も含めた総合的な信号制御評価に MITRAM が有効に活用出来ることを示した.

# 参考文献

- [1] 猪飼 國夫,本多 中二,板倉 直明:道路交通シミュレータのためのファジィ推論による自動車の運転モデル,日本ファジィ学会誌,Vol.12,No.3,pp.425-435,2000
- [2] 石川 亮 , 風間 洋 , 本多 中二 , 板倉 直明 , 猪飼 國夫 : 微 視的道路交通シミュレータによる交差点交通解析 , 第 21 回日本シミュレーション学会大会 , pp.147-150 , 2002
- [3] 石川 亮, 風間 洋, 本多 中二, 板倉 直明, 猪飼 國夫: 道路 交通シミュレータによる複数信号交差点の系統制御, 第 22 回日本シミュレーション学会大会, pp.303-306, 2003
- [4] 立本 真治, 本多 中二, 風間 洋, 板倉 直明, 猪飼 國夫: 道路交通シミュレータ MITRAM による実交通解析, 第 22 回日本シミュレーション学会大会, pp.299-302, 2003
- [5] 社団法人 交通工学研究会:交通信号の手引き

### 連絡先:

石川 亮

電気通信大学 システム工学科 本多研究室 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1

Phone: 0424-43-5800

E-mail: ryoxx@fs.se.uec.ac.jp

# 金型磨きロボットシステムのためのファジィ力制御器の開発

Dvelopment of a Fuzzy Force Controller for a Polishing Robot System for Metallic Molds

楠本 幸裕 Yukihiro Kusumoto 福岡県工業技術センター Fukuoka Industrial Technology Center

永田寅臣Fusaomi Nagata福岡県工業技術センター安田 仁徳Kiminori Yasuda(株) エーエスエ

Fukuoka Industrial Technology Center

(株)エーエスエー・システムズ ASA Systems Inc.

塚本治 Osamu Tsukamoto (株) エーエスエー・システムズ ASA Systems Inc.

津田 邦博 渡辺 桂吾 Keigo Watanabe (株) エーエスエー・システムズ 佐賀大学 ASA Systems Inc. Saga University

**Abstract**: In our institute, we have already proposed a polishing robot system for metallic molds. The polishing robot system is developed based on an open architectural 6-DOF industrial robot and runs referring multi-axis CL (Cutter Location) data calculated by a CAM system. The polishing robot can also control the polishing force, which is the resultant force of friction force and contact force acting between an abrasive tool and workpiece. Up to now, although an impedance model following force controller has been used, it was so difficult to suitably tune the impedance parameters. In this study, we propose a new force controller based on fuzzy models to resolve this problem. The effectiveness has been confirmed through a polishing experiment.

### 1. はじめに

近年, 飲料用や化粧品用等に使われるペット ボトル容器が急速に普及し, それに伴いペット ボトル製造用の金型の需要も世界的規模で増大 してきた.ペットボトル容器はブロー成型によ り成型されるため、その仕上がりは金型の品質 に大きく依存しており、金型の表面を鏡面状態 まで仕上げなければ成型されるペットボトル容 器は白くにごり、著しく製品としての品質を損 ねてしまう. そのため、最終工程となる磨きの工 程は,全工程の中で最も時間と労力を費やして 行われる. しかしその一方で、3次元CAD/CAM やNC工作機械の連携により設計や機械加工の 工程で自動化・合理化が進んでいるにも関わら ず、磨きの工程は未だに全て手作業で行われて いるのが現状である. そのため現在, 金型産業 は人件費の安いアジア諸国にその拠点を奪わ れ、国内の金型製造メーカーは大きな打撃を受 けている. このような背景を受け、これまでに 我々は平成14年度即効型地域新生コンソーシ アム事業の一環として自動金型磨きシステムに 関する研究を行ってきた. オープンアーキテク チャ型産業用ロボットの採用と独自に開発した ロボット制御アプリケーションにより, 多軸制 御用CLデータに基づき教示レスで動作が可能 な, 自由曲面を持つペットボトル用金型のため の自動磨きシステムを開発した[1]. さらにこの

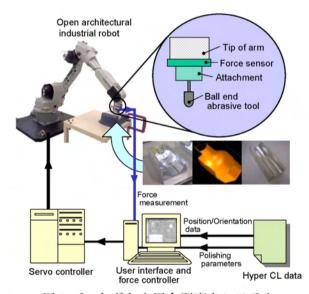


図1ペットボトル用金型磨きシステム

磨きシステムでは、高品位な仕上げを実現するためには不可欠な研磨パラメータの調節スキルを記述したハイパーCLデータを参照することにより、自動で研磨パラメータの調節を行うことが可能である<sup>[2]</sup>. 図1は開発した磨きシステムの概要図である。この磨きロボットは、先端に装着した弾性砥石に作用する磨き力(ワークへの押付力とワークー砥石間に作用する摩擦力の合力)を制御しながら研磨できることを大きな特徴としている。これまで、磨き力の制御法をしてはインピーダンスモデル追従型制御法を

用いていた.しかしながら、曲率が変化する自由曲面が採用された金型ワークに対する安定的な磨き力と高速な磨き速度を実現できる最適なインピーダンスパラメータの探索は試行錯誤的に行われているため、非常に困難であった.そこで今回、磨きのスキルをディジタル化したファジィ推論による力制御法国を用いることで、曲率の異なる自由曲面に柔軟に対応できるシステムの構築を図った.

### 2. ペットボトル用金型磨きシステム

開発した磨きシステムはオープンアーキテク チャ型の産業用ロボットをベースに構成されて いる. オープンアーキテクチャ型とは従来のよ うに教示再生方式によってロボットを操作する だけでなく、たとえばメーカーから提供される WindowsあるいはLinux用のAPIを使うことに よってユーザー独自のアプリケーションを開発 することが可能な産業用ロボットである. これ により、パソコンから直接ロボットをリアルタ イム制御することが可能となる. ベースとなる 産業用ロボットはオープンアーキテクチャ型で あれば基本的に全て対応可能であり、これまで に川崎重工業製のJS10·FS03·FS20, 安川電機製 のUP6·UPJを用いて開発を行ってきた。開発し た磨きシステムでは、ロボットのアーム先端部 分に3自由度の力覚センサを介してボールエン ド形状の弾性軸付砥石を装着し、砥石とワーク 間に作用する運動摩擦力により磨きを行う. 研 磨中、ロボットは力覚センサから得られる情報 をもとに磨き力が常に目標値に追従するように 力制御を行う.

### 2.1. 研磨手法

通常、軸付砥石は電動やエアー駆動のリューター等に取り付けて高速回転させて磨きを行う.しかしこの場合は非常に強い研削力が発生するため、高品位な磨きを行うためには数十[gf]程度の非常に微細な力制御が必要となってしまい、力覚センサの分解能やノイズの影響を考慮すると現実的でない.そこで開発した磨きシステムでは砥石の回転をロックし、砥石をワークに押付ながら移動させるときに発生する運動摩擦力により磨きを行う.こうすることで磨き力の目標値を2~4[kgf]の範囲内にセットすることが可能になり、磨き力を安定的に制御できるようになる.ただし、砥石の全周を効率良く使用するために、ロボットの6軸目を利用して1~40

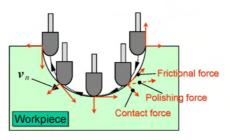


図2 磨きシステムにおける研磨手法

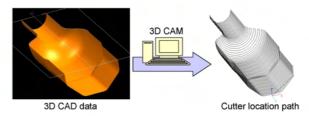


図3 CAMによるCLデータの算出

[deg/s]程度の低速で往復回転を行っている. さらに研磨中は砥石の姿勢を変化させず、Z軸に固定した状態で砥石のボールエンド形状をうまく利用して磨きを行う. 図2は研磨中の砥石の動きを図示したものである. このように砥石の並進移動により発生する運動摩擦力を用いて研磨を行う本手法は、本磨きロボットシステムにおける大きな特徴の1つである[4].

# 2.2. モーション制御

本磨きシステムではCAMシステムによって 生成される多軸制御用CLデータをロボットの 基本的な目標軌道として参照している.3次元 CADで設計されたワークの形状データを基に CAMのメインプロセッサによって図3のような 機械加工用のCL(Cutter Location)データが算出 される.研磨の前段階である切削加工において, この3次元CADによる形状データは必ず作成さ れる.従って研磨用のCLデータを算出するた めに,新たにCADデータを作成する必要はな く,切削加工用に作られたCADデータがそのま ま利用できる.多軸制御用CLデータは図4に 示すように3次元の座標とその座標点における 正規化された法線ベクトルで構成されている.

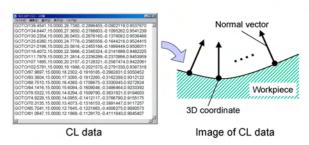


図4 CLデータの概念

切削加工においては、これらがぞれぞれ刃物先 端の軌道及び刃物の傾斜・旋回角として参照さ れるが、本磨きシステムでは弾性砥石先端の軌 道及び力を加える方向として参照する.

# 2.3. 磨き力制御

本磨きシステムのもう1つの特徴として、磨 き力の制御が挙げられる. 磨き力とはワークに 対する押付力と、砥石-ワーク間に作用する摩 擦力との合力であり、この磨き力は力覚センサ からの計測値として得られる. 開発した磨きシ ステムでは、式(1)に示すインピーダンスモデ ル追従型力制御法を用いて, ワークに対する磨 き力が目標値に追従するように、図2中にある ワーク表面に対する法線方向への速度火ルに対し 常に補正を行っている[1]. 磨き力を繊細に制御 することにより、磨きの品質を向上させること ができるだけでなく、ワークの固定方法や砥石 の磨耗に起因する相対位置の不確かさを吸収可 能となっている.

$$\mathbf{v}_{n}(k) = e^{-\mathbf{M}_{d}^{-1}\mathbf{B}_{d}\Delta t}\mathbf{v}_{n}(k-1)$$
$$-\left\{e^{-\mathbf{M}_{d}^{-1}\mathbf{B}_{d}\Delta t} - \mathbf{I}\right\}\mathbf{B}_{d}^{-1}\mathbf{K}_{f}\left\{\mathbf{F}(k) - \mathbf{F}_{d}\right\} (1)$$

# 3. ファジィ推論による磨き力制御

本磨きシステム全体としての性能は、磨き力 制御器の性能に大きく依存している. これまで 我々は、磨き力の制御手法としてインピーダン スモデル追従型力制御法を用いてきた. この力 制御法では,系の目標慣性,目標粘性といった インピーダンスパラメータと, フィードバック ゲイン等を最適な値にチューニングすることで. 目標値への追従性および研磨速度を向上させて きた. しかしインピーダンスパラメータのチュー ニングは試行錯誤的に行われるため, 所望の特 性を持つような最適な値に調整することは非常 に困難であり、図5の ●で示すようなP制御に 近い入出力特性となっていた. このような特性 の制御器では、曲率が変化する自由曲面を持つ ペットボトル金型に対して柔軟に対応すること は困難である. 例えば、大きな力誤差が発生し た場合には極端に大きな補正が入ってしまい. その影響で今度は逆の方向に大きな力誤差が生 まれ、さらにそれを抑えるためにまた大きな補 正が入る、といった悪循環により磨き力が大き く振動してしまう場合がある. この現象を抑え るためには、誤差が大きい時ほどマイルドな速

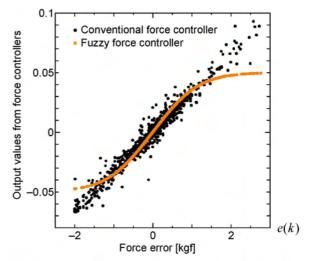


図5 インピーダンスモデル追従型力制御器とファ ジィ力制御器とでの入出力特性の比較

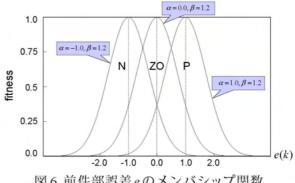


図6前件部誤差eのメンバシップ関数

度補正を行い、ある程度の範囲内の誤差の場合 にはクイックな速度補正を行える特性であるこ とが望ましい. そこで本研究では. これまで使 用してきたインピーダンスモデル追従型力制御 法の替わりにファジィ推論による力制御法を提 案し、磨き力の制御性能の向上を図った.

今回提案するファジィ力制御器では, 磨き力 と目標値との誤差eを入力とし、ワーク表面に 対する法線方向への速度v"、すなわちサンプリ ング時間ごとの位置の補正量を出力とする. 前 件部メンバシップ関数は図6に示すガウシアン 型を用い、次式で与えられる.

$$\mu(x) = e^{\log(0.5)(x-\alpha)^2\beta^2}$$
 (2)

なお、 $\alpha$ と $\beta$ はそれぞれメンバシップ関数の中 心値と標準偏差の逆数である. 推論法には後件 部が定数である簡略型ファジィ推論法を用い. その後件部定数値は表1に示すとおりである. 以上から設計したファジィ力制御器を用いた場 合と、従来のインピーダンスモデル追従型の力 制御器の場合とで、力誤差eに対する力制御器 からの出力v,との関係を比較したものを図5に

表1後件部定数值

2 1 2 1			
Antecedent parts	N	ZO	Р
Consequence parts	-0.05	0.0	0.05





(a) workpiece

(b) Cutter location path

図7 磨き実験で使用したワーク及び磨きのパス

示す.このグラフを見ても,ファジィ力制御器が所望の特性を持った力制御器となっていることが分かる.また,ファジィ制御器が言語表現により設計されているため,後の変更やチューニングなども容易に行うことができる.

# 4. 磨き実験

つぎに、提案するファジィ力制御器の有効性を 検証するために研磨実験を行った. 今回は図7(a) のような形状を有するワークで研磨実験を行っ た. 図 7(b) は使用した長手方向パスである. な お、ワークの材質はジュラルミンである、図8 はその時の力誤差をグラフで表示したものであ る. 比較のため、従来のインピーダンスモデル 追従型力制御器を用いた場合の誤差も表示して いる. なおこの両者は、目標磨き力や送り速度、 研磨対象ワークの研磨を施す領域など、制御器 以外の条件は全て同じである.図8を見ると、 周期的に現れる大きな力誤差が見受けられる が, これらはパス上での折り返し地点であり, 進行方向が反転し大きな加速度が生じたことに 起因する誤差である. 今回提案したファジィカ 制御器では、これら折り返し地点での力誤差を 減少させることに成功している. またそれ以外 の領域においては、従来の力制御器に劣らない 良好な力の追従性が得られた.

### 5. おわりに

以上の結果から、今回提案したファジィ推論による力制御器を金型磨きシステムに適用することで、磨き力の制御性能が改善できることが確認された.今後は、ファジィ推論の特徴を活かし入力に誤差のレートや研磨速度等を追加し、ファジィ力制御器のさらなる高度化を図っていく.

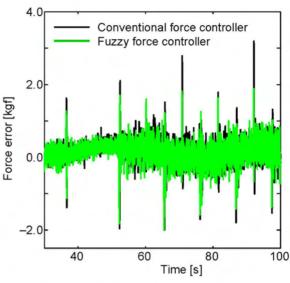


図8 磨き実験における磨き力の目標値との誤差 e

# 6. 参考文献

- [1] 永田, 楠本, 渡辺, 津田, 安田: 金型の高品 位磨きのための軸付砥石のモーション/力制 御法, 第12回インテリジェント・システム・ シンポジウム講演論文集, pp.133 – 136,2002
- [2] 楠本,永田,安田,津田,渡辺:ペットボトル金型の高品位磨きシステムの開発 -ハイパーCLデータを用いたボールエンド砥石のスキルフル制御ー,第3回SICE システムインテグレーション部門講演会講演論文集(I),pp.85 86,2002
- [3] 楠本,永田,渡辺,津田,安田,鎌倉:ロボットサンダーのためのファジィ補償を用いたインピーダンスモデル追従型力制御法,第4回日本ファジィ学会九州支部学術講演会予稿集,pp.9-12.2002
- [4] 津田,安田,永田,楠本,渡辺:特願2002-286901,研磨装置及び研磨方法

### 連絡先

楠本幸裕

福岡県工業技術センター インテリア研究所 〒831-0031 福岡県大川市上巻405-3

Phone: 0944-86-3259

Fax:0944-86-4744

E-mail:y\_kusumoto@fitc.pref.fukuoka.jp

# フラクタルファジィ・インテリジェント制御システム

# Fractal-Fuzzy Intelligent Control System

福島龍太郎 Ryutaro Fukushima Hitz 日立造船株式会社

HitachiZosen Co.

藤吉誠 Makoto Fujiyoshi Hitz 日立造船株式会社 HitachiZosen Co.

### Abstract:

We applied fractal-fuzzy control for combustion control in a fluidized bed waste incinerator. Fractal dimensions for the time series data of waste level and oxygen concentration was sequentially calculated to measure the fluctuation of the data. We applied fuzzy rules using the fractal dimension size to control the amount of primary and secondary air quantity, and the amount of waste feed quantity. Using the proposed fractal-fuzzy control we were able to improve the combustion state.

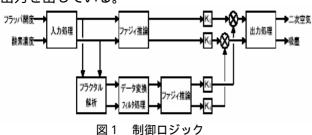
# 1. はじめに

弊社では都市ごみ流動床焼却炉の燃焼制御方法としてファジィ燃焼制御を適用し、ダイオキシン、CO排出量の低減を計り、環境負荷の低い焼却炉燃焼制御方法を開発してきた。しかしながら制御に使用するセンサー入力等の時系列データは複雑系であり、数値化が難しいため、従来では移動平均、差分、微分等の方法で経時的変化を把握して制御出力を調整していた(1)-(4)。

本報では、従来の複雑系の時系列データに対して、連続的にフラクタル次元を算出し、数値 定量化し、実際に燃焼制御に応用することで、 更なる燃焼状態の改善を試みた。

# 2. 実験方法

実験は既報(1)~(4)同様、新潟県両津市クリーンセンターの都市ごみ流動床焼却炉で実施した。制御ロジックを図1に示す。センサー入力信号は、投入ホッパーでのごみレベルを計測するフラッパーセンサーと燃焼の過不足を判断する酸素濃度センサーをとり、制御出力は2次空気量と給塵速度をとっている。これらのセンサー入力値に対して、経時的にフラクタル次元計算した結果をファジィ推論し、新しい出力値を計算することで従来出力値との演算処理をして制御出力を出している。



# 3. フラクタルファジィ制御原理

焼却炉内のセンサー入力である、フラッパー

開度、酸素濃度の経時変化の幾何形状は複雑であり、数値化するのが難しい。そこでフラッパー開度、酸素濃度曲線  $X(U_i: \mathbb{R})$  閉曲線) が同じ長さ d の折れ線 N(d) 個で近似できたとする。このとき X のハウスドルフ K 次元測度  $M^k(X)$  は

$$M^{k}(X) \quad \liminf_{d\to 0} \left\{ \sum_{i=1}^{N(d)} d^{k} \mid d(Ui) = d, X \subset \bigcup_{i=1}^{N(d)} i \right\}$$
$$= \lim_{d\to 0} \left\{ N(d) \times d^{k} \right\} \quad \cdots$$

$$N(d) = \mu \cdot d^{-k_0} \cdots$$

の関係があったとすれば、

$$\lim_{d\to 0} \{N(d) \times d^{k_0}\} = \mu > 0 \cdots$$

となる。よって X のハウスドルフ k 次元測度  $\mathbf{M}^{k}(\mathbf{X})$ は  $k=k_{0}$  において、

$$M^{k_0}(X)$$
  $\mu$  ···

となり有限確定な値を持つことになる。このと き 式を変形して

$$\log N(d) = -k_0 \log d + \log \mu \quad \cdots$$

とすることで、グラフの傾きから ko が算出可能である。この ko を図形 X のフラクタル次元(以降 ko)と定義することで酸素濃度、フラッパー開度曲線の変動具合を定量的に表現できることになる。ここでフラッパー開度、酸素濃度の経時変化曲線に対して一定時間ごとに ko を計算することで連続的データとして ko が得られ、この値を用いて制御出力が調整できる。

### 4. 実験結果

前報では「インテリジェント遠隔監視・制御システム」 $^{(6),(7)}$ で採取した時系列データを用いて、机上で  $\mathbf{k}_0$ を計算し、酸素濃度が低減し、 $\mathbf{CO}$  ピ

ークが発生するパターンに対して、酸素濃度低減の前にフラクタル次元がピーク値を持つことを示した(®)。そこで今回はこの知見をいかし、時系列データとして得られる ko に対して、一例として表 1 に示すルールによる制御実験を実施した。

表1フラクタルファジィルール

		$O_2$ P $V$ 値			
		N	Z	P	
	N	Z	Z	Z	
k <sub>o</sub>	Z	Р	Z	Z	
	P	P	Z	N	

(制御出力: 2次空気修正量)

図 2 は酸素濃度の経時変化に対して、直径 d =6[sec]の円で被覆していった結果、また図下部では、40 秒間隔で直径 d=2,3,4,6,8[sec]で被覆していた場合の酸素濃度曲線と円の交点の数N(d)を求めた結果である。図から経時的に被覆が可能でありN(d)=46,30,22,14,10と算出できることがわかる。これにより 式から $k_0=1.0999$ を連続的に算出可能となる。

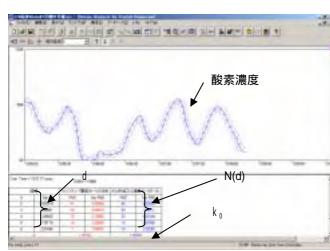


図 2 酸素濃度のフラクタル次元連続算出結果

図3は表1のルールで燃焼制御実験をした場合の運転画面を示す。横軸は時間、縦軸は規格化した酸素濃度、ko、CO濃度、2次空気出力値を示す。また9:50前のデータは比較データであり、制御出力を実際の焼却プラントに出している場合である。図をみると9:50前では、酸素濃度の低減の後COピークが発生することがわかる。また酸素濃度低減の前にはkoの値が大きくなりピーク値(図中)を持つこともわかる。これに対して9:50以降では、COピークの発生がおさまり、酸素濃度の低減の前に2次空気量が適度に導入され、酸素不足状態を補っていることがわかる。

このように ko で酸素濃度の急激な低下を予測し不足空気を補うことで燃焼状態が改善できることがわかる。この理由としては、焼却炉内で酸素不足に陥るときは、ごみが炉内にどか落ちした場合などであり、この現象による燃焼変動が酸素濃度変動になり、酸素濃度急低下前に通常状態からの乖離が起こるためと考えられる。

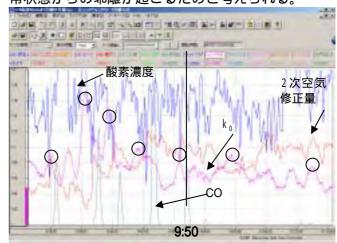


図3 フラクタルファジィルール

### 5.まとめ

- ・複雑系の時系列データをフラクタル次元で連続的に数値化することが可能となった。
  - ・従来移動平均、差分、微分で捕らえていたセンサー入力値の変動の大小をフラクタル次元で 数値化処理することが可能となった。
  - ・酸素濃度の急低下をフラクタル次元のしきい値、ピーク等で予測可能であることがわかった。 ・経時フラクタル次元を燃焼制御パラメータに 用いることで燃焼ガス中の CO 平均値、CO ピークの低減運転が可能となった。

### [参考文献]

(1)M.Fujiyoshi, R.Fukushima et al.,"Intelligent Control System for Fluidized Bed Incinerator", Proc. of the7th SCEJ Symp. on Fluidization, Awaji, p40-47(2001)

(2)M.Fujiyoshi, R.Fukushima et al.,"都市ごみ流動床炉における燃焼制御のインテリジェント化",第 23 回全国都市清掃研究発表会論文集,京都(2002)

(3)M.Fujiyoshi, R.Fukushima et al.,"Intelligent Control System for Fluidized Bed Incinerator",Proc. 18th Fuzzy System Symosium, Nagoya, p25-28(2002)

(4)M.Fujiyoshi, R.Fukushima et al.,"Intelligent Controll System for Municipal Waste Fluidized Bed Incinerator",Proc. of 2nd i-CIPEC, Cheju, Korea, p129-137(2002)

(5)石村貞夫,石村園子著,「フラクタル数学」,p240-242 東京図書

(6)M.Fujiyoshi, R.Fukushima et al.,"焼却炉制御のインテリジェント化", 第 24 回全国都市清掃研究発表会論文集, 東京,p31-33(2003)

(7)M.Fujiyoshi, R.Fukushima et al.,"インテリジ・エント遠隔監視・制御 システム",日立造船技報,vol63,no3,p20-23(2003)

(8) M.Fujiyoshi, R.Fukushima et al.,"Intelligent remote monitoring and control system",Proc. 19th Fuzzy System Symosium, Osaka, p643-644(2003)

### 「連絡先 ]

〒625-8501 京都府舞鶴市余部下 1180 Hitz 日立造船(株) 環境・鉄構事業本部 環境総合開発センター 福島龍太郎 電話: 0773-62-8791、FAX: 0773-62-4450

電話: 0773-62-8791、FAX: 0773-62-4450 Email: fukushima\_r@hitachizosen.co.jp

# 教師データの利用による能動的学習法の学習速度の向上

Speedup of Learning for Active Learning Method by using Supervised Data

櫻井 義尚 Yoshitaka Sakurai 本多 中二 Nakaji Honda 電気通信大学 西野 順二 Junji Nishino

University of Electro-Communications

Abstract: We propose the Active Learning Method(ALM) for acquiring control knowledge actively by trial and error, and it proves about the usefulness. But, Learning by trial and error takes much time for Learning. If it is the case where supervised data can be obtained, control knowledge can be acquired having used it more quickly. Then, supervised learning is performed by ALM. Even when it is difficult to obtain the optimal supervised data, by learning by trial and error based on imperfect supervised data, Improvement in learning speed is aimed at. In this paper, the learning simulation of an action policy for the control problem of double pendulum is performed, and when imperfect supervised data is given compared with the case where there is no knowledge, it verifies how much of speedup is obtained.

### 1 はじめに

本研究の目的は人間の能動学習機能の工学的 実現である.

学習については,機械学習の分野で情報理論,統計学,統計物理学,ソフトコンピューティングなど様々な方向からのアプローチが試みられている.そして,そのほとんどは学習に教師信号を必要する.しかし教師信号を得ることが難しい事例が多数あり,教師信号なしでの学習法も求められている.また,教師信号なし学習では試行錯誤的に学習することにより, 人間のエキスパートが得た解よりも優れた解を発見する可能性がある.そこで我々は試行錯誤により能動的に制御知識を獲得する方法,能動的学習法を提案し,その有用性について実証してきた[1][2][3].

しかし,試行錯誤による学習は学習に多くの時間を要するという欠点がある.教師データを得られる場合ならそれを用いた方がより速く制御知識を得ることができる.そこで,能動的学習法において教師データによる学習を行う.最適な教師データを得ることは難しい場合でも不完全な教師データを基に試行錯誤による学習を行うことにより学習速度の向上を図る.

本研究では,2重振子の制御問題における行動政策の学習シミュレーションを行い,何の知識も無い場合と比べて,不完全な教師データを与えた場合,どの程度の速度の向上が得られるかを検証する.

### 2 能動的学習法

# 2.1 **能動的学習法**(Active Learning Method)

人間の学習においてもっとも重要な要素の一つに「経験」がある.人間の判断も,過去の A の

とき B だったといった経験を基にしていることが多い.人間の運動制御などもこれの最たるものであり,パターン的なルールを経験的に学んでいったものであると考えられる.そこで我々はこのような人間的な学習の工学的な具現化として能動的学習法(以後 ALM )を提案する ALMはモデリングにパターン的アプローチを試みたものでこの対象となる多入力多出力のシステムを1入力1出力ごとに分割し,その特性を繰り返し学習的に抽出して再度,総合化する.このことにより対象となるシステムを,ファジィ的な解釈に基づいて機能的にモデリングする手法である.

人間がある対象に関して学習する際にはまず, 一見乱雑に見える多くの情報の中からその特徴を掴み,傾向を見いだすところから始まる.そして過去に学習した知識との結び付きを見いだし,その関連性とともに,知識として脳に格納する.

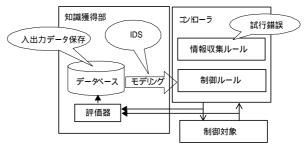


図 1 ALM のシステム

ALM でも同様で,あるシステムの挙動を学習する場合,そのシステムの入出力関係を把握することから始める.対象となるシステムの入出力データを収集し(ゼロからの学習の場合はランダムに動作を試行してデータを集める.教師データがある場合はそれを用いる.),それらを

評価して保存する(図1 ), それによりシステ ムをモデリングする(図1). そしてその知識 を記憶しつつ,また試行錯誤的に入出力データ を収集し(図1 ), 過去の知識とそのデータを 使ってシステムをモデリングする.これを繰り 返す.

#### 2.2 **モデリング**

ALM では,入出力データをデータ平面上に射 影し,その平面上から連続した一筋の経路(ナ ロウパス: Narrow Path) を抽出することで, システムの特徴を掴む .また ALM では , 複入力 複出力(MIMO)のシステムを単入力単出力 (SISO) のシステムに分割し, それを結合する ことにより表現している(図2).そして,この 単入力単出力システムのナロウパスの抽出には 2.3 で提案する Ink Drop Spread (以下, IDS) を用いる.

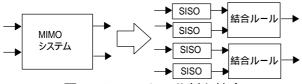
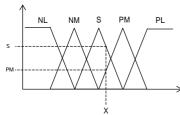


図2 システムの分割と統合

例として2入力1出力のシステムの場合,シ ステムの入出力関係は3次元空間上にプロット される.その入力2次元の内,片方の座標軸に おいて図3のようにメンバーシップ関数によっ て空間を分割する.そしてその分割された領域 ごとに1入力1出力のナロウパスを抽出する. 図3の式のように領域ごとの適応度と出力を掛 け合わせたものの総和を取る事ことにより結合 する.



X=0.7,  $\beta_{NL}=0$ ,  $\beta_{NM}=0$ ,  $\beta_{S}=0.75$ ,  $\beta_{PM}=0.25$ ,  $\beta_{PL}=0$  $Y = \beta_{NL}Y_{NL} + \beta_{NM}Y_{NM} + \beta_{S}Y_{S} + \beta_{PM}Y_{PM} + \beta_{PL}Y_{PL}$ 図3 領域の分割

#### 2.3 IDS (Ink Drop Spread)

IDS の基本コンセプトは,入出力データから ファジィ手法を用いてシステムの特性(ナロウ パス)を抽出することである.

ここで,データ平面上の全てのデータを光源 と考える(図4).データの一定垂直上から照射す

ると,それぞれの光は干渉し合い,明暗を示す 照明パターンが現れる. つまり光が多く重なり 合う部分は他の領域よりも明るくなり、そうで ない部分は暗くなる、明るい領域を連続的に結 合することで、入出力関係を表すある種の経路 (ナロウパス)を得ることが出来る[1].

また,この IDS を適用することによりナロウ パスとともに照射パターンの広がりの情報も得 られる.この広がり情報はデータのとり方によ り他のパラメータの影響や入出力関係の不確定 の度合いなどの情報を含む.この情報により, 入出力関係の不確定部分の検出や確立的動作の 表現が可能になる.

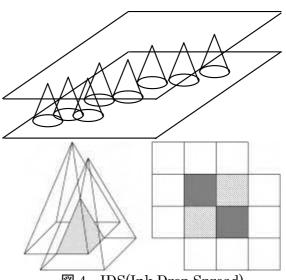


図 4 IDS(Ink Drop Spread)

#### 2.4 能動的学習

学習と言うものを考えるときに必ず必要なも のがある.それは評価である.何が良くて何が 悪いか,これがわからなければ何を学習すれば いいのかすらわからない、ある意味学習とはこ の評価を最大にするように最適化していくこと として定義される.機械学習においてこの評価 について考える場合,教師信号有りの場合はこ の信号自体に評価が含まれている.しかし教師 信号無しの場合ではこの評価を自らのシステム の内に保有している必要がある . そのため ALM では評価器を有し、さらに能動的に学習するた めにその評価する信号を自ら働きかけ生成して いく、この出力の決定には情報収集ルールが用 いられ,ナロウパスとその広がりの情報に基づ き確率的に決定される.

IDS を用いてモデリングした入出力システム は確信値の分布関数のような形になっている (図5).この広がりを用いてナロウパスを中心 として確率的に入出力関係を求めることができ る.このように広がりの情報を基に能動的に出

力を決定し,その結果を評価,評価の高いデータを用いてモデリングを繰り返す.

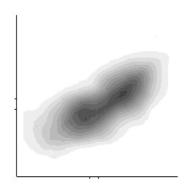


図 5 SISO system

### 3 シミュレーション

ALM により 2 重振子の振幅増大制御シミュレーションを行い,ゼロから学習する場合と不完全な教師データを初期値として学習する場合との比較を行う.

### 3.1 2 重振子

アクロボットと呼ばれる 2 重振子は人間の鉄棒運動に似た力学モデルである(図6). 鉄棒を? む手に相当する部分,リンク0は非駆動関節であり,動摩擦による力のみがかかる.制御トルクは腰に相当する部分,リンク1にのみ与えられる.

このため 0は,モデルの重心位置と姿勢形状に依存する.すなわち, 1を決めると 0の値を任意に決めることはできない.

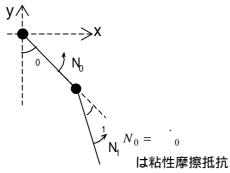


図6 2リンク2重振子

また ,より鉄棒運動のモデルに近づけるためリンク 1 は駆動制限を設けている  $(-130^\circ)$  130°). よってリンク 1 は回転できない.

モデルを記述すると、一般化座標として、各関節 i でのリンク i-1 とリンク i との相対角度 i(i=0,1)を取る . 各関節に加えるトルクは N i(i=0,1)である .

運動エネルギーをT (式 1), 重力によるポテンシャルエネルギーをV (式 2)として, ラグランジュ関数 L=T-V により  $0\sim 1$  に対するラグランジュ方程式(式 3)から運動方程式が求まる.

$$T = \sum_{i=0}^{1} \left( \frac{1}{2} m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2) + \frac{1}{2} I_i^{\; \cdot \; 2} \right) \tag{1}$$

$$V = \sum_{i=0}^{1} m_i g y_i \tag{2}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{i}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \dot{i}} = N_i \tag{3}$$

ただし,  $x_i, y_i$  は i 番目のリンクの重心座標,  $I_i$  は慣性モーメントである.

運動方程式を 4 次のルンゲクッタ法により離散化し, t=1/1000 秒として計算機シミュレーションを行う.

#### 3.2 2 重振子制御シミュレーション

2 重振子のモデルを制御対象として, ALM を用いてその振幅増大制御ルールを獲得する知識 獲得シミュレーションシステムを構築する.

図1を適用すると、制御対象は2重振子のモデルであり、コントローラーから受け取る操作量(トルク)によってモデルの状態(各リンクの角度、角速度)を変化させ、コントローラーにそのモデルの状態を返す.

コントローラーははじめ設定された情報収集ルールにしたがって操作量を出力し、制御対象の入出力データを収集し、そのデータを基に知識獲得部において制御ルールを学習していく、学習が進むと学習した制御ルールによりモデルの状態を入力として、操作量を出力する。その流れは以下のようになる。

ゼロからの学習の場合,ランダムに操作量を出力し,入出力データを収集する.

教師データがある場合,教師データを用いる.評価関数によって評価を与え評価の高い操作結果(入出力データ)を保存(もっとも振れ角の大きかったものを制御知識としてデータベースに保存する)

この制御知識のデータベースを制御ルールの 形に変換して,IDS を行い,その入出力関係 をモデリングする.

このモデリングしたものを新しいコントロー ル部の制御ルールとする.

制御ルールに従い確率的に出力を決定する. を繰り返す

### 3.3 実験内容

制御対象:2 重振子

制御目的:リンク 0 の振幅増大 制御目標:リンク 0 が 180 度

(垂直下方向を0度とする)

Mode1:ゼロからの学習

Mode2:初期値に不完全な教師データを用いた

学習(不完全な教師データは 100 度ま

で到達できるルール)

Mode 1 と Mode 2 それぞれに 5 回実験を行い, 学習にかかった試行回数を比較する.

### 3.4 実験結果

図 7 に学習曲線の 1 例を示す . Mode 1 (ゼロからの学習)では約 15000 回かかるが , Mode 2 (不完全な教師データを用いた学習)では約 6000 回と約 40%の回数で学習している . また , 100 度から 180 度までにかかる回数をみても , Mode 1 約 10000 回 Mode 2 約 6000 回と約 60%の回数で学習している .

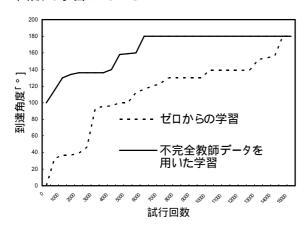


図 7 学習曲線

しかし,試行錯誤による学習はランダム検索なので毎回学習時間に変動があるので1例では評価できない.そこで平均値を表1に示す.

表 1 平均目標到達回数

平均目標到達回数	Mode1	Mode2
0 度から180 度	21400	12700
100 度から180 度	18100	12700

平均値を見ると,0度から180度で Mode2 は Mode1 の約59%,100度から180度で70%の回数で学習している.平均値でも不完全な教師データを用いることによる学習速度の向上がみられる.

最適値を求める状態関数は凸関数ではないの で初期値に与える教師データが広域最適値の近 くでない場合,これほどの学習速度の向上は望めないものと思われる.また,試行錯誤による学習はランダム検索なので毎回学習時間に変動がある.

今回は制御対象が比較的単純だったので与えた不完全な教師データも比較的,広域最適値の近くに与えられた為に学習速度の向上が得られたものと考えられる.より複雑な制御対象の場合,得られる不完全な教師データが広域最適値から遠い局所最適値の場合が多く,その場合,今回ほどの学習速度の向上は望めないものと思われる.

### 4 おわりに

本研究では,試行錯誤により能動的に制御知識を獲得する方法,能動的学習法を提案し,2 重振子の行動政策の学習シミュレーションを通して,不完全な教師データに基づいて試行錯誤的に学習することにより,ゼロから学習するより効率よく学習し,学習速度が向上することを示した.

### 参考文献

- [1] Yoshitaka SAKURAI, Nakaji HONDA, Junji NISHINO: "Acquisition of Knowledge for Gymnastic Bar Action by Active Learning Method", Jounal of Advanced Computational Intelligence & Intelligent Infomatics (JACIII), Vol.7, No.1, pp.10-18 (2003)
- [2] 櫻井義尚, 本多中二, 西野順二: "能動的学習 法を用いた制御知識の獲得", "Acquisition of Control Knowledge by Active Learning Method", Proc. of The 12th FAN Intelligent Systems Symposium(FAN'02), pp463-466 (2002)
- [3] Go YUASA, Saeed BAGHERI SHOURAKI, Nakaji HONDA, Yoshitaka SAKURAI: "Applying an active learning method to control problems", Proc. of Asian Fuzzy System Symposium 2000(AFSS2000), Tukuba Japan, vol.1 pp572-577 (2000)

### 連絡先:

櫻井 義尚

電気通信大学システム工学科本多研 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

Phone: 0424-43-5800 Fax: 0424-43-8020

E-mail: ysakurai@fs.se.uec.ac.jp

### ファジィモデルに基づく動的可変構造システムの安定制御

Fuzzy Model-based Control for Dynamic Variable Structure Systems

### 大竹 博 田中 一男

Hiroshi Ohtake and Kazuo Tanaka

#### 電気通信大学 知能機械工学科

Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems

The University of Electro-Communications

Abstract This paper presents a dynamic variable structure system and its controller design conditions. The dynamic variable structure system, which is a class of hybrid dynamic systems, consists of plural subsystems and they are switched by switching laws. Each subsystem can have different degrees of freedom. In this paper, we employ switching fuzzy models to represent the subsystem's dynamics, switching laws and conservation laws with respect to states, momentum and/or energy of the system. We derive controller design conditions for dynamic variable structure systems.

### 1 はじめに

近年,ハイブリッドシステムやスイッチングシステムのように制御対象が何らかのイベントに応じて切り替わるシステムの研究が行われている [1, 2, 3, 4, 5],従来の研究では,切り替えの前後においてサブシステムの自由度が変化しない対象が多く扱われてきた.しかし,関節などの拘束を持つシステムや生物・生体などの高度な運動の複雑なダイナミクスを表現しようとすると,切り替えの前後においてシステムの自由度が同一であるという制約は厳しいものとなる.

本研究では,自由度が異なるシステムを切り替えることによって構築される新しい動的可変構造システムを提案する.動的可変構造システムの制御では,サブシステムのダイナミクスだけでなく,サブシステムの切り替わりやそのときの状態変数の変化,エネルギの保存則を考慮して,系全体の安定性を保証する制御器を設計する必要がある.本研究では,サブシステムのダイナミクスや切り替え条件,状態やエネルギの保存条件をスイッチングファジィモデル [6] を用いて表す.そして動的可変構造システム全体を安定化するためのスイッチングファジィ制御器の設計条件を導出する.

#### 2 動的可変構造システム

動的可変構造システムとは  $\gamma$  個のサブシステム  $S_i$   $(i=1,2,\cdots,\gamma)$  が状態変数  $x_i(t)$  の値によって他のサブシステムに切り替わるシステムである.各サブシステムはそれぞれ異なる自由度 ( 状態変数の数 ) を持つことができる.また,サブシステム  $S_i$  から  $S_j$  への切り替えは,状態変数や外部入力からなる切り替え条件に基づいて発生する.静的な平衡状態からだけでなく,動的な運動状態からでも切り替えは起こる.切り替えの際には,状態量保存や運動量保存,エネルギ保存などの保存条件に基づき,切り替わり前のサブシステムの状態の一部が,切り替わり後のサブシステムに引き継がれる.動的可変構造システムの一般形を次のように定義する.

サプシステム 
$$S_i$$
:  $\dot{\boldsymbol{x}}_i(t) = \boldsymbol{f}_i(\boldsymbol{x}_i(t), \boldsymbol{u}_i(t))$  (1)

切り替え条件: 
$$\xi_{ij}(\dot{x}_i(t), x_i(t), u_i(t)) \leq 0$$
 (2)

保存条件: 
$$T_{ij}(x_j(t)) = g_{ij}(x_i(t))$$
 (3)

ここで,

$$i = 1, 2, \dots, \gamma, \ j = 1, 2, \dots, \gamma, \ i \neq j$$
 $\boldsymbol{x}_i(t) = \begin{bmatrix} x_{i1}(t) & x_{i2}(t) & \cdots & x_{in_i}(t) \end{bmatrix}^T$ 
 $\boldsymbol{u}_i(t) = \begin{bmatrix} u_{i1}(t) & u_{i2}(t) & \cdots & u_{im_i}(t) \end{bmatrix}^T$ 

$$\begin{split} &n_i \leq n, \ m_i \leq m, \\ &n = \max_i \ n_i < \infty, \ m = \max_i \ m_i < \infty \end{split}$$

である.ただし,サブシステム  $S_i$  から  $S_j$  への切り替えのときには,以下の条件を満たすと仮定する.

$$\sum_{\nu=1}^{n_i} \sum_{\sigma=1}^{n_j} e_{ij\nu\sigma} \neq 0 \tag{4}$$

$$e_{ij
u\sigma}=\left\{egin{array}{ll} 1 & x_{i
u} \mathrel{ extsf{L}} x_{j\sigma}$$
が本質的に同じ変数  $0 & x_{i
u} \mathrel{ extsf{L}} x_{j\sigma}$ が本質的に違う変数

[例 1] 動的可変構造システムにおいて,それぞれのサブシステムの安定性だけでは系全体の安定性を保証できないこと示すために,以下のような単純なシステムについて考える.

$$\boldsymbol{S}_1: \dot{\boldsymbol{x}}_1(t) = \boldsymbol{A}_1 \boldsymbol{x}_1(t) + \boldsymbol{B}_1 \boldsymbol{u}_1(t)$$

$$\boldsymbol{S}_2: \dot{\boldsymbol{x}}_2(t) = \boldsymbol{A}_2 \boldsymbol{x}_2(t) + \boldsymbol{B}_2 \boldsymbol{u}_2(t)$$

$$oldsymbol{x}_1(t) = \left[egin{array}{c} x_{11}(t) \ x_{12}(t) \end{array}
ight], oldsymbol{x}_2(t) = \left[egin{array}{c} x_{21}(t) \ x_{22}(t) \ x_{23}(t) \end{array}
ight]$$

ここで, $oldsymbol{A}_1,oldsymbol{A}_2$  および  $oldsymbol{B}_1,oldsymbol{B}_2$  は,

$$m{A}_1 = \left[ egin{array}{ccc} -16 & -11 \\ -10 & 22 \end{array} 
ight], m{B}_1 = \left[ egin{array}{ccc} 11 \\ 8 \end{array} 
ight]$$

$$\boldsymbol{A}_2 = \left[ \begin{array}{ccc} 3 & 0 & 4 \\ 32 & 9 & 4 \\ 26 & 0 & 0 \end{array} \right], \boldsymbol{B}_2 = \left[ \begin{array}{ccc} 0 & 11 \\ 0 & 0 \\ 8 & 1 \end{array} \right]$$

とする . また , 以下の条件を満たすとき ,  $S_1$  から  $S_2$  へ ,  $S_2$  から  $S_1$  へそれぞれ切り替わる .

$$\xi_{12}(\boldsymbol{x}_1(t)) = x_{12}(t) = 0, \tag{5}$$

$$\xi_{21}(\boldsymbol{x}_2(t)) = x_{23}(t) = 0 \tag{6}$$

切り替わりの際には,以下のような保存条件を満たす.状態量の一部が直接,次のシステムに引き継がれる状態量保存可変構造システムである.

$$egin{aligned} oldsymbol{x}_1(t) &= oldsymbol{G}^{21} oldsymbol{x}_2(t), \ oldsymbol{G}^{21} &= egin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \ oldsymbol{x}_2(t) &= oldsymbol{G}^{12} oldsymbol{x}_1(t), \ oldsymbol{G}^{12} &= (oldsymbol{G}^{21})^T \end{aligned}$$

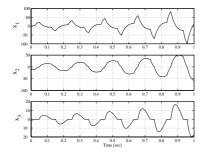


図 1: 切り替えを考慮していないときの制御結果

このようなシステムに対して,切り替えを考慮せず,サブシステムごとに独立してLQR制御器を設計し,サブシステムが切り替わるたびに制御器も切り替える.図1にシミュレーション結果を示す.サブシステムごとに独立して設計した制御器では,動的可変構造システムを安定化できていない.3.2章では保存条件を考慮した制御器設計条件を導出し,上述のシステムを安定化可能な制御器を設計する.

#### 3 動的可変構造システムの安定解析

本論文では,2章で定義した動的可変構造システムの一般形の中で,特に次のようなサブシステム,切り替え条件,保存条件を持つ動的可変構造システムについて考える.

サブシステム  $S_i$ :

$$\dot{\boldsymbol{x}}_i(t) = \boldsymbol{f}_{i1}(\boldsymbol{x}_i(t)) + \boldsymbol{f}_{i2}(\boldsymbol{x}_i(t))\boldsymbol{u}_i(t)$$
 (7)

切り替え条件: 
$$C_i\dot{x}_i(t) + \xi_{ij}(x_i(t)) = 0$$
 (8)

保存条件: 
$$x_j(t) = g_{ij}(x_i(t))$$
 (9)

また,本論文では非線形なサプシステム  $S_i$  や切り替え条件,保存条件をスイッチングファジィモデル [6,7] を用いて表現する.スイッチングファジィモデルは状態変数  $x_i(t)$  によって作られる位相空間を象限ごとに分割し,ファジィモデルを構築する.動的可変構造システムにおける切り替え面は,象限の切り替わり面に一致することが多い(一致していなくても変数変換を行って切り替え面をあわせることが可能である).そのため,スイッチングファジィモデルは,動的可変構造システムのモデル表現に有効である.

#### 3.1 スイッチングファジィモデルに基づく制御

本章では,文献 [6,7,8,9] において提案したスイッチングファジィモデル,スイッチングファジィ制御器および制御器設計条件を示す.サブシステム(7) に対して sector nonlinearityを適用することにより,スイッチングファジィモデルを得る(詳しいモデル構築方法は[7,8]を参照).

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{i}(t) = \sum_{q_{i}=1}^{Q_{i}} \sum_{k=1}^{r_{i}} v_{iq_{i}}(\boldsymbol{x}_{i}(t)) h_{iq_{i}k}(\boldsymbol{x}_{i}(t)) \times (\boldsymbol{A}_{iq_{i}k}\boldsymbol{x}_{i}(t) + \boldsymbol{B}_{iq_{i}k}\boldsymbol{u}_{i}(t))$$

$$(10)$$

ここで,

$$v_{iq_i}(\boldsymbol{x}_i(t)) = \left\{ egin{array}{ll} 1, & \boldsymbol{x}_i(t) \in \operatorname{Region} \ q_i, \\ 0, & \boldsymbol{x}_i(t) 
otin \operatorname{Region} \ q_i, \end{array} 
ight.$$

 $m{A}_{iqik} \in R^{n_i imes n_i}, \ m{B}_{iqik} \in R^{n^i imes m^i}, \ h_{iqik}(m{x}_i(t))$  はメンバシップ関数, $Q_i$  は領域の総数, $r_i$  は各領域のファジィモデルの規則数である.このファジィモデルは領域  $q_i$  ごとにローカルな高木・菅野 (T-S) ファジィモデル [12] を持ち,それら

をスイッチさせることで全体のモデルを表す、それぞれの領域は象限に対応しており、 $q_i$ 番目の領域は次のように定義される、

$$\begin{aligned} \text{Region } q_i: \ R_{iq_i}\big(s_{i1q_i}, s_{i2q_i}, \cdots, s_{in_iq_i}\big), \\ s_{i\nu q_i} = \left\{ \begin{array}{cc} 1 & x_{i\nu}(t) \geq 0 \\ 0 & x_{i\nu}(t) < 0, \ \nu = 1, 2, \cdots, n_i. \end{array} \right. \end{aligned}$$

スイッチングファジィモデル (10) のための制御器として,並列分散的補償 (PDC) の考え方 [10] を用いた次のような制御器を考える.

$$\mathbf{u}_{i}(t) = -\sum_{q_{i}=1}^{Q_{i}} \sum_{k=1}^{r_{i}} v_{iq_{i}}(\mathbf{x}_{i}(t)) h_{iq_{i}k}(\mathbf{x}_{i}(t)) \times \tilde{\mathbf{F}}_{iq_{i}k} \mathbf{E}_{iq_{i}} \hat{\mathbf{E}}_{i} \mathbf{x}_{i}(t)$$

$$(11)$$

ここで, $ilde{F}_{iq_ik}\in R^{m_i imes 2n_i}$  はフィードバックゲイン, $E_{iq_i}\in R^{2n_i imes 2n_i}$  は (12) 式 (次ページ上段) に示す既知の正則行列, $\hat{E}_i=[I_{n_i}\;\mathbf{0}_{n_i}]^T\in R^{2n_i imes n_i}$  である.

**Theorem 1** [9] (13), (14), (15) 式を満足する正定対称行列  $X_i \in R^{2n_i \times 2n_i}$  と  $M_{iq_ik} \in R^{m_i \times 2n_i}$  が存在するならば,スイッチングファジィモデル (10) はスイッチングファジィ制御器 (11) によって漸近安定化することができる.

$$X_{i} > 0,$$

$$E_{iq_{i}}\tilde{A}_{iq_{i}k}E_{iq_{i}}^{-1}X_{i} + (E_{iq_{i}}\tilde{A}_{iq_{i}k}E_{iq_{i}}^{-1}X_{i})^{T}$$

$$-E_{iq_{i}}\tilde{B}_{iq_{i}k}M_{iq_{i}l} - (E_{iq_{i}}\tilde{B}_{iq_{i}k}M_{iq_{i}l})^{T} < 0,$$

$$\forall i, q_{i},$$

$$E_{iq_{i}}\tilde{A}_{iq_{i}k}E_{iq_{i}}^{-1}X_{i} + (E_{iq_{i}}\tilde{A}_{iq_{i}k}E_{iq_{i}}^{-1}X_{i})^{T}$$

$$E_{iq_{i}}\tilde{A}_{iq_{i}l}E_{iq_{i}}^{-1}X_{i} + (E_{iq_{i}}\tilde{A}_{iq_{i}k}E_{iq_{i}}^{-1}X_{i})^{T}$$

$$-E_{iq_{i}}\tilde{B}_{iq_{i}k}M_{iq_{i}l} - (E_{iq_{i}}\tilde{B}_{iq_{i}k}M_{iq_{i}l})^{T}$$

$$-E_{iq_{i}}\tilde{B}_{iq_{i}l}M_{iq_{i}k} - (E_{iq_{i}}\tilde{B}_{iq_{i}l}M_{iq_{i}k})^{T} < 0,$$

$$\forall i, q_{i}, k < l,$$

$$\forall i, q_{i}, k < l,$$

ここで ,  $ilde{oldsymbol{F}}_{iq_ik} = oldsymbol{M}_{iq_ik} oldsymbol{X}_i^{-1}$  ,

$$ilde{m{A}}_{iq_ik} = \left[ egin{array}{cc} m{A}_{iq_ik} & m{0} \ m{0} & -lpha m{I}_{n_i} \end{array} 
ight], \; ilde{m{B}}_{iq_ik} = \left[ egin{array}{cc} m{B}_{iq_ik} \ m{0} \end{array} 
ight],$$

 $\alpha$  は任意の正の定数である。

Remark 1 スイッチングファジィモデルは,動的可変構造システムと同様に状態変数によって領域を切り替える.しかし,スイッチングファジィモデルでは自由度の変化を直接扱えないため,新たに動的可変構造システムを考える必要がある.

#### 3.2 保存条件を考慮した制御器設計

例 1 で示したように , サブシステムを安定化できる制御器であっても , 動的可変構造システムを安定化できるとは限らない . 本章では , 保存条件 (9) に基づき , 動的可変構造システムを安定化できる制御器の設計条件を導出する . (9) 式はスイッチングファジィモデルを用いて次のように記述することができる .

$$\boldsymbol{x}_{j}(t) = \sum_{q_{i}=1}^{Q_{i}} \sum_{k=1}^{\rho_{i}} v_{iq_{i}}(\boldsymbol{x}_{i}(t)) \phi_{iq_{i}k}(\boldsymbol{x}_{i}(t)) \boldsymbol{G}_{ijq_{i}k} \boldsymbol{x}_{i}(t)$$
(16)

ここで, $\phi_{iq_ik}(\boldsymbol{x}_i(t))$  はメンバシップ関数, $\rho_i$  はファジィモデルの規則数, $G_{ijq_ik}\in R^{n_j\times n_i}$ である.また,サブシステ

ム  $S_{i}$ ,  $S_{j}$  のリアプノフ関数の候補としてそれぞれ,次のようなスイッチング関数を考える.

$$V_{i}(\boldsymbol{x}_{i}(t)) = \sum_{q_{i}=1}^{Q_{i}} v_{iq_{i}}(\boldsymbol{x}_{i}(t)) \boldsymbol{x}_{i}^{T}(t)$$

$$\times \hat{\boldsymbol{E}}_{i}^{T} \boldsymbol{E}_{iq_{i}}^{T} \boldsymbol{P}_{i} \boldsymbol{E}_{iq_{i}} \hat{\boldsymbol{E}}_{i} \boldsymbol{x}_{i}(t) \qquad (17)$$

$$V_{j}(\boldsymbol{x}_{j}(t)) = \sum_{q_{j}=1}^{Q_{j}} v_{jq_{j}}(\boldsymbol{x}_{j}(t)) \boldsymbol{x}_{j}(t)^{T}$$

$$\times \hat{\boldsymbol{E}}_{i}^{T} \boldsymbol{E}_{jq_{i}}^{T} \boldsymbol{P}_{j} \boldsymbol{E}_{jq_{i}} \hat{\boldsymbol{E}}_{i} \boldsymbol{x}_{j}(t) \qquad (18)$$

サブシステム  $S_i$  から  $S_j$  への切り替え時に (19) 式のように リアプノフ関数が減少していけば , 最終的にシステムは安定 となる .

$$V_i(\boldsymbol{x}_i(t)) \ge V_i(\boldsymbol{x}_i(t)) \tag{19}$$

Theorem 2 (20)-(22) 式を満たす  $X_i = P_i^{-1}$ ,  $X_j = P_j^{-1}$ は, (19) 式を満たす.

$$X_i > 0,$$
 (20)  
 $X_j > 0,$  (21)  

$$\begin{bmatrix} X_i & (E_{igi} \tilde{G}_{ijgik} E_{ig}^{-1} X_i)^T \end{bmatrix} > 0$$
 (22)

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{i} & \left(\boldsymbol{E}_{jq_{j}}\tilde{\boldsymbol{G}}_{ijq_{i}k}\boldsymbol{E}_{iq_{i}}^{-1}\boldsymbol{X}_{i}\right)^{T} \\ \boldsymbol{E}_{jq_{j}}\tilde{\boldsymbol{G}}_{ijq_{i}k}\boldsymbol{E}_{iq_{i}}^{-1}\boldsymbol{X}_{i} & \boldsymbol{X}_{j} \end{bmatrix} \geq \boldsymbol{0}, (22)$$

ここで ,

$$ilde{m{G}}_{ijq_ik} = \left[egin{array}{ccc} m{G}_{ijq_ik} & m{0}_{n_j imes n_i} \ m{0}_{n_j imes n_i} & m{0}_{n_j imes n_i} \end{array}
ight]$$

(証明略)

**Theorem 3** (20)–(22) 式および (14), (15) 式を満たす  $\boldsymbol{X}_i$ ,  $\boldsymbol{M}_{iq,k}$  が存在するなら,動的可変構造システム (7) はスイッチングファジィ制御器 (11) によって漸近安定化できる. (証明略)

[例 2] 例 1 と同様の動的可変構造システムに対して,Theorem 3 を用いて制御器を設計した.リアプノフ関数 (17), (18) 式を構成する正定対称行列と制御器 (11) を構成するフィードバックゲインを以下に示す.

$$\hat{\boldsymbol{E}}_{1}^{T} \boldsymbol{E}_{1}^{T} \boldsymbol{P}_{1} \boldsymbol{E}_{1}^{T} \hat{\boldsymbol{E}}_{1}^{T} = \begin{bmatrix} 0.103 & 0 \\ 0 & 2.949 \end{bmatrix} \times 10^{-6}$$

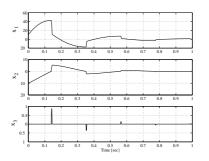


図 2: 切り替えを考慮した制御結果

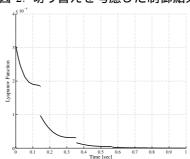


図 3: リアプノフ関数

$$\hat{\boldsymbol{E}}_{2}^{T} \boldsymbol{E}_{2}^{T} \boldsymbol{P}_{2} \boldsymbol{E}_{2}^{T} \hat{\boldsymbol{E}}_{2}^{T} = \begin{bmatrix}
0.103 & 0 & 0 \\
0 & 5.926 & 0.544 \\
0 & 0.544 & 0.172
\end{bmatrix} \times 10^{-6}$$

$$\tilde{\boldsymbol{F}}_{1} \boldsymbol{E}_{1} \tilde{\boldsymbol{E}}_{1} = \begin{bmatrix}
-1.433 & 3.362
\end{bmatrix}$$

$$\tilde{\boldsymbol{F}}_{2} \boldsymbol{E}_{2} \tilde{\boldsymbol{E}}_{2} = \begin{bmatrix}
1.267 & -2.515 & -0.441 \\
0.301 & 175.405 & 18.164
\end{bmatrix}$$

図 2,3 にシミュレーション結果を示す.切り替えの影響を考慮した制御器では,動的可変構造システムを安定化できている.また,リアプノフ関数は不連続ながら単調減少しており (19) 式を満たしている.

### 3.3 切り替え条件を考慮した保存条件の実現

Theorem 2 を満たす  $P_i$  は,切り替え条件 (8) に関係なく,サブシステムがいつ切り替わっても (19) 式を満たす.しかし,本来,(19) 式は切り替え条件 (8) を満たす点でのみ成立すれば良い.本章では切り替え条件 (8) を考慮した保存条件と制御器設計条件を導出する.(8) 式はスイッチングファジィモデルを用いて次のように記述することができる.

$$0 = \boldsymbol{C}_i \dot{\boldsymbol{x}}_i(t) + \xi_{ij}(\boldsymbol{x}_i(t))$$

$$= \sum_{q_{i}=1}^{Q_{i}} \sum_{k=1}^{r_{i}} v_{iq_{i}}(\boldsymbol{x}_{i}(t)) h_{iq_{i}k}(\boldsymbol{x}_{i}(t))$$

$$\times \boldsymbol{C}_{i} \left(\boldsymbol{A}_{iq_{i}k} \boldsymbol{x}_{i}(t) + \boldsymbol{B}_{iq_{i}k} \boldsymbol{u}_{i}(t)\right)$$

$$+ \sum_{q_{i}=1}^{Q_{i}} \sum_{k=1}^{\lambda_{i}} v_{iq_{i}}(\boldsymbol{x}_{i}(t)) w_{iq_{i}k}(\boldsymbol{x}_{i}(t)) \boldsymbol{\Xi}_{ijq_{i}k} \boldsymbol{x}_{i}(t)$$

$$= \sum_{q_{i}=1}^{Q_{i}} \sum_{k=1}^{r_{i}} \sum_{l=1}^{r_{i}} v_{iq_{i}}(\boldsymbol{x}_{i}(t)) h_{iq_{i}k}(\boldsymbol{x}_{i}(t)) h_{iq_{i}l}(\boldsymbol{x}_{i}(t))$$

$$\times \boldsymbol{C}_{i} \left(\boldsymbol{A}_{iq_{i}k} - \boldsymbol{B}_{iq_{i}k} \tilde{\boldsymbol{F}}_{iq_{i}l} \boldsymbol{E}_{iq_{i}} \hat{\boldsymbol{E}}_{i}\right) \boldsymbol{x}_{i}(t)$$

$$+ \sum_{q_{i}=1}^{Q_{i}} \sum_{k=1}^{\lambda_{i}} v_{iq_{i}}(\boldsymbol{x}_{i}(t)) w_{iq_{i}k}(\boldsymbol{x}_{i}(t)) \boldsymbol{\Xi}_{ijq_{i}k} \boldsymbol{x}_{i}(t)$$

$$(23)$$

ここで, $w_{iq_ik}(x_i(t))$  はメンバシップ関数, $\lambda_i$  はファジィモデルの規則数, $\Xi_{ijq_ik}\in R^{1\times n_i}$  である.また,次のようなスイッチング関数を考える.

$$y_i(\boldsymbol{x}_i(t)) = \sum_{q_i=1}^{Q_i} v_{iq_i}(\boldsymbol{x}_i(t)) \boldsymbol{Y}_{iq_i} \boldsymbol{E}_{iq_i} \hat{\boldsymbol{E}}_i \boldsymbol{x}_i(t)$$
(24)

ここで, $m{Y}_{iq_i}\in R^{1 imes2n_i}$ である.切り替え面上の点 $m{x}_i(t)\in\chi_i$ ( $\chi_i=\{m{x}_i(t)|m{C}_i\dot{m{x}}_i(t)+\xi_{ij}(m{x}_i(t))=0\}$ )において,次式が成り立つ.

$$y_i^T(\boldsymbol{x}_i(t)) \left( \boldsymbol{C}_i \dot{\boldsymbol{x}}_i(t) + \xi_{ij}(\boldsymbol{x}_i(t)) \right) + \left( \boldsymbol{C}_i \dot{\boldsymbol{x}}_i(t) + \xi_{ij}(\boldsymbol{x}_i(t)) \right)^T y_i(\boldsymbol{x}_i(t)) = 0$$
(25)

サブシステム  $S_i$  から  $S_j$  への切り替え時にはリアプノフ関数は,

$$V_{i}(\boldsymbol{x}_{i}(t)) - V_{j}(\boldsymbol{x}_{j}(t))$$

$$+ y_{i}^{T}(\boldsymbol{x}_{i}(t)) \left(\boldsymbol{C}_{i}\dot{\boldsymbol{x}}_{i}(t) + \xi_{ij}(\boldsymbol{x}_{i}(t))\right)$$

$$+ \left(\boldsymbol{C}_{i}\dot{\boldsymbol{x}}_{i}(t) + \xi_{ij}(\boldsymbol{x}_{i}(t))\right)^{T} y_{i}(\boldsymbol{x}_{i}(t)) \geq 0$$
(26)

であれば良い

Theorem 4 (27)–(29) 式を満たす  $m{X}_i = m{P}_i^{-1}, \ m{X}_j = m{P}_j^{-1}, \ m{Z}_{iq_i}$  が存在するなら, $m{x}_i(t) \in \chi_i$  において (26) 式を満たす.

$$\boldsymbol{X}_i > \boldsymbol{0}, \tag{27}$$

$$\boldsymbol{X}_j > \boldsymbol{0}, \tag{28}$$

$$\begin{bmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{X}_{i} \\ +\boldsymbol{Z}_{iq_{i}}^{T} \tilde{\boldsymbol{\Xi}}_{ijq_{i}k} \boldsymbol{E}_{iq_{i}}^{-1} \boldsymbol{X}_{i} \\ +(\boldsymbol{Z}_{iq_{i}}^{T} \tilde{\boldsymbol{\Xi}}_{ijq_{i}k} \boldsymbol{E}_{iq_{i}}^{-1} \boldsymbol{X}_{i})^{T} \\ +\boldsymbol{Z}_{iq_{i}}^{T} \tilde{\boldsymbol{A}}_{iq_{i}k} \boldsymbol{E}_{iq_{i}}^{-1} \boldsymbol{X}_{i} \end{pmatrix} & * \\ +(\boldsymbol{Z}_{iq_{i}}^{T} \tilde{\boldsymbol{A}}_{iq_{i}k} \boldsymbol{E}_{iq_{i}}^{-1} \boldsymbol{X}_{i})^{T} \\ +(\boldsymbol{Z}_{iq_{i}}^{T} \tilde{\boldsymbol{A}}_{iq_{i}k} \boldsymbol{E}_{iq_{i}}^{-1} \boldsymbol{X}_{i})^{T} \\ -\boldsymbol{Z}_{iq_{i}}^{T} \tilde{\boldsymbol{B}}_{iq_{i}k} \boldsymbol{M}_{iq_{i}k} \\ -(\boldsymbol{Z}_{iq_{i}}^{T} \tilde{\boldsymbol{B}}_{iq_{i}k} \boldsymbol{M}_{iq_{i}k})^{T} \end{pmatrix} & \geq \mathbf{0}, \quad (29)$$

$$\boldsymbol{E}_{jq_{j}} \tilde{\boldsymbol{G}}_{ijq_{i}k} \boldsymbol{E}_{iq_{i}}^{-1} \boldsymbol{X}_{i} \qquad \boldsymbol{X}_{j}$$

$$\forall i, j, q_{i}, q_{j}, k,$$

ここで, $oldsymbol{Y}_{iq_i} = oldsymbol{Z}_{iq_i} * oldsymbol{P}_i$ 

$$\begin{split} \tilde{\boldsymbol{\Xi}}_{ijq_ik} &= \left[\boldsymbol{\Xi}_{ijq_ik} \ \boldsymbol{0}_{1\times n_i}\right] \\ \tilde{\boldsymbol{\mathcal{A}}}_{iq_ik} &= \left[ \begin{array}{cc} \boldsymbol{C}_i \boldsymbol{A}_{iq_ik} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & -\alpha \boldsymbol{I}_{n_i} \end{array} \right], \ \tilde{\boldsymbol{\mathcal{B}}}_{iq_ik} &= \left[ \begin{array}{cc} \boldsymbol{C}_i \boldsymbol{B}_{iq_ik} \\ \boldsymbol{0} \end{array} \right] \end{split}$$

また,\*は対角要素の転置を表す.

**Theorem 5** (27)–(29) 式および (14), (15) 式を満たす  $\boldsymbol{X}_i$ ,  $\boldsymbol{M}_{iq,k}$  が存在するなら,動的可変構造システム (7) はスイッチングファジィ制御器 (11) によって漸近安定化できる. (証明略)

Remark 2 残念ながら (29) 式は LMI(線形行列不等式)ではなく,BMI(双線形行列不等式)である.よって,制御器設計には何らかの BMI 解法を利用する必要がある.

### 4 まとめ

本研究では,自由度が異なるシステムを運動中に切り替える動的可変構造システムを提案した.それぞれのサプシステムだけの安定性では系全体の安定性を保証できないことを示し,サプシステムの切り替わりやそのときの状態変数の変化,エネルギの変化を考慮した系全体の安定性を保証する制御器の設計条件を導出した.

人間の肘関節は曲げているときを2リンクモデル,伸ばしているときを1リンクモデルとして動的可変構造システムとして記述できる.現在,このような角度に限界値を持つ2リンクマニピュレータの安定化制御を試みている.

#### 謝辞

本研究の一部は,日本学術振興会科学研究費補助金 基盤研究(C)(課題番号 15560217) の支援により行いました.ここに感謝の意を表します.

#### 参考文献

- [1] 山本,増渕: ハイブリッドダイナミカルシステムの安定解析,システム/制御/情報 Vol 46 No 3 pp 120-128 2002
- システム/制御/情報 Vol.46, No.3, pp.120-128, 2002 [2] 潮:ハイブリッドシステムのモデル,システム/制御/情報 Vol. 41, No.1, pp. 35-40, 1997
- [3] D. Liberzon and S. Morse: Basic Problems in stability and design of swiched systems, IEEE Control Systems Magazine, Vol. 19, No. 5, pp. 59-70, 1999
- [4] K. H. Johansson and A. Rantzer: Computation of piecewise quadratic Lyapunov function for hybrid systems, IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 43, No.4, pp. 555-559, 1998
- [5] 新家: ハイブリッドシステムの経緯について、計測と制御、第 38 巻、第 3 号、pp. 155-160、1999
- [6] H. Ohtake et. al., "Fuzzy Modeling via Sector Nonlinearity Concept," Proceeding of Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, pp.127-132, Vancouver, 2001.
- [7] H. Ohtake et. al., "A Construction Method of Switching Lyapunov Function for Nonlinear Systems," Proceeding of 2002 FUZZ-IEEE, pp.221-226, Hawaii, 2002.
  [8] H. Ohtake et. al., "Switching Fuzzy Control for Nonlin-
- [8] H. Ohtake et. al., "Switching Fuzzy Control for Nonlinear Systems," Proceeding of the 2003 IEEE International Symposium on Intelligent Control, pp.281-286, Houston, 2003.
- [9] 大竹 博, 田中 一男, "スイッチングファジィ制御器設計のため の LMI 条件の導出," 第 *13* 回インテリジェントシステムシンポジウム, pp. 40-44, 函館, 2003.
- [10] K. Tanaka, and M. Sugeno, "Stability Analysis and Design of Fuzzy Control System," FUZZY SETS AND SYSTEM, vol.45, no.2, pp.135-156, 1992.
- [11] K. Tanaka and H. O. Wang, Fuzzy Control Systems Design and Analysis, JOHN WILEY & SONS, INC., 2000.
- [12] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol.15, pp.116-132, 1985.

### 問い合わせ先

〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1 電気通信大学 知能機械工学科 田中研究室 大竹 博

Tel: 0424-43-5431

E-mail: hohtake@rc.mce.uec.ac.jp

# ファジィ目標の強化学習による獲得と 非ホロノミック移動体の移動制御への応用

Acquisition of Fuzzy Target by Reinforcement Learning and Its Application to Nonholonomic Vehicle Control

松原 智也

Tomoya Matsubara 筑波大学 理工学研究科

Master's Program in Science and

安信 誠二

Seiji Yasunobu 筑波大学 機能工学系

Institute of Engineering Mechanics Engineering, University of Tsukuba and Systems, University of Tsukuba

Abstruct: A "fuzzy target" is a control target value defined by "fuzzy set". In this paper, it is acquired by a reinforcement learning, which is a kind of machine learning. The membership value of fuzzy target is an evaluation value of target elements obtained by the reinforcement learning. By using this fuzzy target, a control system is constructed which is able to correspond to changes in the environment flexibly. It was applied to a driving control of the nonholonomic vehicle under the change of the situation. Simulation results show the effectiveness of this fuzzy target.

#### **1.** はじめに

人間は,様々な状況での経験を通して知識を獲得し, これを柔軟に利用することによって、状況が変化した場 合でも適切に行動を決定している. このような過程で人 間が行っている思考や行動、および人間が取り扱う知識 などの情報は、状況に対して唯一のものではなく、あい まいさを含んでいる.

このような, あいまいさを含む情報を扱う方法とし て,ファジィ理論がある.ファジィ理論は,自然言語処 理, 意思決定などの, あいまいさを含む情報の処理が本 質的な、複雑な問題に応用することができる[1].

我々はこのファジィ理論を用いて、熟練者が持つ知識 や経験をメンバーシップ関数に記述し、制御に応用し ている[2]. しかし、知識や経験だけではなく制御を行 う際の目標値も、現実世界においては、度合いを持った 集合、すなわちファジィ集合であると考えることができ る. ここでは、この制御目標値のファジィ集合を「ファ ジィ目標」[3] と呼ぶ.

本論文では、このファジィ目標を、機械学習の一種で ある「強化学習」により試行錯誤的に獲得し、学習の過 程で得られる各目標要素に対する報酬(タスク達成に関 する成功の度合い)を、ファジィ目標のメンバーシップ 値とする. 獲得したファジィ目標を, 非ホロノミックな 移動体である、四輪車の移動制御に応用し、新たな制約 の付加によって環境の変化した場合でも, 柔軟な対応が 可能な知的制御システムを構築する. このファジィ目標 を用いた知的制御システムの有効性を, 実際の車両を模 擬したシミュレーションによって評価する.

#### 2. ファジィ目標の概要

「ファジィ目標」は、度合いを持った複数の目標値を、 ファジィ集合として扱ったものである(図1). ここでは, 学習の際に獲得した各目標要素に対する報酬を,ファ ジィ目標 "Target is Good" のメンバーシップ値とする.

制御を行う際にファジィ目標を用いる利点として,「目 標の代替案」を含んでいる点がある. ファジィ目標は目 標値となる複数の要素を含んでいる. そのため、新たに 制約が加わった場合でも,適用可能な代替案を用いるこ とで、制御目標を設定し、最適なタスク達成が可能で ある.

本論文では、四輪車の移動制御において、障害物の無 い、十分に広い環境下で獲得したファジィ目標を、障害 物を配置し、制約が付加されることによって環境が変化 した状態で利用する. そして, 適用可能な代替案を用い て,環境の変化に柔軟に対応する.

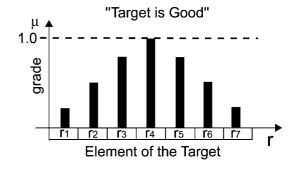


Fig. 1: The Fuzzy Target

### 3. ファジィ目標に基づいた知的制御システム

四輪自動車は、2入力 (ハンドルと速度の操作)で、3 出力 (位置 (x, y) と車体の向き) を制御する、非ホロノミックな移動体である。そのため、現在状態から最終目標へ車両を移動させるためには、自車および周囲の状況に応じて、適切に途中経由地点 (サブゴール) を設定し、移動制御を行う必要がある。

本章では、四輪車の特性について触れた後、強化学習によるファジィ目標の獲得法と、ファジィ目標に基づいた制御システムについて述べる.

#### 3.1. 四輪車の特性

前輪操舵の四輪自動車において、十分速度が遅いとき、タイヤの滑りや遠心力の発生を無視することができる。その際、四輪自動車は、図2に示すような幾何学的な動きをする。左右前輪の角度 ( $\phi_L$ , $\phi_R$ ) は、四輪全てが旋回中心と直角に旋回半径 R で動くように、Ackerman-Jeantaudの操舵機構により構成されている。

この自動車の動きは、次に示す拘束条件式によって記述できる:

$$\begin{split} \frac{dx}{dt} &= v\cos\phi\cos\theta,\\ \frac{dy}{dt} &= v\cos\phi\sin\theta,\\ \frac{d\theta}{dt} &= \frac{v}{L}\sin\phi \end{split}$$

ここで、x,y は自動車の位置、 $\theta$  は x 軸と自動車の進行 方向のなす角、v は車の速度、 $\phi$  は旋回半径 R での動き を指令するハンドルの切れ角、L は車のホイールベース の長さである.

四輪自動車は上記のような特性を持つので、現在状態  $(x_0,y_0,\theta_0)$  から、任意の状態  $(x,y,\theta)$  への移動は不可能である。例えば、車両を真横に移動させるためには、切返し地点を設定する必要がある。このような理由で、現在状態から最終目標  $(x_G,y_G,\theta_G)$  へ車両を移動さ

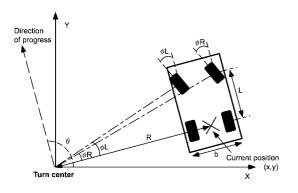


Fig. 2: Kinematics constraint in nonholonomic vehicle

せるためには、自車両および周囲の状況に応じた、適切なサブゴールを設定し、これに基づいて移動制御を行う必要がある.

#### 3.2. ファジィ目標の獲得

サブゴールを適切に設定する際に必要な「目標設定知識」を、機械学習の一種である「強化学習」(Reinforcement learning) [4] によって獲得する。この学習法は、人間や動物が試行錯誤的に成功を学習する仕組みを模倣している。ある行動を選択したことによって、成功した場合には報酬が、失敗した場合には罰が与えられる。これを繰り返すことにより、タスクを達成するために必要な知識を獲得する。本研究では、強化学習を、その状況における制御指令の獲得のために使用するのではなく、サブゴールを設定する際に必要な知識を獲得するために使用する。

PSP (Profit Sharing Plan)-learning [5] は、強化学習の手法の一つとして提案されている。この学習法は、図3のように、初期状態から最終目標に至る、一つのエピソードにおいて、何段階かの行動の後の成功報酬を各段階にさかのぼって分配する。PSP-learning は離散的な状態遷移に対して適用されている場合が多いが、ここでは、連続値の状態の制御である車の運転に適用し、その報酬に個々の目標達成度をファジィ評価によって行う、fPSP (fuzzy Profit Sharing Plan)-learning [6] を用いる。fPSP-learning によって得られる知識は、"IF <condition: $c_n$ >THEN<action: $a_n$ >"なる形式の、状態と行動のペアと、その評価値からなる規則(S-table)である。

目標設定を獲得するためには、各状態  $c_n$  において、目標  $a_n$  をルーレット選択することで、未知の経験を試みる。実行した結果の報酬は、選択されたすべての S-table 値に分配される。最終目標に達することができた場合、報酬は制限時間と所要時間の差で与える。例えば、制限

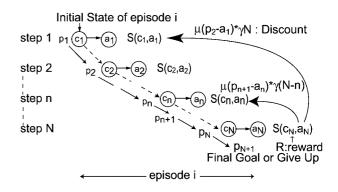


Fig. 3: PSP-learning deitributes reward of penalty to the previous fired rules

時間を250秒とし、最終的な目標に80秒で達したならば、出発地点で用いた知識に対する報酬は170に、経由した目標地点の数で割り引いた値である。制限時間内に到達できない時や、障害物などで動きが取れない状況に陥った場合、罰を与え、用いた目標地点に対する評価を下げる。

学習後,得られた評価値をメンバーシップ値としたファジィ集合で,ファジィ目標を作成する.

#### 3.3. 制御システムの概要

獲得したファジィ目標に基づいて四輪車の移動制御を 行う,階層型知的制御システムの概要を図4に示す.

このシステムは、状況監視部、ファジィ目標設定部、 自動運転部の3階層から成る.

状況監視部は、障害物への接触、最終目標およびサブゴールへの到達について評価し、新しい目標の必要性を判断する。何らかの理由で現在のサブゴールへの到達が困難となった場合は、現在のサブゴールをリセットし、ファジィ目標設定部に対し目標設定指令を出力する。

目標設定指令を受け、ファジィ目標設定部は、強化学習によって得られた S-table から、ファジィ目標を設定する

自動運転部では、ファジィ目標を用いて制御指令を算出する。その算出過程を図5に示す。ファジィ目標では、個々の要素をサブゴールとして仮定し、図6に示すカスケードファジィ制御器[6]によって操作指令候補を算出する。算出された操作指令候補を用いて車両を仮想的に動かし、車両の将来状態を予見する。予見した将来状態と、サブゴールの評価値(メンバーシップ値)、サブゴールとの距離偏差、角度偏差、および障害物との距離を、

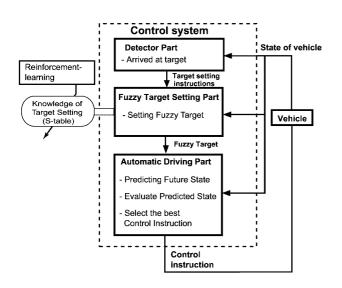


Fig. 4: Outline of the control system

総合的にファジィ評価し、操作指令候補の評価値を求める.これを、ファジィ目標の全ての要素に対して行い、最も評価値の高かった操作指令候補を選択し、これを制御指令として実車両に与える.

### 4. コンピュータシミュレーションによる評価

構築した知的制御システムの有効性を、実際の車両を想定したコンピュータシミュレーションにより検証する. 今回は、初期位置  $(18m, 10m, 0.0\pi)$  から最終目標まで移動させる.

障害物の無い広い領域において、fPSP-learning を用いて、初期位置  $(18m, 10m, 0.0\pi)$  において獲得したファジイ目標のうち、評価値が 200 以上のものを次に示す.

Target position	Membersip value
$(2m, 10m, 0.0\pi)$	0.301
$(12m, 6m, 0.0\pi)$	0.367
$(20m, 20m, 0.25\pi)$	0.999

要素  $(20m, 20m, 0.25\pi)$  に対するメンバーシップ値が 0.999 と最も高く、この要素、すなわち最終目標を目標 値とすることが、タスク達成に関し、最も価値があることを表している.

獲得したファジィ目標に基づいて、障害物が無い場合 (Case(i))、初期位置の前方に障害物を配置した場合 (Case(ii)) を想定し、シミュレーションを行った。その結果を図 7 に示す。

障害物が無い場合 (Case(i)), 最終目標を目指し, 到達することができた. 最終目標到達までの経過時間は27秒であった.

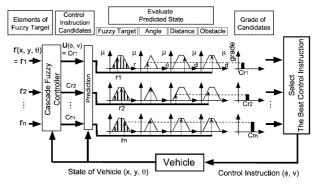


Fig. 5: Control system based on Fuzzy Target

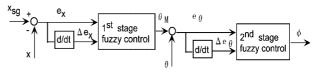
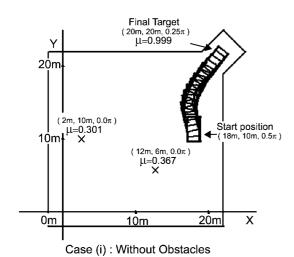


Fig. 6: Cascade fuzzy controller

障害物を初期位置の前方に配置した場合 (Case(ii)), 前方に移動することができず、また、四輪車の非ホロノミックな特性により、真横に平行移動して障害物を回避することもできない。そのため、獲得したファジィ目標の中から、要素  $(12m,6m,0.0\pi)$  をサブゴールとして選択し、後退で向かうよう制御指令を算出した。サブゴール  $(12m,6m,0.0\pi)$  に向けて後退したところ、 $(12m,6m,0.0\pi)$  付近において、次のサブゴール  $(6m,2m,0.0\pi)(\mu=0.548)$  を選択し、この位置に向かうことで、障害物を避け、最終目標  $(20m,20m,0.25\pi)$  へ直接移動可能な状態となった。目標を最終目標  $(20m,20m,0.25\pi)$  とし、切返しを行うことによって、最終目標に到達した。最終目標到達までの経過時間は 100 秒であった。

このように、過去に獲得したファジィ目標に基づいて 車両の移動制御を行うことで、障害物の配置によって変 化した環境に、メンバーシップ値は低いが適用可能な代 替案を用いることで適応し、最終目標に到達することが



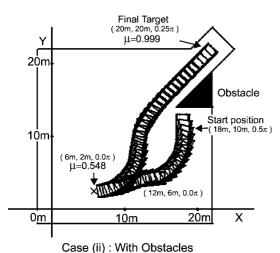


Fig. 7: The trajectory from  $(18\mathrm{m,}10\mathrm{m,}0.5\pi)$  to  $(20\mathrm{m,}20\mathrm{m,}0.25\pi)$ 

できた.これにより、ファジィ目標の有効性を、シミュレーションによって確認した.

#### **5**. おわりに

本論文では、制御を行う際の目標値をファジィ集合で 捉えた「ファジィ目標」を、機械学習の一種である「強 化学習」を用いて獲得し、非ホロノミックな移動体であ る、四輪車の移動制御システムに応用した。その結果、 ファジィ目標を用いることで、新たに制約が付加された ことによって環境の変化した場合でも、過去に獲得した 知識を活用し、車両の移動を行うことができた。これ により、ファジィ目標の有効性を、シミュレーションに よって確認した。

### 参考文献

- [1] L. A. Zadeh: "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-3, No. 1, pp. 28-44, 1973.
- [2] S. Yasunobu and S. Miyamoto: "Automatic train operation by predictive fuzzy control, Industrial Application of Fuzzy Control (M. Sugeno, Ed.)," North Holland, pp. 1-18, 1985.
- [3] S. Yasunobu and T. Matsubara: "Fuzzy Target Acquired by Reinforcement Learning for Parking Control," Proc. of SICE Annual Conference 2003 in Fukui (SICE2003), pp.1303-1308, 2003.
- [4] Richard S. Sutton and Andrew G. Barto: REIN-FORCEMENT LEARNING: An Introduction, A Bradford Book, 1998.
- [5] T. Horiuchi, A. Fujino, O. Katai and T. Sawaragi: "Q-PSP learning: An Exploration-Oriented Q learning and Its Applications:," The Society of Instument and Control Engineers, Vol. 35, No. 5, pp. 645-653, 1999.
- [6] S. Yasunobu: "Fuzzy-Reinforcment-learning Design of Intelligent Controller for Nonholonomic Vehicle:" Proc. of The 12<sup>th</sup> FAN Intelligent Systems Symposium, pp. 105-108, 2002.

#### 連絡先

 $\overline{\top}\ 305\text{-}8573$ 

茨城県つくば市天王台 1-1-1 筑波大学機能工学系 知的制御システム研究室

松原 智也

電話: 029-853-6186

E-mail: tomoya\_m@edu.esys.tsukuba.ac.jp

# マルチ全方位ビジョン MOVIS を用いた動的環境下における 自律移動ロボットの階層型ファジィ行動制御

Multi-Layered Fuzzy Behavior Control for Autonomous Mobile Robot in Dynamic Environment with Multiple Omnidirectional Vision System

清水平 渉 Wataru Shimizuhira 藤井 恭子

前田 陽一郎

Kyoko Fujii

Yoichiro Maeda

### 福井大学

University of Fukui

Abstract — In this research, we have already developed a Multiple Omnidirectional VIsion System (MOVIS) with three omnidirectional cameras and its calculation method for the measurement of the object position and the self-localization in an autonomous mobile robot. Furthermore, we propose the omnidirectional behavior control method for the obstacle avoidance and object chasing motion by using the multi-layered fuzzy reasoning in an autonomous mobile robot with MOVIS. In this paper, we also report some experimental results to confirm the efficiency of our proposed method by using a soccer robot in dynamic environment.

#### 1. 緒言

近年、自律移動ロボットの研究テーマとしてRoboCupが注目されている。RoboCupにおけるロボットの行動制御の研究の例としては、吉田ら[1]によるファジィポテンシャル法を用いた行動制御、浅田ら[2]による強化学習を用いたマルチエージェント環境下での協調行動の獲得やチーム戦略学習などがあげられる。一般に、自律移動ロボットに全方位に対して適応的な行動を実現することは容易ではない。また、ファジィ制御を用いて複雑な環境における適応的な行動を一括して記述しようとするとルール数が非常に多くなり、ファジィルールのチューニングに多大な時間を要する。

我々の研究室では、昨年 3 台の全方位カメラを用いた全方位物体位置計測システムとして、MOVIS(Multiple Omnidirectional VIsion System)を提案している [3][4]。本研究ではこの MOVIS を用いて口ボットにおける複雑な行動をいくつかのタスクにわけた個々のファジィルール (下位層)を作成し、それらのルールを重み付けする行動選択のファジィルール (上位層)によって複雑な行動を統合する階層型ファジィ制御を提案する。ここでは MOVIS を搭載した RoboCup中型ロボットリーグ規格のサッカーロボット (図 1 参照)を対象とし、全周の環境情報を用いたサッカープレーの行動制御の実現を行う。また、提案した手法の有効性を検証したので、その実験結果についても報告する。



図 1 MOVIS を搭載した自律移動ロボット

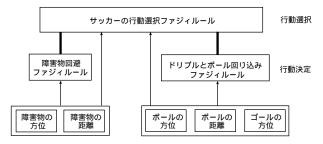


図2 サッカーロボットにおける階層型ファジィ行動制御

#### 2. 階層型ファジィ制御

一般に、複雑な環境下におけるロボットの適応行動はいくつかのサブタスクに分解できることが多い。そこで、本研究では下位層に適応行動のファジィルールを、上位層に行動を統合するファジィルールを用いた階層型ファジィ制御を提案する。まず、ロボットの適応的な行動をいくつかのサブタスクに分け、個々の行動決定ファジィルール(下位層)を作成する。次に、下位のファジィルールに対して重み付けを行う行動選択ファジィルールによる出力を上位のファジィルールを用いて統合することにより、自律移動ロボットの行動制御を行う。本手法を用いてファジィ推論を階層化することによりファジィルールを比較的容易に記述し、ロボットの複雑な行動制御を実現することができる。

本研究では RoboCup 中型ロボットリーグ環境下における自律移動ロボットを想定し、全周の環境情報を用いた障害物回避およびドリブルとボール回り込みの行動決定ファジィルールを個別に作成し、それらのルールを状況に応じて統合する行動選択ファジィルールを記述する (図 2 参照)。障害物・ボール・ゴールの距離と方位は、MOVIS により計測するものとする。

### 2.1 行動決定ファジィルール

行動決定ファジィルールにおいて、障害物回避ファジィルールには障害物の方位と距離を、ドリブルとボール回り込みファジィルールにはゴールの方位およびボールの距離と方位をそれぞれ入力として、ロボットを制

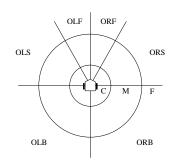
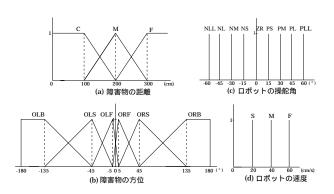


図3障害物回避における状態分割



(e) ファジィルール (表中の出力は"操舵角/速度"を示す)

方位 距離	OLB	OLS	OLF	ORF	ORS	ORB
С	PM/M	PL/M	PLL / F	NLL /F	NL/M	NM / M
M	PS/M	PM/S	PL/M	NL/M	NM/S	NS/M
F	ZR / S	PS/S	PM/M	NM/M	NS/S	ZR/S

図 4 障害物回避ファジィルール

御する操舵角と速度を出力する。各行動決定ファジィルールは簡略化ファジィ推論で記述した。

#### 2.1.1 障害物回避ファジィルール

障害物回避ファジィルールにおいては、図3のような状態分割を考えた。図4に示すようにファジィルールにおける前件部は、全方位ビジョンにより計測される全周の障害物の距離と方位で、後件部シングルトンはロボットへの指令値となる操舵角と速度を示す。

全周の情報を用いた複雑な環境下において、衝突の危険度が高いと思われるロボットの正面方向に障害物があった際の回避行動をより柔軟に行えるように、前件部において障害物までの距離を、近い(C)、中くらい(M)、遠い(F)ときの3段階とし、障害物の方位を前方に分割数を多く割り当てた6段階(OLB,OLS,OLF,ORF,ORS,ORB)に設定した。後件部シングルトンは、ロボットが柔軟な回避行動を行うために必要な出力として、操舵角を9段階(NLL,NL,NM,NS,ZR,PS,PM,PL,PLL)、速度を3段階(S,M,F)用意した。

#### 2.1.2 ドリブルとボール回り込みファジィルール

ドリブルとボール回り込みファジィルールは、ボールがゴールとロボットの間にくるようにロボット自身が回り込むルールである。この場合の状態分割を図 5 に、ファジィルールを図 6 に示す。図 6 において前件部は全方位ビジョンより計測されるボールの距離と方位およびゴールの方位で、後件部シングルトンはロボットの操舵角と速度を示す。

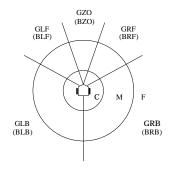


図 5 ドリブルとボール回り込みにおける状態分割

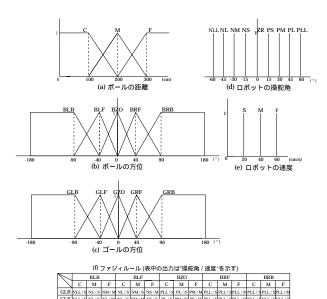


図 6 ドリブルとボール回り込みファジィルール

ドリブルとボール回り込み行動について、正面の方向にボールがあった際にはドリブルの行動を重視し、その他の状況では、ボールが近い距離にあったとしても、ボールに直接向かわず、ボール回り込みをより柔軟に行えるように、前件部においてボールまでの距離を、近い (C)、中くらい (M)、遠い (F) の 3 段階とし、ボールとゴールの方位を前方に分割数を多く割り当てた 5 段階 (BLB,BLF,BZO,BRF,BRB;OLB,OLF,OZO,ORF,ORB) に設定した。後件部シングルトンは、障害物回避と同じく、ロボットが柔軟な回り込み行動を行うための必要な出力として、操舵角を9 段階 (NLL,NL,NM,NS,ZR,PS,PM,PL,PLL)、速度を3 段階 (S,M,F) 用意した。

### 2.2 行動選択ファジィルール

行動選択ファジィルールは、前述の各行動決定ファジィルールの出力を統合するための重みを決定するファジィルールである。図 7 において前件部はボールまでの距離と障害物までの距離で、後件部シングルトンは障害物回避の重み  $\alpha$  を示す。これによって各行動決定ファジィルールの出力に対して重み付けを行い、最終的な操舵角と速度を出力する。

前件部におけるボールと障害物の距離に関しては、行動決定ファジィルールと同じく、ボールと障害物の距

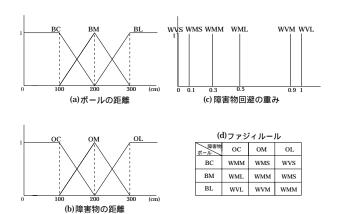


図 7 行動選択ファジィルール

離に対してそれぞれ 3 段階 (BC,BM,BL; OC,OM,OL) に設定した。また、後件部について障害物回避の重み  $\alpha$  のシングルトンを 6 段階 (WVS,WMS,WMM,WM L,WVM,WVL) 用意した。

重み  $\alpha$  の値はドリブルとボール回り込み行動を基本とし、ボールが遠くにある時は障害物が比較的近くなったときのみ、障害物回避行動を特に重視する行動をとるように出力の重みが極端に強くなる値 (WVM,WVL)を設定した。この出力値  $\alpha$  を用いてドリブルとボール回り込み行動の重みは  $(1-\alpha)$  と決定される。

#### 3. 実験

実験環境には、図 8 に示すような RoboCup 中型ロボットリーグのハーフコート  $(4m \times 5m)$  を使用し、フィールド上にボールと障害物を配置した。この環境において、自律移動ロボットに階層型ファジィ行動制御を用いて、障害物を避けながらボールをゴールに運ぶシュート行動実験を行った。また比較実験として、行動選択ファジィルールによる障害物回避の重み $\alpha$ の代わりに、以下の線形式による重みkを用いた行動実験も行った。各実験結果を図 9 および図 10 に示す。

$$k = \frac{1/L_o}{1/L_o + 1/L_b} = \frac{L_b}{L_o + L_b} \tag{1}$$

 $L_o$ : ロボットと障害物の距離  $L_b$ : ロボットとボールの距離

階層型ファジィ行動制御を用いた実験結果より、回避行動 (反発行動) と回り込み行動 (接近行動) という対照的な行動を適応的に統合できることが確認できた。しかしながら、比較実験においては適応的な行動は実現できなかった。原因として、障害物とボールの距離が等しい場合、2 つの行動の重みも等しくなるため、どちらの行動を重視するかの判断ができなかったためと考えられる。

#### 4. 結言

本研究では、ロボットにおける適応的な行動をいくつかのサブタスクに分け、それぞれの行動に対応する行動決定ファジィルール (下位層) を作成し、それらのルールを重み付けする行動選択ファジィルール (上位層) により、下位層の行動を統合する階層型ファジィ行

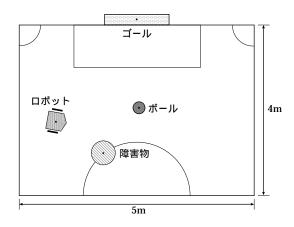


図8実験環境

動制御を提案した。また、提案した手法の有効性を検証するため、サッカーロボットを用いてシュート行動実験を行った。その結果、本手法を用いることによって、比較的容易に複雑な行動を構築できることが分かった。

今後の課題として、実際の RoboCup 中型ロボットリーグの動的環境下において、マルチエージェントロボットの協調行動や、チームプレイの為の集団戦略などの、より複雑な戦略を含む行動を実現することが挙げられる。今回提案した階層型ファジィ行動制御は、汎用的な状況適応型行動制御手法として、掃除ロボットや警備ロボットなど、さまざまな一般の自律移動ロボットへの応用も期待できると考えられる。

#### 参考文献

- [1] 津崎 亮一, 吉田 和夫: "ファジィポテンシャル法に基づく 全方位視覚を用いた自律移動ロボットの行動制御," 日本 ロボット学会誌, Vol.21, No.6, pp.656-662 (2003)
- [2] Y.Takahashi, K.Hikita and M.Asada: "Incremental Purposive Behavior Acquisition based on Self-Interpretation of Instructions by Coach," Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.686-693 (2003)
- [3] W.Shimizuhira and Y.Maeda: "Self-Localization Method Used Multiple Omnidirectional Vision System," SICE Annual Conference 2003, CD-ROM, pp.2796-2799 (2003)
- [4] 清水平 渉, 前田 陽一郎: "マルチ全方位ビジョンを用いた自律移動ロボットのファジィナビゲーション," 第 19 回ファジィシステムシンポジウム, pp.577-578 (2003)

#### <連絡先>

〒 910-8507 福井市文京 3-9-1 福井大学 工学部 知能システム工学科 前田 陽一郎

Tel & Fax: 0776-27-8050

E-mail: maeda@ir.his.fukui-u.ac.jp



# おもしろさの構造を考慮したなぞかけ生成

### **Generation of NAZOKAKE Considering its Structure**

前田 実香 Mika MAEDA 筑波大学 University of Tsukuba 鬼沢 武久 Takehisa ONISAWA 筑波大学 University of Tsukuba

Abstract: NAZOKAKE is Japanese word plays. This paper considers some kinds of NAZOKAKE structures and mentions a system that generates NAZOKAKE words based on the relation between words and pronunciations of words, i.e., one of the NAZOKAKE structures. The present NAZOKAKE generating system has database consisting of a set of words, their pronunciations, related words and their relation degrees, which are determined by subjects experiments. Some NAZOKAKE words are generated according to inputted ODAI, the theme of NAZOKAKE. This paper also mentions the experiments in which some subjects evaluate generated NAZOKAKE words. The experimental results show that understandable and unexpected NAZOKAKE words are generated.

### 1 はじめに

人工知能の研究分野の一つに人間の知的行動の一つであるユーモアに関する研究がある[1]。ユーモアの構造と原因を解析することは人間の思考や行動を理解する上で大きな意義がある。また解析結果から得られる抽象的な構造を利用してユーモアを生成することで、ユーモアに対する新しい発見が得られる可能性もある。

ユーモア研究の一つのサブ領域として、言葉によるユーモアの研究がある[2][3]。これらの研究では、人間が理解でき、おもしろいと思える駄洒落ができている。しかし出力される駄洒落の候補の決定方法は音韻の類似性や文法的な規則によるもので、「おもしろいかどうか」という基準で出力を生成しているわけではない。

著者らはおもしろさの観点からなぞかけを生成する研究を行っている[4]が、本研究ではまず、なぞかけの構造を言葉間の関連という観点から分類する。そして言葉の意味的な関連と音韻の類似性という構造をもつなぞかけを生成するシステムの構築を行う。その中で構造の一部である意味的な関連性の程度は被験者実験によって設定している。最後に、本システムで生成されたなぞかけの評価を行う。

#### 2 なぞかけとその構造による分類

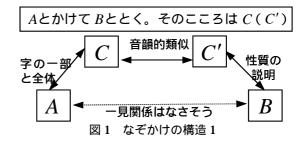
なぞかけは「AとかけてBととく。そのこころはC(C')」という形式の文を考える言葉遊びの一つであり、A、B 、C 、C' の 4 つの言葉を用いる。前半の部分で一見関係のないAとBという言葉をあげ、後半の「こころ」の部分でCとC'という言葉を介してその何らかの共通点を示すことでおもしろさを生じさせる。以下ではなぞかけの構造をこれら 4 つの言葉間の関連に基づいて分類する。

一番目の分類は文字の形状を利用したなぞかけであ る。

例 1) 逢うとかけて衣の綻びととく。そのこころは糸で縫う[5]

例 2) 青とかけて曇天ととく。そのこころは日が出て晴れる[5]

この種類のなぞかけは「字なぞ」とも呼ばれており、4つの言葉の関係は図1のようになっている。



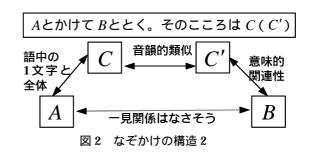
例1では、「逢(う)」という字に「糸」をつけると「縫」という字になることをかけている。また「衣の綻び」は「糸で縫」って直すことから「逢う」と「衣の綻び」を「糸で(という辺をつけると)縫う(という字になる)」という共通点でまとめている。

二番目は単語または文章中の一文字の場所を説明する 形のものである。

例 3) あさきのさの字とかけて十五夜の月とく。そのこころは秋の中だ[5]

例 4 )( いろはの ) ろの字とかけて野辺の朝露と解く。心は葉 (は) の上にある [6]

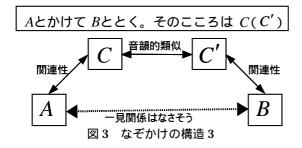
図2にこの構造での4つの言葉の関係を示す。



例 4 で説明すると、いろはの「ろの字」は「は(の字の)上にある」。また「野辺の朝露」も「葉の上にある」。ここでは「葉」と「は」の音が一致していることから「はのうえにある」ということで「ろの字」と「野辺の朝露」の共通点を示している。

三番目は字の形や語中の文字に関わらず、意味的な関連と音韻の類似からのみできているなぞかけである。 例 5)台風とかけて血液型とときます。そのこころは大型(0型)もあります[7]

この構造での4つの言葉の関係を図3に示す。



例5では「台風」と「大型」、「血液型」と「0型」には意味的に関連があり、また「大型」と「0型」は音韻が類似している。「台風」と「血液型」を「大型(0型)」という言葉で関連を示している。

本研究では以上3つの構造のうち比較的多く用いられ、A、B 、C 、C' の部分を単語に簡単化しやすい三番目の構造を持つなぞかけを生成するシステムを実装し、性能を評価する。

#### 3 なぞかけ生成システム

#### 3.1 システムの概要

本章では言葉の意味的な関連性を用いてなぞかけを生成するシステムを考える。図4にシステム全体の概略図を示す。お題となる言葉が一つ入力されると、言葉のデータベースを検索、参照しながらお題についてのなぞかけが一つ、または複数出力される。

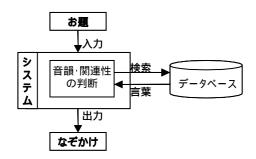
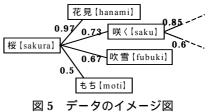


図4システムの流れ図

#### 3.2 データの形式

なぞかけに用いる言葉 (図3のA、B、C 、C' )の データは、その語の読みを表わす文字列、任意個数の関連する言葉 (以下関連語と呼ぶ)とその関連度から構成

される。例えば、「桜」という言葉に対する関連語は図 5 に示すように、「咲く」「散る」といった述語となる動詞や「花見」「もち」といった関連する名詞などがある。



四0 7 70717 .

#### 3.3 関連度の設定方法

データとなる言葉の間には、関連の強さを表わす関連度がついている。関連度の値は、後で示す被験者アンケートの結果から  $0.0\sim1.0$  の値を与えている。データの数は 220 語である。

#### 3.4 出力方法

なぞかけは以下のアルゴリズムによって生成される。まず入力された「お題」を言葉 A とし、A をデータベースの中から検索する。A が見つかると、次に「こころ」の部分となる言葉 C を決める。つまり、データベースから A の関連語を検索し、見つかった関連語を言葉 C とする。この C の読みを調べ、音韻的に類似した言葉 C' をデータの中から再び検索する。最後に「B ととく」の B に入る言葉を決めるため、C' の関連語を検索し、見つかったら言葉 B とする。この手順で A C C' B がすべて見つかった場合は「A とかけて B ととく。そのこころは C (C')」というなぞかけの形で出力する。A 、C 、C' 、B が見つからなかった場合は生成失敗として終了する。

#### 3.5 音韻の類似判断

C から C' を検索するときは音韻の類似性によっている。音韻の類似性の判断は、データの言葉の音韻を表す文字列を比較することによって行う。二つの文字列を比較し、文字の違いが 1 文字以内であるものを選ぶ。1 文字違う場合は、表 1 に示すように[2]で用いている音素類似度を利用する。二つの音素間の類似性の判断は人間が作ったなぞかけで用いられている言葉を参考に、表 1 で 0.6 を閾値とし、0.6 以上であれば「類似している」。0.6 未満であれば「類似していない」とみなす。

表1 音素類似度の表

音素類似度
0.9
0.9
0.9
0.8
0.7
0.7
0.6
0.6
0.6
0.6
0.5
0.1
0.1

(Nは撥音の「ん」を表す)

#### 3.6 選択される言葉の関連度の範囲

A から C 、 C' から B を決定するとき、選ぶ言葉の選択方法について述べる。

A & C & C' & B はそれぞれ関連をもつ言葉の組である。なぞかけを生成するにあたって、C & C' は「こころ」にあたる部分であり、なぞかけのおもしろさを引き起こす落ちの部分と言える。A & C & C' & B の関連度が大きい場合、「こころ」の部分が容易に想像できてしまうので意外性がなくなりおもしろくない。逆に関連度が小さすぎる、つまり関連性が薄すぎる言葉の場合は「こころ」の部分を読んでも内容や意味がわからず納得できなくなってしまい、なぞかけにはならない。そこで解の候補を関連度の値によって絞り「意外性」があり「内容が納得できる」言葉を用いておもしろいなぞかけを出力する。

### 4 アンケートによる被験者実験

#### 4.1 関連度設定実験とデータ作成

3 章で述べたシステムによって得られたなぞかけを 被験者によって評価する実験を行う。実験は言葉の組の 関連度を設定する関連度設定実験、出力に用いる関連度 の範囲を決定する範囲決定実験、システム評価の実験の 3 段階に分けて行う。

#### 4.2 関連度設定実験とデータ作成

以前のシステムでは、あらかじめ定めたいくつかの規則に従ってデータベース内の関連度を設定していた[4]。本研究では関連度を人間が感じている言葉のつながりとより近いものにするために、被験者実験によってデータベースの言葉間の関連度を定める。被験者6名に対し、データベース内の一組の言葉を提示し、その関連の強さを強い5点、少し強い4点、普通3点、少し弱い2点、弱い1点で点数付けしてもらう。被験者6名の各言葉の組の評価の平均値を求め、0.0~1.0に正規化したものをその組の関連度として設定する。表2に関連度設定の一例を示す。

表 2 関連度設定実験結果の例

K								
被験者								
言葉の組	а	b	С	d	е	f	平均值	正規化値
サイコロ すごろ								
<	5	4	3	4	3	4	3.83	0.77
サケ イクラ	4	4	4	5	3	5	4.17	0.83
スキー 板	2	4	4	2	2	3	2.83	0.57

#### 4.3 関連度の範囲決定実験

次に、生成の際に選択される言葉の関連度の範囲を決定するための実験を行う。前節で作成したデータベースを用いて出力されたなぞかけのおもしろさを被験者4名に、おもしろい5点、少しおもしろい4点、ふつう3点、少しおもしろくない2点、おもしろくない1点で点数付けしてもらう。出力されるなぞかけの数は関連度の範囲

に依存するため、なぞかけの出力数と評価の高いなぞかけの割合からシステムに用いる範囲を決定することにする。数を考慮するのは、出力数が多すぎるとおもしろさを評価する被験者の負担となり感じるおもしろさが減少し、また少なすぎるとシステムの評価実験に用いるには適さないためである。範囲を変えたときの出力数と評価が4以上のなぞかけの割合を表3に示す。

表3 範囲を変えたときの出力数と評価が4以上の割合

下限 上限		).50	0	.55	0	.60	0	. 65	0	.70	0	.75	0	.80
1.00	89	30.6%	73	30.5%	69	30.1%	56	29.9%	47	31.4%	27	26.9%	24	28.1%
0.95	83	32.5%	68	32.0%	64	32.0%	49	31.6%	41	32.2%	24	32.3%	21	32.1%
0.90	68	32.7%	55	32.7%	51	32.4%	40	34.4%		36.3 %	14	32.1%	21	19.0%
0.85	51	31.4%	40	30.6%	37	30.4%	29	28.4%	21	31.0%	6	16.7%	4	12.5%
0.80	37	27.7%	28	29.5%	25	27.0%	17	26.5%	10	25.0%	2	12.5%		
0.75	23	27.2%	15	30.0%	12	27.1%	6	29.2%	2	12.5%				
0.70	17	29.4%	12	31.3%	9	27.8%	2	25.0%					数	割合
0.65	2	25.0%	1	50.0%								•		
0.60	2	25.0%												

表をみると、評価の高いなぞかけの割合が最も高い50%は[0.55,0.65]のときであるが、この場合は出力数が1と少なく、適切ではない。[0.70,0.90]にしたときは評価の高いなぞかけの割合は二番目に高い36.3%で、かつ出力数からみても31と適当であることから、今回は[0.70,0.90]を範囲として用いることにする。

#### 4.4 システム評価実験

最後に今求めた範囲で出力されたなぞかけから、システムの性能を評価する実験を行う。被験者はグループX:5名、グループY:24名、合計29名である。

X: 普段なぞかけを作っている落語研究会のメンバー (5名) Y: 一般の大学生・大学院生 (24名)

両グループに対してシステムから出力された 31 のなぞかけを以下の3つの点についてそれぞれ5段階の評価をしてもらう。

- A) 意外性があるか
  - 5 ある
  - 4 少しある
  - 3 普通
  - 2少しない
  - 1ない
- B) 内容が理解、納得できるか
  - 5 できる
  - 4 少しできる
  - 3 ふつう
  - 2 少しできない
  - 1 できない
- C) 総合的にみておもしろいか
  - 5 おもしろい
  - 4 少しおもしろい
  - 3 ふつう
  - 2 少しおもしろくない
  - 1 おもしろくない

またグループXの被験者には、評価の他に同じお題について出力された複数のなぞかけを比較してもらう。比

較してもらうなぞかけは、関連度の範囲を限定することによって候補から落とされたものも含んでいる。一つのお題についてそれぞれ一つ最もおもしろいと思うものを選択してもらい、それを選んだ理由を書いてもらう。

#### 4.5 アンケート結果とその考察

29 名の被験者が各項目に与えた評価の平均値を表 4 に示す。

表 4 各評価項目に対する被験者の評価の平均値

		評価項目				
	人数	A	В	С		
グループX	5	3.0	3.2	2.5		
グループY	24	3.0	3.7	2.6		
全員	29	3.0	3.6	2.6		

まず項目 A「意外性があるか」については、評価の平均値は 3.0、また評価が 4 以上と高かったものの割合は全体の 37.3%を占めている。逆に評価が 2 以下と低かったものの割合は 31.0%である。また項目 B「内容が理解・納得できるものか」は、平均値 3.6、評価が 4 以上の割合も 55.8%と過半数を超えており、理解・納得できるものができている。最後に項目 C の総合評価については平均値が 2.6 になり、平均値は「ふつう」を下回る結果になっている。

グループXとグループYの評価の平均値を比較すると、項目 A、Cについて有意差はあるとはいえない。項目 Bに関しては5%水準で有意差が見られる。グループXの被験者は普段なぞかけを作っているが、その場合口頭で発表することが多い。そのため字を読んで理解できるかに加えて音として耳から聞いて理解できるかという点も考慮に入れており、その分評価基準が厳しくなったと考えられる。

次に、グループ X に対して行った複数の出力に対しての選択の理由の記述は、大きく分けるとそのなぞかけを選んだ理由(肯定的なもの)と、その他のなぞかけを候補から落とした理由(否定的なもの)に分けられる。肯定的な評価の理由は、「意外性」「うまさ」「イメージのしやすさ」「伝えやすさ」「表現の広げやすさ(『どちらもです』と言うことができる)」が挙げられ、否定的な評価の理由は「あたりまえすぎる」「思いつきにくい」「わかりにくい」「音韻的に辛い」といったものが挙げられている。

選択理由の記述内容から、言葉の関連が当たり前すぎるものと思いつきにくいものを候補から落とすという本システムの方針は妥当であると言える。しかし人間がおもしろさを感じるためには文章全体からのイメージや表現方法などより多くの要素が影響しているため、総合的にみておもしろいと感じるなぞかけを生成するにはさらに新たな要素も付け加えなければならないことがわかる。音韻的に無理があるとされたものに関しては、新たに実験を行うなどして基準を見直す必要がある。

#### 4.6 出力結果の例

システムによって出力されたなぞかけのうち、被験者

の評価が高かったものの例をあげる。

「新聞とかけて鉄道ととく。そのこころは記者(汽車)」「空とかけておできととく。そのこころは晴れる(腫れる)」

#### 5 おわりに

本研究では、なぞかけを使われている言葉の抽象的な構造から分類し、その分類に基づいて生成したなぞかけは人間が意味を理解・納得し、意外性を感じられることが確認された。なぞかけのおもしろさの点については、言葉の関連性がおもしろさに影響する要因の一つであることを示すことができた。

今後はよりおもしろく、また人間が作るような表現豊かななぞかけを出力するために、新たな分類を発見して実装し、出力できるなぞかけのヴァリエーションを増やすこと、また今回実装した分類に関しては関連性以外の要因も考えシステムに付け加えていく必要がある。

### 謝辞

本稿を執筆するにあたり、なぞかけに関しての貴重な 意見とアドバイスをいただき、またアンケートにも協力 してくださった筑波大学落語研究会の皆さんに深く御 礼申し上げます。

#### 参考文献

- [1] G. Ritchie: Prospects for Computational Humor Proc. of 7th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN-98), Takamatsu, pp.283-291.(1998).
- [2] 滝澤 修、キム ビンステッド: 日本語駄洒落なぞ なぞ生成システム"BOKE", 人工知能学会誌, Vol.13, No.6, pp.920-927(1992)
- [3] 横川 壽彦: 調音類似に基づく駄洒落候補の自動生成,第10回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集,pp.253-256(2003)
- [4] 前田 実香、鬼沢 武久:言葉の関連性を考慮した なぞかけ生成、第19回ファジィシステムシンポジ ウム講演論文集、pp.563-566(2003)
- [5] 鈴木棠三編、「ことば遊び辞典 新版」、東京堂出版、
- [6] 日本国語大辞典第二版オフィシャルサイト http://www.nikkoku.net/ezine/asobi/asb10\_01.ht ml
- [7] なぞかけ三昧 , http://www.d1.dion.ne.jp/~ma\_nishi/nazokake.ht ml

#### 連絡先:

前田実香

〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1 筑波大学機能工学系鬼沢研究室

Tel:029-853-6188 Fax:029-853-5207 E-mail:mika@fhuman.esys.tsukuba.ac.jp

# 感性データにおける曖昧さの表現について

### On Description of Fuzziness in Kansei Data

#### 中森義輝

Yoshiteru Nakamori 北陸先端科学技術大学院大学 領家美奈 Mina Ryoke 筑波大学

Japan Advanced Institute of Science and Technology University of Tsukuba

*Abstract*— In this paper, a quantification method considering relative fuzziness is proposed in order to deal effectively with the subjective evaluation. The discussion is focused on the corresponding analysis taking into account the relative fuzziness here.

Keywords - Quantification method, relative fuzziness

### 1 はじめに

本稿では、複数の評価者、複数の評価対象、複数の評価項目といった3相の評価データを対象としている。このデータには、評価対象に対して評価項目という複数の視点からみた、評価者による主観的評価による曖昧さが内在されている。このようなデータをここでは、感性データと呼ぶ。感性データの解析においては、評価にばらつきがみられる対象や項目に着目し、意志決定やマーケティング等に生かしていくことが肝要である。

評価者をあるファジィ集合に属するものと仮定し、その集合への帰属度を用いたファジィ数量化理論が文献 [1] にまとめられているが、近年、あらかじめ評価者が属する集合を仮定せず、回答のばらつき具合を可視化するような数量化手法について提案が行なわれている [2]。本稿では感性データを解析対象とするとき文献 [2] で提案している相対的曖昧さを導入して、従来の数量化理論 III 類を拡張した、相対的ファジィネスを考慮する数量化手法の提案を行なう。

まず、評価者平均値を用いて、従来の数量化 III 類に適用し、評価者平均データによる軸を同定する。そして提案する相対的曖昧さを導入することで、第i 固有ベクトルと第j 固有ベクトルによって張られる射影平面上に、評価者による評価項目群に対するばらつき、および評価者による評価対象群に対するばらつきを表すことができる。

次節で、本稿で使用するデータ構造について述べた あと、数量化理論 III 類の概要を述べる。次に相対的 曖昧さ導入について述べる。

### 2 データ

評価対象を  $m=1,2,3,\cdots,M$ 、評価項目を  $n=1,2,3,\cdots,N$ 、そして、評価者を  $k=1,2,3,\cdots,K$  で表す。例えば、

(評価対象) 受験生 1, 受験生 2,  $\cdots$ 

(評価項目) 学業成績,人間性,将来性,…

(評価者) 試験官 A, 試験官 B, …

というような 3 相 (あるいは、3 元) 構造のデータを扱う。データ  $z_{mnk}$  は、例えば次のように与えられる。

$$z_{mnk} \in \{1, 2, 3, 4, 5\} \tag{1}$$

これは、ある評価対象 m に対して、ある評価項目 (質問)n が発せられたとき、評価者 k は 5 段階評価で回答することを意味する。

評価データを次の手順で変換し、相関表を作る。は じめに、評価者平均データ  $z_{mn}$  を求める。

$$z_{mn} = \frac{1}{|E_m|} \sum_{k \in E_m} z_{mnk} \tag{2}$$

ここで、 $|E_m|$  は、評価対象を評価した人数である。 $z_{mn}$  は評価者について平均をとった評価対象 m に対する 質問項目 n の回答値である。つぎに、全評価項目と全評価対象を用いて正規化した  $p_{mn}$  を求める。

$$p_{mn} = z_{mn} / \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} z_{mn}$$
 (3)

 $p_{mn}$  を用いて次のように相関表が得られる。

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{M1} & p_{M2} & \cdots & p_{MN} \end{pmatrix}$$
(4)

正規化により、次式が満される。

$$\sum_{m=1}^{M} p_{m\bullet} = \sum_{n=1}^{N} p_{\bullet n} = 1$$
 (5)

ただし、 $p_{\cdot n}$  と $p_{m\cdot}$  は次により定義されている。

$$p_{m\bullet} = \sum_{n=1}^{N} p_{mn}, \qquad p_{\bullet n} = \sum_{m=1}^{M} p_{mn} \tag{6}$$

### 3 数量化理論 III 類

ここでは、数量化理論 III 類 [3] の概要を紹介する。 評価対象 m に  $x_m$ 、評価項目 n に  $y_n$  という数量を与え、それらを次のベクトルを用いて表すこととする。

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, \cdots, x_M)^t$$
 (7)

$$\mathbf{y} = (y_1, y_2, y_3, \cdots, y_N)^t$$
 (8)

数量化理論 III 類では、次に定める相関係数  $\rho_{xy}$  を最大にするようにベクトル x と y を同定する。

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \longrightarrow \max. \tag{9}$$

ただし

$$\sigma_{xy} = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} p_{mn} x_m y_n - \sum_{m=1}^{M} p_{m.} x_m \sum_{m=1}^{N} p_{\cdot n} y_n$$
(10)

$$\sigma_x = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} p_m \cdot x_m^2 - (\sum_{m=1}^{M} p_m \cdot x_m)^2$$
 (11)

$$\sigma_y = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} p_{\cdot n} y_n^2 - (\sum_{m=1}^{N} p_{\cdot n} y_n)^2$$
 (12)

これにより、反応の似通った対象と反応の似通った項目に近い数量を与えることとなる。評価者平均データに基づき、相関が最大になるように評価項目と評価対象にスコアを与え、また座標軸を同定している。

得られたベクトルを次に示す。

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_{i} = (\tilde{x}_{i1}, \tilde{x}_{i2}, \tilde{x}_{i3}, \cdots, \tilde{x}_{iM})^{t}$$
(13)

これは第i 固有ベクトルの軸で表される評価対象の成分である。また、

$$\tilde{\boldsymbol{y}}_{i} = (\tilde{y}_{i1}, \tilde{y}_{i2}, \tilde{y}_{i3}, \cdots, \tilde{y}_{iN})^{t}$$

$$(14)$$

これは第i 固有ベクトルの軸で表される評価項目の成分である。

### 4 相対的曖昧さの導入

次に、評価者に依存するばらつきを考慮して相対的曖昧さを導入する。

### 4.1 評価対象に関する相対的曖昧さ

評価対象についての相対的曖昧さを次のように求める。まず、評価対象 m に対する評価者のばらつきを表すベクトル  $b_{mk}$  を次のように定義する。

$$b_{mk} = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} (z_{mnk} - z_{mn}), & k \in E_m \\ 0, & k \notin E_m \end{cases}$$
 (15)

また、その評価者に関する平均値は次のベクトル $b_m$ で表し、それは次式を満たすものと定義する。

$$b_m = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} b_{mk} \tag{16}$$

ここで、次のふたつのベクトル表現を導入する。

$$\boldsymbol{b}_k = (b_{1k}, b_{2k}, b_{3k}, \cdots, b_{Mk})^t \tag{17}$$

$$\mathbf{b} = (b_1, b_2, b_3, \cdots, b_M)^t \tag{18}$$

それらを用いて、評価者 k のばらつきを考慮した評価対象のベクトル  $\tilde{x}_{ik}$  を次式のように定義する。

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_{ik} = \tilde{\boldsymbol{x}}_i + (\boldsymbol{b}_k - \boldsymbol{b}) \tag{19}$$

ここで  $\tilde{x}_i$  は評価者平均データを用いて数量化理論 III 類により得られた評価対象 m に対するスコアである。ここで、ベクトル  $\tilde{x}_{ik}$  は次のように記述することができる。

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_{ik} = (\tilde{x}_{i1k}, \tilde{x}_{i2k}, \tilde{x}_{i3k}, \cdots, \tilde{x}_{iMk})^t \tag{20}$$

さて、今、第 i 固有ベクトルの軸で表される成分に曖昧さを導入し、次の各成分がファジィ数であるファジィベクトルを考える。

$$\tilde{\boldsymbol{X}}_{i} = (\tilde{X}_{i1}, \tilde{X}_{i2}, \tilde{X}_{i3}, \cdots, \tilde{X}_{iM})^{t}$$
 (21)

次に、このベクトルを直接求めるのではなく、各評価項目や各評価対象のばらつき具合を表現することを考える。

評価者のばらつきを考慮したメンバシップ関数は次 式のように定義できる。

$$\mu_{X_i}(\tilde{\boldsymbol{x}}) = \exp\{-(\tilde{\boldsymbol{x}} - \tilde{\boldsymbol{x}}_i)^t D_{X_i}^{-1} (\tilde{\boldsymbol{x}} - \tilde{\boldsymbol{x}}_i)\}$$
 (22)

分散共分散行列 R は次のように展開できる。

$$R = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} (\tilde{\boldsymbol{x}} - \tilde{\boldsymbol{x}}_i)(\tilde{\boldsymbol{x}} - \tilde{\boldsymbol{x}}_i)^t$$
 (23)

$$= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} (\tilde{\boldsymbol{b}}_k - \tilde{\boldsymbol{b}}) (\tilde{\boldsymbol{b}}_k - \tilde{\boldsymbol{b}})^t$$
 (24)

従って次式を満たしている。

$$D_{X_i} = D_X = R \tag{25}$$

次にベクトル  $a_m$  を導入して、ファジィベクトル  $X_i$  を第 m 評価対象を扱う  $X_{im}$  に変換する。

$$\mathbf{a}_{m} = (a_{m1}, a_{m2}, a_{m3}, \cdots, a_{mM})^{t}$$
 (26)

ただし、ベクトル  $a_m$  は次式により定義される。

$$a_{mm'} = \begin{cases} 1, & m = m' \\ 0, & m \neq m' \end{cases}$$
 (27)

第i 固有ベクトル軸における第m 評価対象のスコアを次式により得る。

$$X_{im} = \boldsymbol{a}_m^t \tilde{X}_i \tag{28}$$

そこで、第i 固有ベクトル軸上に第m 評価対象に対する回答のばらつきは次のメンバシップ関数により表される。

$$\mu_{X_{im}}(x) = \max_{\{\tilde{x} \mid x = \boldsymbol{a}_m^t \tilde{\boldsymbol{x}}\}} \mu_{X_i}(\tilde{\boldsymbol{x}})$$

$$= \exp\{-(x - \boldsymbol{a}_m^t \tilde{\boldsymbol{x}}_i)^2 (\boldsymbol{a}_m^t D_X \boldsymbol{a}_m)^{-1}\} \quad (29)$$

ただし、 $a_m^t D_X a_m$  は次式によって得られる。

$$a_m^t D_X a_m = \frac{1}{X} \sum_{k=1}^K (b_{mk} - b_m)^2$$
 (30)

いま、第 2 固有ベクトルと第 3 固有ベクトルで張られる射影平面上に、第 m 評価対象のファジィベクトル  $X_{2m}$ 、 $X_{3m}$  のメンバシップ関数を考える。

$$\mu_{X_{2m} \times X_{3m}}(x_2, x_3)$$

$$= \mu_{X_{2m}}(x_2) \times \mu_{X_{3m}}(x_3)$$

$$= \exp\{ (-\boldsymbol{a}_m^t D_X \boldsymbol{a}_m)^{-1}$$

$$\times \{ (x_2 - \boldsymbol{a}_m^t \tilde{\boldsymbol{x}}_2)^2 + (x_3 - \boldsymbol{a}_m^t \tilde{\boldsymbol{x}}_3)^2 \} \}$$
 (32)

第2固有ベクトルと第3固有ベクトルを用いた平面に おける評価者の得点の レベル集合を表す円は次式の ように書くことができる。

$$(x_2 - \boldsymbol{a}_m^t \tilde{\boldsymbol{x}}_2)^2 + (x_3 - \boldsymbol{a}_m^t \tilde{\boldsymbol{x}}_3)^2$$
  
=  $(-\boldsymbol{a}_m^t D_X \boldsymbol{a}_m) \times (-\log(\alpha))$  (33)

しかしながら、ここでは曖昧さの相対値を表示することを目的とするので、円の半径を $r_m$ として表し、その大きさを別途導出することとする。

$$(x_2 - \boldsymbol{a}_m^t \tilde{\boldsymbol{x}}_2)^2 + (x_3 - \boldsymbol{a}_m^t \tilde{\boldsymbol{x}}_3)^2 = r_m^2$$
 (34)

半径  $r_m$  を求めるひとつの方法として次式による相対的半径を求めることができる。

$$\frac{r_m^2 - r_{\min}^2}{r_{\max}^2 - r_{\min}^2} = \frac{d_m - \min\{d_m\}}{\max\{d_m\} - \min\{d_m\}}$$
(35)

ただし、 $d_m$  は次式により求めている。

$$d_m = \frac{\tilde{\boldsymbol{a}}_m D_X \tilde{\boldsymbol{a}}_m}{\tilde{\boldsymbol{a}}_m^t \tilde{\boldsymbol{a}}_m} \tag{36}$$

#### 4.2 評価項目に関する相対的曖昧さ

質問項目についての相対的曖昧さを次のように求める。まず、評価項目 n に対する評価者の回答ばらつきを表すベクトル  $c_{nk}$  を次のように定義する。

$$c_{nk} = \frac{1}{|O_k|} \sum_{m \in O_k} (z_{mnk} - z_{mn}), \quad \forall n$$
 (37)

また、その評価者に関する平均値は次のベクトル  $c_n$  で表すこととし、次のように求める。

$$c_n = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} c_{nk}$$
 (38)

ここで、次のふたつのベクトル表現を導入する。

$$\mathbf{c}_{k} = (c_{1k}, c_{2k}, c_{3k}, \cdots, c_{Nk})^{t}$$
 (39)

$$\mathbf{c} = (c_1, c_2, c_3, \cdots, c_N)^t$$
 (40)

それらを用いて、評価者 k の回答のばらつきを考慮した評価項目のベクトル  $\tilde{\pmb{y}}_{ik}$  を次式のように定義する。

$$\tilde{\boldsymbol{y}}_{ik} = \tilde{\boldsymbol{y}}_i + (\boldsymbol{c}_k - \boldsymbol{c}) \tag{41}$$

ここで  $\tilde{y}_i$  は評価者平均データを用いて数量化理論  ${
m III}$  類により得られた評価項目 n に対するスコアである。ここで、ベクトル  $\tilde{y}_{ik}$  は次のように記述することができる。

$$\tilde{\boldsymbol{y}}_{ik} = (\tilde{y}_{i1k}, \tilde{y}_{i2k}, \tilde{y}_{i3k}, \cdots, \tilde{y}_{iNk})^t \tag{42}$$

さて、評価対象に関する相対的曖昧さを導入したように、第i固有ベクトル軸で表される成分に曖昧さを導入し、次の各成分がファジィ数であるファジィベクトルを考える。

$$\tilde{Y}_i = (\tilde{Y}_{i1}, \tilde{Y}_{i2}, \tilde{Y}_{i3}, \cdots, \tilde{Y}_{iN})^t \tag{43}$$

評価者の回答のばらつきを考慮したメンバシップ関数 を次式のように定義する。

$$\mu_{Y_i}(\tilde{\boldsymbol{y}}) = \exp\{-(\tilde{\boldsymbol{y}} - \tilde{\boldsymbol{y}}_i)D_{Y_i}^{-1}(\tilde{\boldsymbol{y}} - \tilde{\boldsymbol{y}}_i)\}$$
(44)

ここで、分散共分散行列 T は次のように展開できる。

$$T = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} (\tilde{\boldsymbol{y}} - \tilde{\boldsymbol{y}}_i) (\tilde{\boldsymbol{y}} - \tilde{\boldsymbol{y}}_i)^t$$
 (45)

$$= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} (\tilde{\boldsymbol{c}}_k - \tilde{\boldsymbol{c}})(\tilde{\boldsymbol{c}}_k - \tilde{\boldsymbol{c}})^t$$
 (46)

これは次式を満している。

$$D_{Y_i} = D_Y = T (47)$$

次にベクトル  $a_n$  を導入して、ファジィベクトル  $Y_i$  を第 n 評価項目を扱う  $Y_{in}$  に変換する。

$$\mathbf{a}_{n} = (a_{n1}, a_{n2}, a_{n3}, \cdots, a_{nN})^{t}$$
 (48)

ただし、ベクトル  $a_n$  は次式により定義される。

$$a_{nn'} = \begin{cases} 1, & n = n' \\ 0, & n \neq n' \end{cases}$$
 (49)

第i 固有ベクトル軸における第n 評価項目のスコアは次の写像により求められる。

$$Y_{in} = \boldsymbol{a}_n^t \tilde{Y}_i \tag{50}$$

そこで、第i固有ベクトル軸上に第n評価項目に対する評価者の回答のばらつきは、次のメンバシップ関数により表される。

$$\mu_{Y_n}(y) = \max_{\{\tilde{y}|y = \boldsymbol{a}_m^t \tilde{\boldsymbol{y}}\}} \mu_{Y_i}(\tilde{\boldsymbol{y}})$$
 (51)

$$= \exp\{-(y - \boldsymbol{a}_n^t \tilde{\boldsymbol{y}}_i)^2 (\boldsymbol{a}_n^t D_Y \boldsymbol{a}_n)^{-1}\}$$
 (52)

ただし、 $a_n^t D_Y a_n$  は次式で求められる。

$$a_n^t D_Y a_n = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (c_{nk} - c_n)^2$$
 (53)

いま、第 2 固有ベクトルと第 3 固有ベクトルで張られる射影平面上に、第 m 評価対象のファジィベクトル  $Y_{2n}$ 、 $Y_{3n}$  のメンバシップ関数を考える。

$$\mu_{Y_{2n} \times Y_{3n}}(y_2, y_3)$$

$$= \mu_{Y_{2m}}(y_2) \times \mu_{Y_{3m}}(y_3)$$

$$= \exp\{ (-\boldsymbol{a}_n^t D_Y \boldsymbol{a}_n)^{-1}$$

$$\{ (y_2 - \boldsymbol{a}_n^t \tilde{\boldsymbol{y}}_2)^2 + (y_3 - \boldsymbol{a}_n^t \tilde{\boldsymbol{y}}_3)^2 \} \}$$
 (55)

第2固有ベクトルと第3固有ベクトルを用いた平面における評価者の得点の  $\alpha$  レベル集合を表す円は次式のように書くことができる。

$$(y_2 - \boldsymbol{a}_n^t \tilde{\boldsymbol{y}}_2)^2 + (y_3 - \boldsymbol{a}_n^t \tilde{\boldsymbol{y}}_3)^2$$
  
=  $(-\boldsymbol{a}_n^t D_Y \boldsymbol{a}_n) \times (-\log(\alpha))$  (56)

評価対象に対する相対的曖昧さの導入と同様に、円の半径を $r_n$ として表わす。

$$(y_2 - \boldsymbol{a}_n^t \tilde{\boldsymbol{y}}_2)^2 + (y_3 - \boldsymbol{a}_n^t \tilde{\boldsymbol{y}}_3)^2 = s_n^2$$
 (57)

円の半径の大きさは、次式を用いて、評価項目群の中で相対的な大きさとして求められる。

$$\frac{s_n^2 - s_{\min}^2}{s_{\max}^2 - s_{\min}^2} = \frac{d_n - \min\{d_n\}}{\max\{d_n\} - \min\{d_n\}}$$
 (58)

ただし、 $d_n$  は次式により求めている。

$$d_n = \frac{\tilde{\boldsymbol{a}}_n D_Y \tilde{\boldsymbol{a}}_n}{\tilde{\boldsymbol{a}}_n^t \tilde{\boldsymbol{a}}_n} \tag{59}$$

### 5 おわりに

感性データに内在する評価者のばらつきを表現するために、相対的曖昧さを導入したファジィ数量化理論III類を提案した。実問題へ適用し、本手法の有効性を示すことを今後の予定としている。

## 参考文献

- [1] 寺野寿郎、浅居喜代治、菅野道夫: ファジィシス テム入門、オーム社、1987.
- [2] 中森義輝、領家美奈、河野小夜子: 感性評価データ の主成分分析に関する考察, 日本知能情報ファジィ 学会誌, Vol. 15, No. 6, pp. 658-676, 2003.
- [3] 小林龍一: 数量化理論入門, 日科技連, 1981.

#### [連絡先]

〒 112-0012 東京都文京区大塚 3 丁目 29-1 筑波大学 大学院ビジネス科学研究科 領家 美奈

TEL: 03-3942-6889 / FAX: 03-3942-6829 e-mail: ryoke@gssm.otsuka.tsukuba.ac.jp

# 茶室意匠における調和に関する研究

### A Study on Harmony in Chashitsu Design

佐藤 祐介新宮 清志Yusuke SatoKiyoshi Shingu日本大学日本大学

Nihon University Nihon University

**Abstract:** The purpose of this paper is the inspection of harmony in Chashitsu design. The main contents of the study are analyses of composition, rhythm, and the harmony based on the former results in Chashitsu design. Furthermore, we clarify the characteristics in Chashitsu design by using the law of route N in the section "Analysis of composition", and using fractal dimension as the guideline of the complexity in the section "Analysis of rhythm".

### 1. 序論

調和とは、2つ以上の要素それぞれの相互関 係についての美的価値判断であり、各要素が互 いに分離、排斥せず、統一された全体として成 立している場合にいう1)。即ち、著しく特徴を 異にするいくつかの要素を敢えて組み合わせる ことで、単一要素としての諸部分それ自身が根 源的に有している美的なる存在を凌駕するよう な、より高次の美的効果を発揮することが、こ の原理に与えられた使命であるといえる。無論、 単純な(或いは簡便な)操作から調和的効果を得 ようとする場合、各要素が同一の形態や、相似 形等の類似したモノの従属関係による構築の試 みが先ず考えられるだろう。そこには相互の分 離及び排斥といった負の影響は起こりえないこ とがほぼ約束されており、過去の名建築といわ れる作品の中にも、こうした効果を最大限に利 用したものが存在する。ただ、こういった作業 から得られる調和的効果は、一方で常に単調さ をも生む危険性を孕んでいる。各要素が互いに 何らかの共通性を有することは、確かに調和的 効果を期待する際に必要な条件ではあるが、さ らに互いが他方を引き立てるような差異をも持 ち合わせていなければ、十分とはいえないだろ う。即ち、美的秩序における最大の関心事が「多 様の統一」である限り、諸秩序(形式原理)のひ とつである調和は、単純と混沌との狭間におけ るジレンマからは逃れられない存在なのである。

#### 2. 目的

建築及び造形一般における調和の検証は、調和それ自身のみの考察による単視眼的な手法を用いることでは不可能であると考える。なぜならば、調和が諸要素の相互関係についての美的価値判断であることは前節でも述べたが、諸要素の相互関係は先天的に在る訳ではなく、各要素の配置及び配列といった作業を経ることで、初めて現れるものだからである。即ち調和なる

原理の及ぶ範囲は、ある対象(諸要素の総体)に おける配置及び配列の双方を包含するものであ り、調和の考察は前記両者の分析を先ず前提と しなければならない。

そこで本論では、諸要素における配置·配列の傾向分析を通して、形態の調和に関する考察を試みる。なお研究対象として、凡そ 16~18世紀に建立されたとされる国宝及び重文の茶室 12点を取り挙げる。

#### 3. 方法

本論における分析方法を以下に示す。

- 1) 配置状況の検証 コンポジションの解析
- 2) 配列状況の検証 リズムの解析 ここで1)におけるコンポジション(構図・構成)は、対象の見え方や印象などに深く係わっているため、その解析は意匠全体の配置状況の検証に有効であると考える。

また 2 )におけるリズムとは、造形の構成上重要な原理のひとつであり、幾つかの部分がある間隔で配列されたときに生じる。つまり形態の配列状況とリズムの諸相には密接な関係があるといえ、本論ではフラクタル次元によってリズムの特徴を数値化したものを、検証する際のデータとして用いるものとする。

なお、最終的に1)、2)双方の分析結果を照合した上で、茶室意匠における調和に関する考察を行うものとする。

# 4. コンポジションの解析-配置状況の検証-

#### 4.1 概説

本節では形態におけるコンポジションの分析 を通して、諸要素の配置状況の検証を試みる。

さて、コンポジション発生の根拠として古今ともポピュラーなものに、画面分割なる手法が挙げられよう。そこで本論では、「線」による対象画面の分割に着目した上で、数理的な解釈を目論む。なお、分析手法として以下の2点を検

証し、最終的な考察を行う。

1) 意匠全体を構成する矩形群の特徴分析

「面」の探求(4.2項)

2) ルートNの法則を利用した画面分割状況の 傾向分析 「線」の探求(4.3項)

#### 4.2 「面」の探求

#### 4.2.1 分析方法

以下に作業内容を段階順に示す。

- 1) 各矩形の縦横の長さの割合をデータとして 抽出する
- 2) 1)における各データをサンプル別に散布 図にプロットする
- 3) 2)で作成された各プロット図の傾向を、サンプルの形式別に比較及び考察する

なお 1 ) における《縦横の長さの割合》とは、 対象画面(茶室内部の何れか一方の壁面)の大き さを 1 × 1 (横×縦)と規準化したときの、各矩 形の横(底辺)及び縦(高さ)の長さの比率を指す。

#### 4.2.2 比較及び考察

前項で作成されたプロット図より見られる傾向として、以下の2点が挙げられる(なお紙数の都合上、事例の紹介は一部に限る)。

- 1) 草庵茶室における分布状況は、特徴の規定 し難い傾向を示すものと、一部が密集して いるものとの2種に分類できる
- 2) 書院風茶室における矩形スケールの分布状況は、y値(縦の長さの比率)の大小により おおよそ二極分化されている

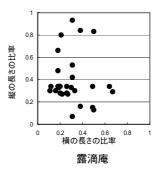
上記1)は、同様の形式であるにも拘らずコンポジション生成の要素である矩形群に著しい相違があることを示している。分布状況としては、茶室 ~ では特徴的なスケールが得られないのに対し、 ~ においては×値が凡そ0.1~0.3の範囲、y値では0.2~0.4の範囲に局所的に集中している点が特徴的である(図1左)。

また上記 2) における傾向として、x値(横の長さの比率)では特徴的なスケールが見られないが、y値においては 0.1~0.2 と 0.8 前後の 2ヵ所の範囲に集中していることが挙げられる(図 1 右)。即ち書院風茶室の内部意匠におけるコンポジションを生成する矩形には、横の長さは様々なスケールが用いられているのに対し、縦の長さは大きく 2種類のスケールが多用されているといえよう。

以上を纏めると、下記のように分類できる。

- a) 茶室 ~ に見られる、特徴的なスケール の存在しない分布状況 《分散型》
- b) 茶室 ~ に見られる、一部の範囲内に集 中している分布状況 《一部密集型》
- c) 茶室 ~ に見られる、2つの範囲に分化 したかたちで集中している分布状況

《二極分化型》



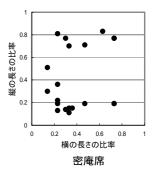


図1 分布状況の比較(左:草庵茶室( ~ )に特徴的な傾向,右:書院風茶室に特徴的な傾向.なお横軸は、総体である画面を1×1(横×縦)と規準化したときの横の長さの比率、縦軸は縦の長さの比率を表す)

### 4.3 「線」の探求

### 4.3.1 分析方法

茶室意匠のコンポジションを生成する要素としての矩形スケールの分布は分散型、一部密集型、二極分化型の3タイプに分類できることが前項で明らかになった。以上はコンポジションの解析を「面」要素からの視点より行ったものであるが、本項では画面分割における「線」要素の特徴分析を通して、更なる考察を加える。

その作業内容は以下のとおりである。

- 1) 各茶室の四方展開図を利用し、「線」要素を 抽出する
- 2) 「線」要素をネットワークに見立て、ルートNの法則を利用した解析を行う
- 3) 2)の結果と前章における各カテゴリーの 特徴との関連性及び傾向を考察する

上記 2 )におけるルートNの法則は、都市パターンを解析する際によく用いられる構成的手法である。その特性は、ある範囲内の面上にN個の点を与えておき、それらを結んでできるネットワークの長さを算出するとき、ネットワークのパターンに関わらずこの法則が成り立ち、さらにパターンの種類に応じて、比例定数(C)が決まるという点である<sup>2</sup>)。このとき用いられる式を以下に示す。

$$L = C\sqrt{NS} \qquad \dots (1)$$

L: ネットワークの総延長 C: 定数

N: 交点数 S: 面積

ここで、本論において重要な役割を担うのは 定数Cである。これは本来の都市パターン解析、 或いはその再現の際は、対象となる都市形態の 特徴に応じてあらかじめ定めておく数値である が、逆に初期段階でL,N,Sの値が与えられて いる場合、それらを代入することで得られる値 (C)は、総体としてのネットワークの特徴を表 す指標となると考えることができる。つまり、 C値を指標と見ることで画面分割状況の特徴を 探ることも可能なのである。

#### 4.3.2 比較及び考察

表1は、各茶室におけるC値及び交点数(N)の総和の一覧である。またC値の高低に着目したものが図2である。なお、床側面の測定値はその形態上分割数が少なく、かつ各茶室において類似しているため、比較対象からは削除した。

ここで、表1及び図2に見られる傾向を整理 すると、以下のようになる。

- 1) 草庵形式の茶室(表中 ~ )の C 値が 0.8 ~2.0 の範囲内で分散しているのに対し、書 院形式の茶室(表中 ~ )はいずれも約 1.4 以上であり、高い値を示している
- 2) 草庵形式の中でも分散型に分類される茶室 (表中 ~ )に比べ、一部密集型の茶室(表 中 ~ )は全体的に高い値を示している
- 3)総交点数(N)は、全体的に書院形式よりも 草庵形式の茶室のほうが多い

<b>—</b> .		/t - //\fax - \fo /t -	=-
表	<b>谷余至の</b>	N 値の総和及び C 値の-	一覧

ス! ロホ主の N 他の心性及びも他の 見							
席名	Nの		C	;			
市口	総和	床側		他3面			
妙喜庵 待庵	23	1.60	1.80	1.34	0.98		
玉林院 蓑庵	15	1.41	1.37	1.22	1.13		
金地院八窓席	20	1.76	1.34	1.21			
聚光院閑隠席	10	1.36	1.34	1.02			
有楽苑 如庵	22	1.63	1.42	1.32	1.26		
浄土寺露滴庵	20	1.55	1.46	1.45	1.39		
三渓園春草盧	22	1.83	1.42	1.36	1.34		
真珠庵庭玉軒	14	1.46	1.84	1.51	1.46		
龍光院密庵席	11	1.42	2.00	1.58	1.54		
孤蓬庵 忘筌	13	1.59	2.00	1.79	1.47		
孤蓬庵山雲床	12	1.48	1.55	1.46	1.40		
玉林院霞床席	7	1.39	2.00	1.37	1.29		

茶室 の各1面の C 値は、N (交点数)=0のため計算不可

以下、各カテゴリーを個別に検証する。

一部密集型に分類される茶室群は、傾向とし てて値が高く、分散型のそれは低いということ は先にも述べたが、表1を見る限り交点数(N) には両者に大きな違いはない。交点数がほぼ同 じということは、画面分割に使用される線分の 本数に大きな違いがないということと同義であ る。即ちこうした条件下での矩形分布状況の違 い、ひいては各矩形のスケールの相違は、画面 分割に使用される線分の長さに依拠するものと 考えられる。分散型に分類される茶室意匠のコ ンポジションは、要素と要素が交わる各点にお いて一方をずらすなどして、ことごとく端部の 一致を避けることで生成されているといえ、こ うした過程を踏むことで似たようなスケールの 矩形の存在を排し、一画面中に様々なスケール の矩形を配置させることが可能となるのである。 一方、書院形式の茶室においては、矩形スケー ルの分布状況は大きく2ヶ所に集中し、さらに

交点数(N)が少なくC値が高いという結果であることから、形態としてはあまり分割が行われておらず、かつ構成要素である矩形の形状も類似のものが多く使用されているといえる。

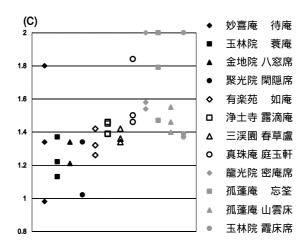


図2 各茶室における他3面のC値の比較 (グラフ横方向の配列は凡例の番号順による)

#### 5. リズムの解析 -配列状況の検証-

本節では形態におけるリズムの分析を通して、諸要素の配列状況を考察する。

茶室内部意匠のリズムとは、その空間を取り 囲む四方の壁をぐるりと見回すことによって、 壁に施された様々なディテールが視覚下に生み 出す一連のながれを指す。その数値化にはフラ クタル次元を用いるわけだが、その算出方法は 以下のとおりである<sup>3</sup>)。

- 1) ディテールの配置よりグリッドを作成する
- 2) グリッドを空間的変動曲線として表す
- 3) 空間的変動曲線から、スケール変換解析に よりH指数及びフラクタル次元を算出する

上記の手順により得られた測定値を、前章におけるデータ(N値及びC値)とともに表 2 に示す(表中の記号はD: 7 フラクタル次元, N: N の総和, C: 床側面以外の 3 面の C 値を表す)。

表 2 各測定値の一覧

席名	配列	配置			
T 411	D	N	С		
妙喜庵 待庵	1.60	23	1.80	1.34	0.98
玉林院 蓑庵	1.55	15	1.37	1.22	1.13
金地院八窓席	1.45	20	1.34	1.21	
聚光院閑隠席	1.45	10	1.34	1.02	
有楽苑 如庵	1.43	22	1.42	1.32	1.26
浄土寺露滴庵	1.49	20	1.46	1.45	1.39
三渓園春草盧	1.47	22	1.42	1.36	1.34
真珠庵庭玉軒	1.41	14	1.84	1.51	1.46
龍光院密庵席	1.25	11	2.00	1.58	1.54
孤蓬庵 忘筌	1.30	13	2.00	1.79	1.47
孤蓬庵山雲床	1.39	12	1.55	1.46	1.40
玉林院霞床席	1.31	7	2.00	1.37	1.29

### 6. 調和の検証

#### 6.1 比較

前記4,5節ではコンポジション及びリズムの分析を通して、諸要素における配置·配列の検証を行った訳だが、以上の分析結果を通して本節では茶室意匠における調和を検証する。

図3は、4節での「線」要素の探求において得られた総交点数の測定値と、5節で算出したフラクタル次元との関係を示す。以下、各カテゴリー別に、同図よりみられる傾向を述べる。

まず分散型であるが、フラクタル次元は 1.45 ~ 1.60 の範囲に分布しており、他のカテゴリーに比べ高い。また総交点数に関しては、その名のとおり分散した分布傾向を示している。

次に一部密集型であるが、フラクタル次元は 1.40~1.50、また総交点数はサンプル を除いて 20~22 と、他のカテゴリーに比べ狭い範囲に分 布している点が特徴的である。

最後に二極分化型であるが、3つの中では最も特徴的な分布であるといえよう。まずフラクタル次元であるが、いずれも 1.40 未満であり、他のカテゴリーのそれとは明確な差が生じている。また総交点数も少なく、いずれも 15 未満である。ただ、これは当然の結果ともいえる。なぜならば、総交点数が少ないということは意匠における分割回数が少ないことを意味し、よって類似した要素(矩形)の集合体になりやすく、結果としてその配列状況、即ちリズムも単調になるためである。

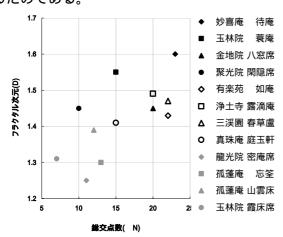


図3 総交点数及びフラクタル次元の比較

#### 6.2 考察

画面分割における交点数が多くなるほど、諸要素の配置や配列状況、さらには総体としての意匠が変化に富んだものになることは、これまでの分析でも明らかである。ただ、闇雲な変化は調和とは程遠く、かといって前項における二極分化型のように分割回数が少ない場合、単調な意匠になる危険性を孕む。

ここで、総交点数が多く且つフラクタル次元 も 1.50 の周辺である、一部密集型の意匠的特徴 について考えてみたい。

まずフラクタル次元についてだが、この 1.50 という値は、事象内に秩序と無秩序がほぼ等量ずつ含まれている状態を指し、諸要素の配列状況における指標としてこの数値を見たとき、単調と混沌との程好い共存状態が窺えるのできばいだろうか。なお、こうした配列を生むきっなけとして諸要素の配置状況、即ちコンポジシンの様相を考えると、このカテゴリーの特徴さある一部密集、つまり一画面中に様々な大きの矩形を用いつつ、共通項として似通った大きさの矩形をコンスタントに散りばめた結果、上記のような配列状態を可能にしたともいえる。

こういった傾向は他の2つのカテゴリーには 見られないものであり、形態構築における各部 位の配置・配列を行う際の、調和的効果を得る 判断の目安として考えることができよう。

#### 7. 結論

本研究で得られた結論は次の通りである。

- 1) コンポジション生成要素である矩形のスケール分布状況は、分散型、一部密集型及び二極分化型の3種に大別することができ、草庵形式の茶室は分散型と一部密集型に、書院形式のそれは二極分化型に分類される
- 2)分散型と一部密集型における分布の相違は、 画面分割に使用される線分の特徴に拠ると ころが多い
- 3) 一部密集型に分類される茶室群のフラクタ ル次元の測定値はいずれも 1.40~1.50 の範 囲内である
- 4) 一部密集型に分類される茶室群の分析結果 は、建築意匠において調和的効果を得る際の 判断の目安として考えることができる

#### 謝辞

本研究は、日本学術振興会 平成 16 年度科学研究費補助金 基盤研究(A)(1)「複雑系科学による人間・環境に適応する建築・都市・社会のシステムデザイン」 (課題番号: 14205087)の援助の下に行われた。

#### 参考文献

- [1] 小林盛太:「建築美を科学する」彰国社,1991
- [2] 古山正雄著:「造形数理」共立出版,2002
- [3] 佐藤祐介·新宮清志·杉浦巌:フラクタル次元に よる茶室空間の美の分析,日本ファジィ学会誌 第 12 巻第 5 号, pp.696-701, 2000 年 10 月

#### 連絡先:

〒274-8501 船橋市習志野台 7·24 1 日本大学理工学部新宮研究室 佐藤 祐介

Phone + FAX : 047-469-5426 E-mail: yoou@mb.infoweb.ne.jp

# SOMを用いて抽出した特徴に基づく感情音声の判別 Emotional speech classification based on features extracted by SOM

神酒勤†

田代 純一郎†

Tsutomu Miki — Junichiro Tashiro

† 九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻

Graduate School of Life Science and systems Engineering Kyushu Institute of Technology

**Abstract:** Emotions included in a voice have an important role for good communications. If an automatic extraction of emotions from speech signal becomes true, the human friendly man-machine interface can be realized. We reported the emotion extraction method from speech signal employing fuzzy inference. However, the system can not show good performance for unspecific speaker. In this paper, in order to improve the performance, we try to investigate the relations between emotions by SOM and to tune the fuzzy rules by using the results.

#### 1 はじめに

音声に含まれる感情は、上手に対話するための 重要な情報といえる。音声から感情情報の抽出が できれば、人に優しいマンマシンインターフェー スの実現に大きく寄与すると思われる。

これまでにも、音声と感情に関する研究は、感情判別 [1][2] などを中心に報告されているが、未知の音声に対して高い判別率を得ることはできていないのが現状である。本研究者らはこれまでにファジィ推論を用いた音声からの発話者感情の判別を試みているが、同様に未知の音声に対して、従来技術よりは高いものの十分な判別率が得られないという問題があった [3]。ただし、本研究者らの手法は、話者および発話音声に限定しない情報を判別パラメータに用いているので、ルールの改善により判別率向上の余地がある。

本研究では、特徴量抽出に優れた SOM を用いて 各感情間の関係を調査し、その特徴マップから得 られた情報を基に判別ルールの改善を試みた。

#### 2 感情判別システムの改良

### 2.1 感情判別システム

ファジィ推論を用いた感情判別システム [3] を図1に示す。マイクロフォンで収録した音声の有ピッチフレームに対し、特徴量の抽出を行う。特徴量として、(1) 短時間平均パワーの平均(powave)、(2) 短時間平均パワーの範囲 (powran)、(3) ピッチの最大値 (pitmax)、(4) ピッチの最小値 (pitmin) の4つを用いる。



図 1: 感情判別システム

本システムでは、上記4つの特徴量から、音声に含まれた感情を6つの感情(平静、怒り、喜び、悲しみ、驚き、嫌悪)のいずれかに分別する。

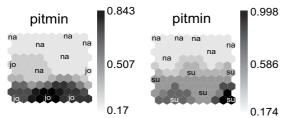
#### 2.2 SOM による各感情間の特徴抽出

収集した音声信号に対し、SOMを用いて各感情間の関係を調査する。6つの感情から2つの感情ペアを作り、そのペアに対し、SOMによる分類を行った。図2、図3にSOMによる分類結果の一部を示す。図2より、「平静」と「喜び」、「平静」と「驚き」はピッチの最小値により分類が可能であることがわかる。図3より、「怒り」と「喜び」、「怒り」と「驚き」はピッチの最大値により分類が可能であることがわかる。

#### 2.3 メンバーシップ関数とルールの決定

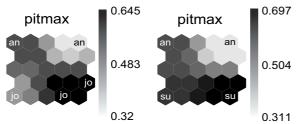
SOMを用いて抽出した特徴を基に改良したファジィルールを表1に示す。組み合わせとしては全36通りのルールが存在するが、ここでは6通りのルールしか使用せず、それ以外は"判別不能"とする。

35個の音声資料を用いて、チューニングをした 後の各特徴量に対するメンバーシップ関数を図4に 示す。また、ファジィ推論法には Min-Max 法を用 いる。



(a)"平静(na)"と"喜び(jo)" (b)"平静(na)"と"驚き(su)"

図 2: SOM による分類結果 1



(a)"怒り(an)"と"喜び(jo)" (b)"怒り(an)"と"驚き(su)"

図 3: SOM による分類結果 2

表 1: 感情判別用ファジィルール

emotion	pow ave	pit max	pow ran	pit min
natural	L	L	L	M
anger	Н	M	Н	M
joy	L	Н	Н	Н
sadness	L	L	L	L
surprise	Н	Н	L	Н
hate	L	L	Н	L

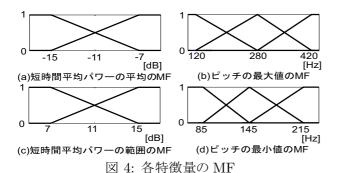


表 2: 判別実験結果

感情	判別	改善率	
恐用	改良前	改良後	以普罕
平静	33.3%(1/3)	33.3%(1/3)	0%
怒り	50.0%(4/8)	87.5%(7/8)	37.5%
喜び	100%(5/5)	100.0%(5/5)	0%
悲しみ	57.1%(4/7)	71.4%(5/7)	14.3%
驚き	57.1%(4/7)	71.4%(5/7)	14.3%
嫌悪	71.4%(5/7)	71.4%(5/7)	0%
合計	62.2%(23/37)	75.7%(28/37)	13.5%

### 3 判別実験

#### 3.1 実験方法

音声工房を用いて音声を録音し、wav 形式で保存する。まず、音声工房でピッチを抽出し、視察によって訂正した後、最大値と最小値を求める。Matlabで音声波形を正規化し、有ピッチフレームに対して短時間平均パワーの平均と範囲を求める。抽出した4つの特徴量からファジィ推論により感情判別を行う。

#### 3.2 判別実験結果

システムの未知の音声に対する性能を評価する ため、未知のリアル感情音声データ 37 個に対して 判別実験を行った。ここでリアル感情音声とは、テ レビの生のデータから収録したもので、比較的自 然に感情が含まれたデータである。表 2 に判別実 験結果を示す。平均判別率は 75.7%(37 個中 28 個 正解)となった。従来ルールを用いた場合に比べ、 平均で 13.5 %判別率が向上している。

### 4 おわりに

本研究では、SOMを用いて抽出した特徴を基に、 ルールの改善を行った。その結果、発話音声およ び発話者も完全に未知の音声に対し、75.7%の判 別率が得られ、13.5%の判別率向上を実現した。

本システムは比較的簡単な手法により、不特定 話者に対し高判別率を実現している。今後は、感情の認識に大きく関わると思われる母音の発話長 などの時間的要素等を考慮することで、より高い 判別率の実現を目指す。

#### 参考文献

- [1] 重永実: 感情の判別分析からみた感情音声の特性 (IX) open な判別について (II), 信学技報 SP, Vol.102 No.619, pp.53-58, 2003
- [2] 森山, 小沢: ファジー制御を用いた音声における情緒性評価法, 電子情報通信学会論文誌.D-2, Vol.J82-D-II, No.10, pp.1710-1720, 1999
- [3] 神酒勤, 田代純一郎: ファジィ推論を用いた発話者 の感情判別, 第 19 回ファジィシステムシンポジウム 講演論文集, pp.549-552, 2003

#### 連絡先:

₹ 808-0196

北九州市若松区ひびきの 2-4

九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻神酒 勤

Tel/Fax : 093-695-6125

Email: miki@brain.kyutech.ac.jp

# 感性情報処理技術を用いた コンテンツマネージメントシステムに関する研究 -マルチメディアコンテンツ配信に関する意識調査-

Contents Management System
based on Kansei Information Processing
-Investigation for Multimedia Contents Delivery Service-

吉田 香 Kaori YOSHIDA

九州工業大学情報工学部 Kyushu Institute of Technology

Abstract: As an application of new network routing control, I've studied about contents management system based on Kansei information processing. The purpose of this study is to develop technique which enable to provide contents and service based on user's subjective requests using best network routing. In this paper, I report the investigation of tolerance against network troubles for multimedia contents delivery service.

#### 1. はじめに

### 2. マルチメディアコンテンツ配信

ブロードバンドユーザの増加にともない,テキストや静止画といったコンテンツから,音楽や映像といったよりリッチなコンテンツの配信への要望が高まっている.そのため,マルチメディアコンテンツのようなリッチなコンテンツを配信するのに適した配信プラットフォームの確立が必要である.

マルチメディアコンテンツ配信サービスは、ブロードバンドネットワークサービスにおけるキラーサービスのひとつであると考えられており、次のような要求があるとまとめることができる.まず、サービス利用者からは、高品質なコンテンツをトラブルなく受信したいという要

望がある.次に,コンテンツ配信サービス提供者からは,配信や課金を行うサービスシステムを簡単に稼働することがあることがあるようにしたいという要求があるコンテンツ提供者かのセキュリを防ぐためのセンテンツ制作者の著作権を保護するようによびである。といるできていないのが現状である。

### 3. アンケート調査

本調査では、サービス利用者の「高品質なコンテンツをトラブルなく受信したい」という要求に着目し、現在のネッ配力で起こりうるコンテンツ配信トラブルに対する許容度を調査した。本調査の目的は、開発中である最適なれているコンテンツは何か、最も早急に解決しなければならないトラブルは何か、を調査し、ネットワーク経路制御技術を応用する優先順位を考察することである.

アンケート調査は、回答者が先入観を持って回答を開始するのを防ぐため、しぼやけた印象を持たせて「インターネットコンテンツに関するアンケート」を用いて行った.アンケート調査画アンの最初のページには「、マルチメディレビ放送のような映像が視聴できるサービス(のような映像が視聴できるサービス)に対するあなたのお考えをお聞かせください。と記述し、専門家ではない回答者にもわかりやすい記述に留意した.

### 3.1 コンテンツ配信サービスに対する 意識調査

まず、利用者がコンテンツ配信サービスを使ってみたいコンテンツのジャンルを調査した.具体的には、「下記ジャンルの中で、コンテンツ配信サービスを使ってみたいジャンルをすべてお選びください。」という質問により、複数回答を許可した.選択肢は、テレビ番組表やVOD(ビデオ・オン・デマンド)等で用いられる主なジャンルを使用した.調査に用いたジャンルを以下に示す.

(ジャンル1) ドラマ・映画

(ジャンル2) スポーツ

(ジャンル3) 音楽

(ジャンル4) バラエディ

(ジャンル5) ドキュメンタリ

(ジャンル6) 情報番組

(料理,ショッピング等)

(ジャンル7) ニュース

(ジャンル8) アニメ

(ジャンル9) その他(自由記述)

### 3.2 コンテンツ配信トラブルに対する 許容度調査

次に,コンテンツ配信トラブルに対する許容度を調査した.具体的には,「マルチメディアコンテンツ配信の際に想定されるネットワークトラブルに対するあなたのお考えをお聞かせください.」という質問により,ジャンル別に「許容できる」「どちらかといえば許容できる」「どちらかといえば許容できない」という4つの選択肢から単一選択させた.

コンテンツ配信トラブル状態としては, 現在のネットワーク環境を用いてマルチ メディアコンテンツを配信する際に起こ りうるネットワークトラブルから,以下 の 10 項目を使用した. 具体的には,「コンテンツ内容が『ドラマ・映画』であった場合,以下の状態に対しての許容度合いをお答えください.」という質問において,下記 10 項目に対する許容度をそれぞれ4段階で回答させた.

- (項目1) 映像は問題ないが,音がときどき途切れる.(無音の時間がある)
- (項目2) 映像は問題ないが,音が遅れて 再生される.(映像と音のタイ ミングがずれる)
- (項目3) 映像は問題ないが,音にノイズがのる.(音が聞き取りにくいことがある)
- (項目4) 映像は問題ないが,音の代わりに文字が表示される.(音は聞こえず,字幕のような文字が映像とともに流れる)
- (項目5) 音は問題ないが,映像全体がときどき途切れる.(ときどき真っ暗になる)
- (項目6) 音は問題ないが,映像の一部がときどきフリーズする.(コマ落ちが発生し,それ以外の部分は普通通り見える)
- (項目7) 音は問題ないが,映像の画面 全体がときどきフリーズする. (ときどき映像が静止する)
- (項目8) 音は問題ないが,映像全体の画質が悪くなる.(不鮮明な映像が流れる)
- (項目9) 音,映像ともに問題ないが,全体が遅れて開始する.(開始するまで数秒間かかる)
- (項目10) 音,映像ともに配信されず,文字のみが表示される.(文字放送)

#### 4. 調査結果

本アンケート調査は,平成16年2月に5日間で行われ,有効回答者数は1014人であった.回答者の男女比は,男性約44%,女性約56%とほぼ同数であり,年齢層は,20歳代が約25%,30歳代が約40%を占めたものの,14歳から76歳までの幅広い層から回答を得ることができた.また,回答者の約60%がADSL回線を利用しており,次いで約16%がCATVインターネット回線,約9%が光ファイバー回線を利用していることがわかった.

# 4.1 コンテンツ配信サービスに対する 意識調査結果

まず,利用者がコンテンツ配信サービスを使ってみたいと思うジャンルを調査した結果を報告する.3.1 節で示した 9 つの選択肢に対し回答させた集計結果を図1に示す.

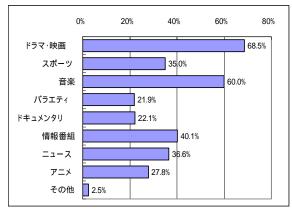


図 1. コンテンツ配信サービスを使って みたいジャンル(複数回答可)

その他(自由記述)には,語学等の教育番組,投資情報,趣味に関する情報,環境映像等の回答があった.また,非常に少数ではあったが,コンテンツ配信サービスは時期尚早との意見もあった.

### 4.2 コンテンツ配信トラブルに対する 許容度調査結果

次に,ジャンル別にコンテンツ配信時のトラブル許容度を調査した結果を報告する.いずれのジャンルも,「絶対に許容できない」のは「音,映像ともに配信されず,文字のみが表示される.(文字放送)」という回答が最も多かった.

例として,4.1 節の結果で最も要望が 高かったジャンル「ドラマ・映画」の集 計結果を図2に示す.

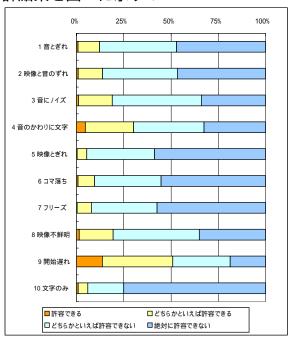


図 2. コンテンツ配信トラブル許容度 (ジャンル「映画・ドラマ」)

#### 5. おわりに

本稿では、現在のネットワーク環境を 用いてマルチメディアコンテンツ配信サ ービスを利用する際に起こりうるネット ワークトラブルに対する許容度を調査し た結果を報告した.調査の結果、マルチ メディアコンテンツ配信を使ってみたい ジャンルを明らかにすることができた. また,ジャンル別に一般利用者のコンテンツ配信トラブルに対する許容度を明シかにすることができた.一部のコンテンで配信トラブルは,開発中の新たなと、開発中の新たなとにの開発できる見通しである.なおにより開発である。 年齢層の他に,約40種類の属性を取得している.今後,取得データを解析するとにより,利用者属性別の感性モデルを考察する予定である.

#### 斜辞

本研究は,総務省「ユビキタスネットワーク技術の研究開発」からの委託研究成果である.

### 参考文献

- [1] Hedia Kochkar, Takeshi Ikenaga, Yuji Oie: Multi-class QoS routing strategies based on the network state, Proc. of IASTED COMMMUNICATIONS, INTERNET, & INFORMATION TECHNOLOGY, pp.497-502 (2003)
- [2] 樋田博信,池永全志,尾家祐二:複 数経路表を用いたトラヒックエンジ ニアリング機構の実装と評価,信学 技報 NS2003-308 / IN2003-263, pp.65-70 (2003)

#### 連絡先:

吉田香

九州工業大学情報工学部

〒820-8502

福岡県飯塚市川津 680-4

Phone: 0948-29-7686 FAX: 0948-29-7651

E-mail: kaori@cse.kyutech.ac.jp

# グループの感性評価に関する研究

### A study on the Group's Kansei Evaluation

堤 和敏\*

木田大輔\*\*

Tsutsumi Kazutoshi

Daisuke Kida

\*芝浦工業大学

\*\*芝浦工業大学卒業生

\* Shibaura Institute of Technology

\*\* Shibaura Institute of Technology, Graduate

The technique of the questionnaire is used well to know inhabitants' intention precisely. But, individual sensitivity is respectively different. Therefore questionnaire must be done for many people, and need much time and labor. This research verified if the group's sensitivity evaluation distribution could be estimated from result of a few of questionnaire in order to reduce the labor of the questionnaire.

#### 1.研究の目的

住民たちの意向を正確にくみ取るためにアンケートと いう手法がよく用いられている。通常、対象ごとに評価や 印象を多数集計し推定しなければならない。対象への感性 は個人それぞれ違ったものであり、意見は分かれるもので ある。そのためアンケートは多くの人を対象にしなければ ならず多大な時間と労力を要する。

既報では、個人を対象として、アンケート結果をニュー ラルネットワークで学習させ未学習アンケート結果を推 定可能か検証を行った。1)2)本研究の目的は、既報の問 題点を改善するため下記の2点とした。

- 1)アンケート被験者の労力を軽減し尚且つ正確性を期す るための適正形容詞の選択を行う。
- 2)グループ内2人のアンケート結果を元に、ニューラルネ ットワーク(以下NNとする)を用いて学習させグループ の感性評価分布が推定可能か検証を行う。検証は未学習 のデータ(検証用写真)に対するグループ感性評価を比較 して推定可能かを行う。

#### 2. 研究対象

#### 2.1 街並み評価システム<sup>2)</sup>

街並み写真を表示し、そ の写真に対する印象を5 段階の形容詞対(27対)、 好感度を5段階の総合評 価で表現する。NNによる 学習を行い、好感度を評価 する。学習は、学習データ のみならず未学習データ に対してどれだけ

正しい出力が予測で きるかで評価される。 2.2 アンケート方法

被験者は建築系の 20 人(管理のために 通し番号を振ってい る)の学生とし、4項 で述べる形容詞対を 減らしたシステムで、 街並み写真30枚、形 容詞 10 対で行った。



図1システム画面

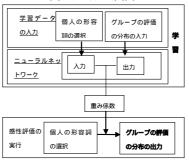


図 2.システム概要

写真は、学習用に15枚、検証用に15枚とする。

#### 3.研究方法

#### 3.1 形容詞対の適正評価

被験者の労力の軽減と類似した形容詞対が多い点から 形容詞の削減を試みる。過去の街並み評価システムのアン ケート結果 2)を元に、総合評価と形容詞対の関係を重回帰 分析で、形容詞対間の関係はクラスタ分析で分析し、削減 する3)。削減した形容詞対を以下の方法で評価する。

#### 評価方法

NN(入出力は 20 人の平均値)で出した数値を正答率(1) の比較によって行う。

- ・正答率 (1) 入力した総合評価とシステムが推定した 値とが完全に一致した割合
  - (一致した推定の総合評価の数/総合評価の数)

#### 3.2 2人によるグループの総合評価分布形の推定

NNに2人の形容詞評価の平均値を入力し、グループの 総合評価分布形を推定する。

#### 評価方法

NNで推定した結果を使って2種類の評価(写真別評価、 全体評価)を行う。

- ·写真別評価:入力した総合評価の平均値及び標準偏差 から算出した正規分布の値とシステムが推定した値 とが5本の評価軸で一致する割合。ただし、一致とは 実際値と±0.05 ポイント以内に入るものと±0.1 ポイ ント以内に入っているものと2種類で評価する。
- ·全体評価: 未学習写真全枚数に対して写真別評価の平 均値を求める。

a)相関係数

#### 4. 適正形容詞対の選定

多数の類似した形容 詞対の削減は、被験 者の労力の軽減につ ながり、精度の向上 が期待できる。削減 手順を図3に示す。

#### 4.1 分析結果

較を表 1 に示し、決 定した形容詞 10 対を表 2 に示す。

c)クラスタ分析 b)重回帰分析 形容詞 5 対 形容詞 5,6,7,8,9,10,11 対 正答率1で比較 形容詞 10 対 正答率(1)での比 図3.削減の流れ

形容詞 27 対

#### 表 1.正答率(1)の比較

形容詞数	5個 1	5個 2	6個	7個	8個	9個	10個	11個
正答率1	0.8	0.78	0.75	0.77	0.76	0.83	0.87	0.80

学習1000回 学習写真1~15 検証写真16~30 1重回帰分析の5個 2クラスタ分析の5個

#### 表 2.決定した形容詞

殺伐とした感じ/雰囲気のある感じ	ばらばらな感じ/統一感のある感じ
陽気な感じ/陰気な感じ	美しい感じ/醜い感じ
質の悪い感じ/質の良い感じ	緑の少ない感じ/緑の多い感じ
落ち着きのない感じ/落ち着きのある感じ	豊かな感じ/貧しい感じ
親しみのある感じ/よそよそしい感じ	平面的な感じ/立体感のある感じ

#### 5. 2人による総合評価分布形の推定

#### 5.1 2人の最適な組み合わせの検討

グループの感性評価を行うに当たり、正確な推定をより 少ない被験者で行うことが可能ならばアンケート調査が 効率的に行える。20人から2人を取る組み合わせ190通 りに対して、グループの総合評価の平均値を推定し、正答

率(1)を算出し

て比較した。 その結果、正答 率 (1) は 最 大 0.47、最小 0 で あった。

5.2 グループ感性評価の未学習データに対する 推定

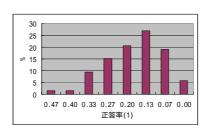


図4.二人の組み合わせの正答率(1)の

グループ感性では平均値だけでなくその分布(標準偏差)も重要である。20人のアンケート結果を元に、入力値は2人の形容詞評価の平均値、教師信号は20人の総合評価の平均値と標準偏差として学習を行う。学習写真の選定は総合評価の平均値のバランスを考慮した。正規分布においては平均値の差が大きいと致命的に違った結果となってしまうためである。

#### 5.3 正規分布で比較する手順

20 人に対する 5 段階の総合評価頻度分布の算出 頻度分布より平均値と標準偏差の算出 学習データを選定し学習

総合評価の平均値と標準偏差の推定

正規分布に変換し、写真別評価、全体評価を行う。二 人の組み合わせは正答率(1)の最大値(No.6 No17)と最小 値(No.6 No7)の2ケースで実行する。

#### 5.4 実験結果

図5,6に写真別評価を示す。図5は5本すべての評価軸で一致したものでありよく推定できている。図6は5本すべての評価軸で一致していない例であり推定できているとはいえない。

図7,8はNo.6 No17組とNo.6 No7組における全体評価であり、± 0.05の範囲と± 0.1の範囲に該当するものを別々に カウントした。

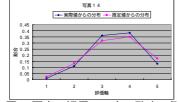


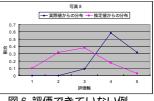
図5.写真の評価で5本一致する例

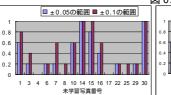
表 3 より正答率(1)による違いは全体評価にはそれほど大 きな差はみられなかった。

#### 6. 結論

本研究では、まず初めに形容詞対の適正評価を行い、形容詞 10 対を選定した。 被験者の労力を軽減し、かつ、

総合評価の平均値の評価である正答率(1)を確実に高めることができた。正答率(1)は8割であり、グループの感性を評価することの妥当性は示された。





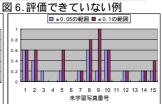


図 7.No6-No17 の組

図 8.No6-No7 の組

第二評価を の正とで がしまして がして

表3.組み合わせに対する全体評価

組	±0.05の範囲	±0.1の範囲
No6-No17	0.36	0.47
No6-No7	0.24	0.35

プの感性評価を行った。正答率(1)が最大値の組みと最小値の組みは、全体評価に関して言えば格段の違いは見られなかった。推定できてない写真も多数見受けられた。これは、アンケート数が少ないために正規分布に仮定したものの、実際の分布では総合評価が二つに分かれる傾向を持つ写真が数多くあり、データの精度が十分でないからだと推測される。総合評価の推定においては20人の平均値を入出力に使うと8割近い結果を得ている。今後は、組み合わせの数を増やすことにより総合評価分布の推定可能人数を検討する必要がある。また平均値や標準偏差を使う場合、学習データと未学習データの選定方法や選定基準をさらに検討する必要がある。

#### 【謝辞】

本研究は,日本学術振興会 平成 15 年度科学研究費補助金 基盤研究(A)(1)「複雑系科学による人間・環境に適応する建築・都市・社会のシステムデザイン」(課題番号:14205087)の援助の下に行われた。また、アンケートデータは、兵頭廣信君(現トステム)の2002年度修士論文、小原陽介君(現電算システム)の2003年度総合研究を利用しています。また、芝浦工業大学桑田仁助教授にもご指導頂きました。 感謝します。

#### 【参考文献】

- 1) 堤、小笠原、沼尻「ニューラルネットワークを利用した街 並み評価システムの開発」日本建築学会第24回情報システ ム利用技術シンポジウム 2001.12,pp.7-12.
- 2) 内海金太郎、堤和敏:アンサンブル学習を適用した街並み 評価システムの学習データ選定に関する研究、日本建築学 会大会学術講演梗概集(東海)A-2、2003年9月,PP.547-548.
- 3) 上田太一郎「Excel でできるデータマイニング」同友館

#### 【連絡先】

〒330-8570 埼玉県さいたま市見沼区深作307 芝浦工業大学環境システム学科 堤和敏 e-mail: tutumi@sic.shibaura-it.ac.jp

# CM ソングにおける楽曲データの遺伝子評価

### Gene Evaluation of Music Data in CM Song

竹内正寬\* 椎塚久雄\*

Masahiro Takeuchi Hisao Shiizukao

\*工学院大学大学院 工学研究科 情報学専攻

\*Informatics, Kogakuin University Graduate School

#### **Abstract**

The purpose of this research is to construct CM song evaluation system, even if the questionnaire survey is not done, here knowing CM evaluation easily can be done. We consider the evaluation of CM song, which pays attention to music that is one of CM materials. The relation to the impression of person who listened to music information on CM song and tune is investigated. It is made to learn by using genetic programming (GP) about the relation between them. It is shown that our system can expect what impression you undertake when we are listening to the evaluated tune based on the learning data of GP.

### 1. はじめに

今日の資本主義経済においては、企業のマーケティング活動の中で、広告戦略は重要な役割を果たしている。我々の周りではITの発展や街頭メディアの増加で、生活の様々な場所で広告を目にする時代となった。商品と企業の知名度およびブランドイメージ、企業イメージの上昇を目的にする広告が多々存在する。中でもとりわけ目立って行なわれてきた広告方法にテレビ広告(テレビCM)の存在が挙げられる。ここ数年では、関東地区だけで見ても年間二万種類以上ものテレビCMが放映されている。現在CMプランナーやスポンサー等がテレビCMの評価を知りたい際には、リサーチ会社がアンケートを行なうという形で調査している。

しかし多くのCMが存在する今日では、評価・調査を行なえるのは一部のメジャーCMに限られてしまうのが現状である.

そこで本研究では、手軽にCM評価を得る事が出来るCM評価システムを考察する. 現在テレビCMの大半には楽曲(CMソング)が使用されている. 今回はその点に注目し、CM素材の一つである音情報、特に「音楽」に関して取り上げ、CMソング評価に関して探求していく.

2.では本研究で用いた遺伝的プログラミングについて触れる. 3.ではCMソングの分類分けを行ない, 4.で

CM ソング評価システムの概要を説明した. 5.でシステムの整合性の実験を示す.

### 2. 遺伝的プログラミング

遺伝的プログラミングは自然界に存在する,進化,遺伝,劣勢,淘汰といった遺伝プロセスをモデルとして,プログラムの自動生成や推論,機械学習などを実現する進化論的計算手法の一つである.同様の進化論的計算手法である遺伝的アルゴリズム (GA) よりも構造的な表現が扱える.この構造的計算手法が遺伝的プログラミングの長所,特徴である.[1]

本稿では、GP を用いて CM ソングに使用される楽曲的要素を構造的に組み合わせる。そのことで、楽曲データとその曲を聴くことでヒトが導く楽曲評価との関係性について、より人間に近い CM ソング評価を行なうことが可能になる。また今後、CMを評価する際に学習ファクターが増えても関係性の学習をスムーズに行なえるという点もGPの利点である。

### 3. CM ソング

本稿ではCMソングを2種類に分類した.

#### i) アーティストタイアップ型

CM ソングにミュージシャンの既成楽曲を使用する スタイル. その CM に有名人が起用されている場合が 多く視聴者に「この人が使っている商品なら使ってみ たい」といった相乗効果を生み出す.この型の特徴は 視覚に与える影響は商品のイメージであり、聴覚に与 える影響はアーティストの楽曲であるという点である.

### ii) 商品オリジナル型(サウンドロゴ)

その商品に合った CM ソングを作り使用するもの. 視覚も聴覚も、ともに商品のイメージを与えるため視聴者に商品のイメージをダイレクトに伝えられる効果がある.

# 4. CM ソング評価システム

本稿で提案する CM ソング評価システムは図1のようなものである. CM ソングの楽曲データと, 人がその曲を聴いた際にどのような印象を持つかというアンケートで得られたデータとの間に, 関係性を見出しシステム構築を行なう. 楽曲の評価項目は,「インパクト」,「好感度」,「印象に残る」,「興味・関心」の4項目を採用した. 楽曲と評価との関係性の学習については GPを用いて計算する.

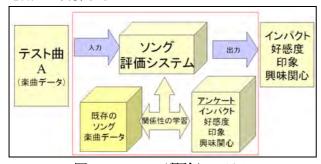


図1 CM ソング評価システム

### 4.1 システムの流れ

本システムの流れは以下である.

- ① 評価を知りたい曲Aの楽曲データを入力
- ② 既知の楽曲の「楽曲データ」と「その曲のアンケート結果」の関係性をGPで学習させる.
- ③ GP の学習結果を基に曲Aの「インパクト」,「好 感度」,「印象に残るか」,「興味・関心」の4項目 における評価が得られる.

### 4.2 楽曲データ

学習データとして用いた楽曲データは以下である.

- ・テンポ・・・・1 分間あたりの四分音符の数
- **単位秒メロディー音数・・・・** 1 秒間あたりのメロディーを担当するパートの音符数
- ・曲集・・・・3 で触れた「アーティストタイアップ型」、「サウンドロゴ型」の区別。
- ・楽器種・・・・演奏楽器の種類
- ・**声色・・・** 男声, 女声, 子供声の種別
- ・調・・・・長調,短調の区別

# 4.3 評価項目

各評価項目の評価基準はそれぞれ以下のように設定する. アンケートにおいてもこの基準を基に回答を得た.

- インパクト・・・CM ソング数秒間でインパクト,魅力があったか.感動,共感,驚き.
- ・好感度・・・・好感が持てるか. 理屈抜きで好きな音であるか. 好きか嫌いか.
- ・**印象に残る・・・・**聞き終わった後、曲が強く印象に残っているか。
- ・興味, 関心・・・・最後まで飽きないで聞きつづけられるか.

# 4.4 アンケートによる楽曲評価

被験者に実際に曲を聴いてもらって、「インパクト」、「好感度」、「印象に残る」、「興味・関心」の4項目に関して被験者にアンケート回答してもらった.アンケート手法は評定尺度法で行なう.それぞれの項目に対して1~5の数字で、それぞれの項目の感情が高い方が数値も高いものとして回答してもらった.今回はサンプル曲69曲でアンケート調査を行った.

### 4.5 GPのシステムへの適用

### 4.5.1 ノード

関数集合として楽曲データのそれぞれの要素をノードとして準備する。また結果に多様性を持たせるために、それ以下の枝を集約して結果を導く「+」ノードも採用した。ターミナル集合としては、評価項目のそれぞれの評価数値「1」~「5」に加え、「+」ノードと同じく結果に多様性を持たせるための「-5」~「-1」も採用する。採用関数集合を図2に、ターミナル集合のインパクト分野の例を図3に図として示す。

関数ノードの枝は2本とする.

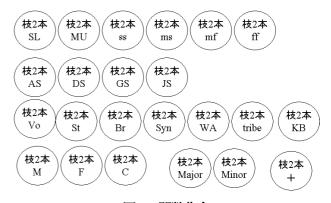


図2 関数集合

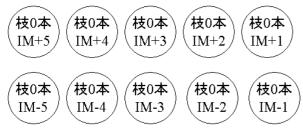


図3 ターミナル集合

# 4.5.2 GPパラメータ

GP学習を行なう上でのパラメータを表1に示す.

表1 GPパラメータ

20,1 0	- // /
パラメータ	値
目的	学習データに適合するように、関数を
	進化させる.
集団サイズ	1000
交叉確率	70%
突然変異確率	30%
選択方式	トーナメント選択 (サイズ3)
停止基準	30 世代以上遺伝が行われた事が前提
	で 5 世代に渡って一番優秀な個体の
	成績に変化がなかったとき停止.
最大世代数	ランダム
交叉後の木の深さの最大値	ノード20個を保ちつつ行われる.
突然変異後の木の深さの最大値	
初期化の方法	Grow

#### 4.5.3 枝評価の例

GP の学習プロセスにおいて得られた木を評価する際に関数ノードでその項目が含まれているか含まれていないか、またはその項目を評価して yes かno で左右どちらの枝を下るかが決定される. contain つまりそのノードの要素が含まれている (yes) ならば左方向へ、uncontain つまりそのノード要素が含まれていない (no) ならば右方向へ下るように設定した. 図4に簡単なソング評価遺伝子の例を示す.

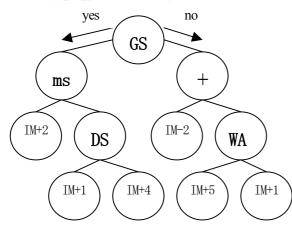


図4 ソング評価遺伝子の例

遺伝子に「+」ノードが含まれている場合は、その部分以下のノードの contain (yes), uncontain (no) を辿り、ターミナルノードまで評価したらその値を「+」ノードまで返す.そうして「+」ノードの左右から返ってきたターミナルノードの値を合計した値が評価値となる.

また、遺伝子を評価する際の適合度関数  $f_p$  は式

(1) を採用した.

$$f_p = \frac{\sum_{i=1}^{n} |p_i - o_i|}{n} \cdot \cdot \cdot \cdot (1)$$

ただし、アンケートで得られたi曲目の評価値: O:

GPプログラムで得られたi曲目の評価値: p

学習データ曲数 : n

# 5. ソング評価実験

# 5.1 実験手順

「インパクト」,「好感度」,「印象に残る」,「興味・ 関心」の四項目に関して, GP による CM ソング評価 プロセスが実際どこまでの精度で計算を行なえるのか の実験を行なう. 実験の手順としては,以下に示す手 順に従う.

- ① サンプル曲で用いた69曲のうちから1曲を選ぶ.
- ② 選ばれた 1 曲は GP における評価システムの学習 データとしては用いない.
- ③ 選ばれたテスト曲1曲をCM ソング評価システムシステムに入力する.
- ④ 残りの 68 曲の楽曲データとアンケートデータの 関係性をシステムが学習する.
- ⑤ 得られた関係性を基にシステムが入力曲を評価, 出力する.
- ⑥ その結果、出力として得られた評価「インパクト」、「好感度」、「印象に残る」、「興味・関心」の数値と、その曲のアンケートで得られた評価値を比べ、システム整合性を調べる.
- ⑥ これを1曲あたり数回入力し評価出力の算術平均 を計算する.
- ⑦ ①~⑤をサンプル曲 69 曲分全てで行なう.

本システムの計算の流れでは学習過程において入 力曲を受け取るごとに遺伝のプロセスを経て学習を行 なう(③~④の過程). そこで,実行毎に結果が異なる 遺伝子(最優良個体)が得られることもある.よって, 本システムの整合性を調べる為,同一曲を数回入力させて,それぞれの項目においてどのような評価が得られるか調べることにする。今回は同一曲に関してそれぞれ5回入力させてその算術平均を出力として得た.

### 5.2 実験結果

出力として得られた評価数値 (システムの評価) と, その曲のアンケートで得られた評価値 (ヒトの評価) との誤差 $\varepsilon$  を式 (2) を用いて計算した.

$$\varepsilon = (GP)_a - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad \dots \quad (2)$$

ただし、(GP)<sub>a</sub>: GP の出力平均

E: 各評価項目の評価値

n:アンケート被験者人数

誤差計算の結果を表2に示す. 誤差データをグラフ 化したものを図5に示す.

表2 システム出力誤差

		誤				差(%)					
以内→	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
インバクト	30	39	46	50	60	90	94	95	96	97	100
好感度	47	54	58	59	66	92	95	98	98	99	100
印象	35	41	44	45	48	88	92	93	93	93	100
興味関心	43	55	61	64	64	96	99	99	99	99	100

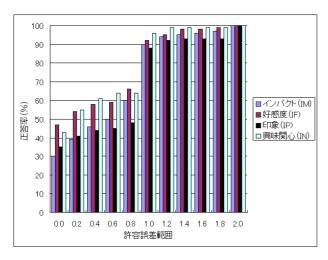


図5 システム出力誤差グラフ

表2および図5のデータを考察する.

用意した遺伝子ターミナルノードは「-5」、「-4」、「-3」、「-2」、「-1」、「1」、「2」、「3」、「4」、「5」の 10 個である. そのため最大誤差は「9」である. 今回の実験ではアンケート結果、システム出力の両方において算術平均で計算したため、誤差を 0.0~2.0 までの 0.2 刻みで検討している. しかし、システムが実際に出力する評

価値は整数値である。そこでここでは整数誤差に着目する。今回システム稼働の結果、最大誤差は「2.0」であったため、それより大きい誤差は考慮しなくても良い。よって「0.0」、「1.0」、「2.0」の3種類について議論することにする。

誤差「0.0」すなわち、GPの学習で得られた曲の評価値とアンケートの結果得られた評価値が一致した曲は「インパクト」分野で30%、「好感度」分野で47%、「印象」分野で35%、「興味・関心」分野で43%であった。つまり予想的中率は3~5割程度である。

また、誤差の許容範囲を「1.0」の範囲まで広げると出力は四項目とも9割前後の正答率まで得られたことがわかる. 誤差「1.0」とは、例えばテスト曲Aを入力した際に、本システムが「2.0」の評価を出力したとする. それとは別にこのテスト曲Aに関してアンケートを行った結果、アンケートでは「3.0」の評価が得られたというような場合である. 5 段階評価のうち、1 段階分評価予測がずれている状態である.

誤差「2.0」までの許容ではじめて、四項目の全てに おいて100パーセントとなった。

# 6. まとめ

今回の研究では CM 素材の重要な一端を担う「CM ソング」に注目し、「CM ソング」の評価を遺伝的プログラミング (GP) という手法を用いて行った。今回の研究で CM 音楽の楽曲情報と人の印象についての結び付けを行なうことができた。楽曲データを入力した際にある程度の精度でヒトの印象評価と一致することができたのは GP の学習能力もあるが、楽曲のデータとヒトの印象には何らかの関係性があるという結果とも言える。

今後は、CM ソングを評価する際に用いる、楽曲データを多様化させ、またその他評価パラメータとして設定できそうなデータを探求し、本システムをより高い精度でソング評価を行えるシステムに改良していく。また、CM ソング以外の、映像、ナレーション、文句等に関してのヒトの印象も調査しマルチ素材を統合的に扱い、評価を下すシステム作りを行っていけたらと考える。

# 参考文献

[1]Wolfgang Banzhaf /Peter Nordi/Robert E.Keller/Frank D.Francone 著 伊庭斉志・新田徹訳:"遺伝的プログラミング",科学技術出版,2000

#### 連絡先 :

東京都新宿区西新宿 1-24-2

工学院大学工学部情報工学科数理情報研究室

Tel: 03-3340-2971

E-mail: shiizuka@cc.kogakuin.ac.jp

# 音楽とダンスの感性的評価について

# Fitness Evaluation Between Music and Dance in Kansei

渡邊 知早\* 椎塚 久雄\*

Chihaya Watanabe Hisao Shiizuka

\*工学院大学大学院 工学研究科 情報学専攻

\*Informatics, Kogakuin University Graduate School

#### **Abstract**

This paper presents evaluation method of *Kansei* matching between music and dance. It is generally speaking that it is difficult to express feeling from the art like music by the language and action. There is a dance in one of such expressions. However, the career and sense are needed for creation of the dance. In addition, it is said even by the person who has such career and sense that it is difficult to create the dance for which it appeals to *Kansei*. Our system associates music information and *Kansei* words by using the principal component analysis to know the image of music. It is shown that in addition, a corresponding dance image to *Kansei* word is automatically chosen and the display method is described simultaneously with music.

# 1. はじめに

音楽などを代表とする芸術は考えるものではなく感じるものでありそれを表現する事は難しい.

今日、音楽は私たちの生活の一部となっている. 若者の中には音楽がない生活は考えられないという人もいるほどだ.音楽のかかっている空間はその音楽のムードになる.映画やテレビのBGMとしても使用され、その場面にイメージを付け加える効果をもたらしている.このように音楽は独自でイメージを持ちその空間の雰囲気を作り出すことができるのだ.

またダンスは感性を表現する方法のひとつである。しかし、ダンスでの感性表現も人への伝わりや感性的な適合はエキスパートでなくては難しい。そこで感性的に合っていると感じるということは、音楽とダンスが感性的にマッチしているかということであると考えた。

本研究では音楽とダンスの感性的な対応関係に注目し、音楽情報から自動的に感性情報を感性語として取り出し、ダンスに対応付ける評価システムについて考察する。今回は音楽とダンスの感性を感性語で対応付け抽出する方法を提案している。ここでは、2. では音楽のイメージをどのようにして知るか、3. と 4. では感性語に対応付けるため

の主成分分析による音楽情報と感性語の分析について述べる. 5. では音楽情報の抽出方法, 6. ではシステムの概要, 7. ではダンス映像について, そして 8. では実際のシステムの起動と実験について述べている.

# 2. 音楽情報と感性語

音楽にもイメージがあり、そのイメージをわかりやすい方法で見えるものにするためには感性語で表す方法が適当である。人間がイメージを言葉で言う場合"楽しい"、"明るい"、"弱々しい"など形容詞で表現する。このような感性語は人間特有の共通ではないかもしれないあいまいな表現であるが、規則性によっては同じように感じる可能性は大きい。

そこで本研究では感性語を利用し音楽情報から 規則を見出し感性語と対応付けることを考えた。

# 3. 感性語の対応付け~アンケート

音楽と感性語を対応付けるためには音楽情報と 感性語との規則性を見出す必要がある. そこでこ の規則の裏づけとして SD 法によるアンケートか ら主成分分析を行いどのような音楽情報の時にど のように人は感じるのかを調べた.

まず、サンプル曲として短調、長調の曲を2ず

つ用意し、その 4 曲をそれぞれ主用テンポ (80,120,160,200) に変速して計 16 曲をサンプル 曲として用意する。そして、そのサンプル曲を被 験者に聞いてもらい用意されている感性語対に対して 5 段階で判断してもらった。

表1 アンケート内容

	非常に	やや	どちらでもない	やや	非常に	
弱々しい						力強い
にぎやか						さびしい
激しい						穏やか
さわやか						重くるし
冷たい						暖かい

# 4. 感性語の対応付け~主成分分析

主成分分析は、変数毎に与えられたデータ表で、 データ表全体が持っている特徴を数量的に分析す る手法である。[1]

アンケートの結果を主成分分析により分析する。 主成分分析ではデータの情報量が主成分に吸収される。今回のアンケートでは情報量は第2主成分 までで大体が吸収され、第2主成分までを考えればよいといえる。よって変数とサンプルの第1・ 第2主成分から散布図を求めると図1・2のようになる。

表 2 主成分の係数

	第1	第2	第3
力強い	0.21131	0.43156	0.19449
弱々しい	-0.21131	-0.43156	-0.19449
にぎやか	-0.24095	0.39397	-0.07504
さびしい	0.24095	-0.39397	0.07504
激しい	0.25352	0.36642	-0.18647
穏やか	-0.25352	-0.36642	0.18647
爽やか	-0.32706	0.10234	0.54216
重苦しい	0.32706	-0.10234	-0.54216
暖かい	-0.33604	0.08941	-0.30416
冷たい	0.33604	-0.08941	0.30416
幸福	-0.33635	0.07626	-0.18791
不幸	0.33635	-0.07626	0.18791

表 3 変数得点表

曲	第1	第2	第3
長80	-2.5819	-1.3458	-0.5397
長120	-2.9627	0.6468	-0.4909
長160	-3.3631	-0.2506	0.6959
長200	-2.6563	1.0793	0.2882
短80	2.7674	-3.1885	-0.2224
短120	2.7746	-1.2932	0.4577
短160	2.7333	2.5830	-0.4038
短200	3.2886	1.7690	0.2150

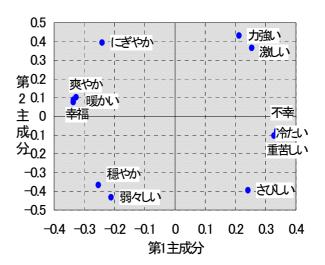


図1 変数の[第1主成分]と[第2主成分] (p=12)

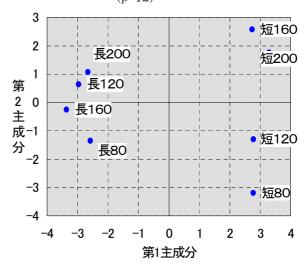


図2サンプルの[第1主成分]と[第2主成分] (n = 8)

変数プロットからは主成分の特徴、サンプルの散布図からは各サンプルの特徴を分析する。これより各サンプル曲のイメージに対する感性語に対応付ける。

表 2 音楽情報による感性語対応表

短200	・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	長200	楽レイメージ
短160	力強激レイメージ	長160	暖をイメージ
短120	・	長120	明く暖かくくんしご
短80	弱々くさびしィメージ	長80	穏やかなイメージ

このようにして音楽情報を取り出すことによって感性情報をも取り出す規則性を見出した。

# 5. 音楽情報の抽出

使用したい音楽から上記で使用した、テンポ・調といった音楽情報を取り出さなくてはなら

ない。そこで MIDI 音楽では音楽情報をバイナリに記述することで音楽が作られているのでそこからこの情報は抽出できるのではないかと考えた。よって現段階では本システムでの使用音楽は MIDI データファイルに限定する。

バイナリとは 16 進数で書き記されており、 MIDI に場合には以下のようになっている。

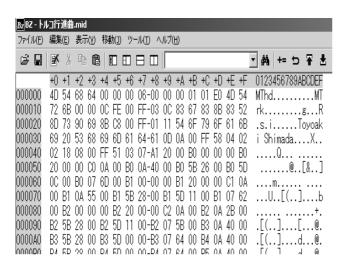


図3 MIDI音楽のバイナリ

全ての音楽情報は決められたイベントを用いて 表されている。テンポ・調は演奏データに含まれ るものではないのでメタイベントと呼ばれるイベ ントに納められている。テンポは FF5103tttttt に格 納され tttttt の部分にテンポ情報が記される。また 調は FF5902sfmi に格納され sfmi に調の情報が記 される。よってバイナリ内でこれらのイベントを 見つけることによってテンポ・調の情報は知るこ とができる。

# 6. システム構成

本システムは、音楽の感性的情報から音楽の イメージに合ったダンス映像を表示するシステム である、流れは以下のようである。

- ① 使用曲を入力
- ② 音楽情報から感性語の対応付け
- ③ ダンス映像の対応付け
- ④ ダンス映像と音楽の同時出力

ここで、先も述べたように使用する音楽は MIDI データを使用する.

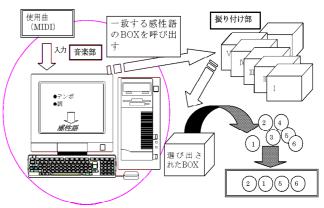


図4 システム構成

まずユーザーはダンスを付けたい音楽を MIDI データで入力する. 入力された MIDI からはバイ ナリの解析でそこに書かれているテンポ情報と調 情報(長調であるか短調であるか)を得る.一方, 図4に示されている振り付け部では、感性語に対 応づけられたダンスのパーツ映像がデータベース に保存されている. 音楽部で得られたテンポ情報 と調情報から感性情報として感性語を知ることが できる. 感性語がわかった時点でその感性語に対 応しているダンス映像を呼び出す. パーツ映像は いくつかあり、その中でランダムに抽出し完全な ダンス映像にすることで、音楽の感性とマッチし たダンス映像を作ることができるというシステム である. ランダムに表示させることで同じ音楽で もイメージは合ったものでもバリエーションのあ る作品が出来上がることを目的としている.

ダンス映像は次章で述べるように krops により 作製した。



図 5 choreographer 1.0 画面

音楽と同時に映像が出力される。

# 7. ダンス映像

ダンスはバレエの基礎を利用した。映像はモーションキャプチャーソフト"krops"を使用し、ダンスの基礎パターンをひとつの映像とし、いくつも用意した。これらを音楽と同様にダンスのイメージに合う感性語に対応付ける。

映像は作られた時点ではavi形式で保存されるが、これではファイルが重くなりシステムの起動に支障をきたすため、動画は全て静止画の連続再生という形に変えデータベースにおかれている。静止画はbitmapである.

音楽情報から感性語が自動的に抽出されると その感性語に対応したダンス映像が取り出されラ ンダムに再生されていく.



図6 ダンス映像例

# 8.実験と考察

#### 実験

完成した音楽付きの映像を音楽情報などの情報を ものに近づけなくてはな 公開せずに見てもらいアンケートに答えてもらう。 分の強化を進めていく。

◆ その音楽がどのようなイメージであるか。

(選択方式)

◆ 映像と音楽があっているか。

(あっている or あっていない)

結果:

表 4 実験結果

全体	イメージ情報の抽出	動画とのマッチ度
%	87. 5	68.75

結果,アンケートで回答された音楽のイメージ と主成分分析で解析の結果得られた音楽情報によ る感性語とはほぼ一致した.よってテンポと調による感性語の抽出はほぼ正確であると考えられる.しかし、音楽情報はもっとたくさんあり、音楽のイメージを左右する情報は他にもあると考える.よって他の音楽情報に対しても感性情報との関わりを調べていく必要がある.もっと細かにテンポを分けて分析を行い、どの程度のテンポの違い感性的な変化が起こるのかを調査する必要がある.

また、音楽とダンス映像のマッチは7割程度音楽と映像が合っていると解答された。そのアンケートの回答と音楽情報を見比べてみるとテンポ情報がぴったり80,120,160,200であるものは合っていると感じ、そのテンポには当てはまらず190の場合200のように近似で抽出した場合には合っていない、少し違和感をもつという結果であった。よって音楽とダンスの同期が合うような方法を考え出す必要がある。

今後の方針としては同期を合わせより音楽との 感性的な同調を目指す.その方法として,現段階 でも動画は静止画の連続として保存されている. これを利用してテンポ情報が抽出されたさい,元 の静止画の連続再生速度との割合を出し元の速度 を倍速で再生させる方法を考えている.

# 9.まとめ

今回は音楽の感性情報を音楽のテンポ情報・調情報から得ることが出来た.またプログラムの起動をし,動画の連続再生,音楽との同時再生を行うことができた。

今後はよりダンスのエキスパートの知識を利用して"振りを作るシステム"としての利用が可能なものに近づけなくてはならない。よってダンス部分の強化を進めていく。

### 参考文献

[1]長谷川 勝也: "ホントにわかる多変量解析", 共立出版株式会社, 1998

#### 連絡先:

東京都新宿区西新宿 1-24-2

工学院大学工学部情報工学科数理情報研究室

Tel: 03-3340-2971

E-mail: shiizuka@cc.kogakuin.ac.jp

# 相互検索のための画像と音楽の印象語を介した関連付け手法

A Cross-media Relevancy Measurement Algorithm for Multimedia Retrieval

土居 元紀 Motonori Doi 北島 吾郎 Goro Kitaijma

大阪電気通信大学大学院工学研究科

**Graduate School of Engineering, Osaka Electro-Communication University** 

**Abstract:** This paper presents a cross-media relevancy measurement algorithm for multimedia retrieval. We defined the characteristics of media-contents as the vectors in "impression word space." The relevancy between media-contents is measured as the interior angle of the vectors. The vector for image is calculated by histograms on color arrangement and the vector for music is calculated by histograms on codes and rhythms. These histograms are constructed by fuzzy technology according to the result of questionnaires for some subjects about the impressions of the media-contents.

# 1. はじめに

多様なメディアがコンピュータネットワークを介して配信されるようになり、今まで個別に扱われてきた画像、音楽、文章等のメディアに対し、関連付けを行って相互検索を行う必要性が生じてきた。色と音などの異なるメディアを言語を介さずに関連付けする研究も行われているが[1]、筆者らは、汎用性と柔軟性を重視して、印象語を介したメディアコンテンツ間の関連付けに注目した。本稿では、特に画像と音楽に関する印象語との対応付けについて報告する。

# 2. メディアコンテンツ間の関連性の定義

提案するメディアコンテンツ間の関連付け手法では、各メディアコンテンツの特徴を各印象語に対する可能性分布で表現する。これにより、各メディアコンテンツは各印象語を基底とする印象特徴空間におけるベクトルで表され、それらのマッチング関数は、関連度をR、二つのメディアコンテンツの特徴ベクトルを $I=(I_1,I_2,\cdots,I_N)$ と $M=(M_1,M_2,\cdots,M_N)$ とすると、以下のようになる。

$$R = \sum_{j=1}^{N} |I_{j} - M_{j}|$$
 (1)

本研究では印象語として「明るい、穏やかな、暖かい、輝かしい、派手な、躍動的な、華麗な、優雅な、古典的な、格調のある、甘美な、楽しい、きれいな、爽やかな、清潔な、癒される、かわいい、暗い、地味な、重々しい、シックな、クールな、静かな、なつかしい、悲しい、落ち着いた、柔らかな、気持ち悪い、怖い、落ち着かない、汚い、固い、激しい」という33語を用いた。

# 3. 印象語との関連付け

# 3.1 アンケート

メディアコンテンツと印象語の関連付けのた

めに、提示された各画像、音楽に対して 3 つの 印象語を選ぶアンケートを行った。アンケート では 100 枚の画像と 15 曲の音楽を 14 人の被験 者に評価してもらった。

提示した画像は画像の持つ意味に印象が影響されないように、あえて抽象的な図柄を用いた。これらの図柄は形状、配置、色彩のさまざまな組み合わせにより生成した。形状は三角形、四角形、円から選択し、それらの形状は規則的か不規則的かの2種類で配置した。図形と背景の色彩は光の三原色であるRGB(赤、緑、青)とこれらの混色よりなる15色を用いた。これらをランダムに組み合わせて画像を生成し、特徴が偏らないように100枚の画像を用意した。

提示した音楽はコード進行とリズムの組み合わせにより生成した短い楽曲とした。コード進行は、八長調のコード進行として3種類(コード1~3)イ短調のコード進行として2種類(コード4,5)を用いた。リズムは、コードに沿って重音(リズム1)スタッカート奏法(リズム2)アルペジオ奏法(リズム3)の3種類を用いた。これらの組み合わせにより15曲を生成した。

各印象後について選ばれた画像、音楽をまとめて、各メディア内において共通する構成要素を調べれば関連付ける要素を明確にすることが出来る。例として「穏やかな」という印象語に対応する画像群は図1に示すような画像となり、音楽群は八長調のコード1とリズム1またはリズム3の組み合わせが選ばれた。画像群は配色が類似色調和であるものが多く、音楽群はコード進行が共通した。

### 3.2 画像と印象語の関連付け

アンケート調査の結果、画像群については配色が重要な要素であることがわかった。よって画像の配色と印象語の関連性に注目する。配色は画像を縦横それぞれ4分割した16ブロックについて、色相、彩度、明度の最頻出値と定義する。

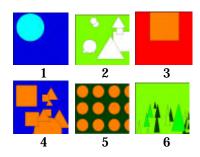
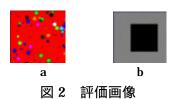


図 1 印象語「穏やかな」に関連付けられた画像



色相は0~2 の角度として求められ、彩度、明度は0~1 の値として RGB 値を変換することにより求められる。

筆者らは、以前印象語を画像群の平均的な配色ベクトルとし、このベクトルを説明関数、入力画像の配色ベクトルを目的関数として多重線形回帰により画像の各印象語に対する重み分布を求める方法を提案した[2]。この手法では、際群の配色のばらつきが大きいので、平均的配色ベクトルで印象語を代表させることが困難なことと、色相の値が0~2 の角度で表され、2 をまたぐ色相間の距離が正しく評価されないことから、適切な重み分布が得られないことがあった。本研究ではこれらの問題を解決するため、印象語を配色のヒストグラムで表現することにした。

提案手法では、色相を赤・黄・緑・青・紫の5色に対応するように量子化する。さらに、無彩色の場合も加え、6つのカテゴリについての度数分布を調べる。彩度と明度は5階調に量子化する。ヒストグラムは、16ブロックに関する3種類の色彩特徴値を印象語に対応した画像群について求めて生成する。このヒストグラムでは、印象語によって対応する画像数が異なるため、それを補正するために度数を画像数で割って正規化する。

印象語を表すヒストグラムと画像の配色の一致度は、次のように求める。まず画像の各ブロックの色彩特徴値を求め、各印象語それぞれについてヒストグラムから特徴値に対応する度数を合計し、これを特徴数3とブロック数16の積で割った値を求める。この各印象語について求めた値を全印象語における値の最大値で割り、その印象語に対する重み(可能性)とする。これにより画像の配色を変数とする印象のメンバシップ関数が定義される。

表 1 印象語に対する可能性分布

画像	明るい	暗い	派手な	地味な
a	1.0	0.5	1.0	0.6
b	0.2	1.0	0.3	0.8

# 3.3 音楽と印象語の関連付け

本研究では音楽ファイルとして MIDI ファイルを用いて、これを解析することによって音楽を特徴付ける。印象語を表す音楽特徴は、アンケートにより印象語に対応した調性とコード進行およびリズムに関するヒストグラムとし、楽曲中に現れるこれらの度数の合計を求めて正規化したものを印象語の重みとする。

# 4. 評価実験

画像と印象語の対応付けについて評価を行った。ただし、印象語は「明るい、暗い、派手な、地味な」の4語に限定した。評価した画像を図2に示す。画像 a は多様な色彩の小円を前景、赤を背景とし「明るい、派手な」に対応する。画像 b は黒の正方形を前景、灰色を背景とし、「暗い、地味な」に対応する。印象語に対する可能性を求めた結果を表1に示す。全般に対応する印象語の可能性が高くなったが、対義語の値との差をより強調する必要があると思われる。

音楽については、現在データ数が少ないので、 今後データ数を増やして検証する予定である。

### 5. まとめ

画像と音楽の相互検索のため、印象語を介した画像と音楽の関連付けの一手法を提案した。本手法では、印象語を画像の配色ヒストグラムで表現し、画像の持つ印象を画像の配色と印象語の配色ヒストグラムの一致度で表現する。これにより、画像は印象特徴空間にマッピングされ、その特徴空間におけるユークリッド距離で異なるメディアコンテンツ間の関連性を決定できるようにした。

### 参考文献

- [1] 岩井、長田、和氣、井口:色と音のノンバー バルマッピング,情報処理学会関西支部支部 大会論文集,pp7-10,2002
- [2] 北島吾郎、土居元紀:画像の構成を手掛かり とした音楽の検索 情報処理学会関西支部支 部大会講演論文集,pp.39-42,2003

### 連絡先:

土居 元紀

大阪電気通信大学大学院工学研究科 〒572-8530 大阪府寝屋川市初町 18-8

# 環境科学教育へのサウンドとファジイの応用

# Sound and Fuzzy Applications for Environment Science Education 高橋 恒介

#### Kousuke Takahashi

静岡産業大学国際情報学部

Shizuoka Sangyo Universities, Faculty of communications and Informatics

Abstract: A meteorological data diagnosis system with fuzzy and sound responses is presented so that students can quickly understand how much meteorological input data differs from the average. In the system, three membership functions are used to evaluate the difference between the input data and the average. The evaluation result is discriminated by 11 sounds. It is discussed whether or not application of sound and fuzzy response is useful for more comprehensive environment science education.

#### 1.まえがき

気候や環境が変化するとそこに住む生物の生育状況が変化し、その影響は食べ物の生産量、品質や人間の健康に及ぶ[1]。この事を理解させるためには環境科学教育が重要である。1980年代以降生まれの学生の多くはTVや新聞で環境悪化のニュースを聞いていても、真に良い環境を知らないので、環境悪化がどの程度進んでいるか理解し難いし、環境悪化を防止しようとする行動もとり難い。

環境科学の教育効果を上げるためには、まず、身近なところで、地球温暖化や大気汚染によって起こる気候、環境変化を学生に実感させることが重要である [1,2,3]。

一般に、地球温暖化、大気汚染などによる 環境変化に関する計測データは主要都市に関 するものであり、上記計測データの統計処理 結果やグラフで気候変化の推移は説明される。 地理的要因による地域差を考慮していないた め,居住地域のミクロな気候変動と気象庁の 発表するマクロな気候変動は必ずしも一致し ない。ましてや、地球温暖化による気候変動 を TV ニュースや身の回りの環境変化から推 理することは容易でない。気候は気まぐれに 変化し、ファジイであり、予報通りに変化し てくれないからである。 この論文では、地球温暖化などの気候変化を実感させる方法として、現在の気候計測データを入力すると平年値と比較して診断結果を音で出力する簡易な気候診断システムを提案する。サウンドやファジイをシステムの出力に使う方法と意義について述べる。

### 2. 気温の異常診断システムの概要

図1は気候診断システムの一部の静岡県での記温データ入力用ウインドウである。住んでいる地域に近い都市名で選択される。このウインドウで月日を入力するとその都市の平年の気温(最高と最低)を表示する。表計算ソフト(マクロ、VBA)を使って実現したシステムであり、平年気温について質問があると、まずは、理科年表などの気象観測記録データ(都市別月別、平年の最高と最低気温など)を参照する。気候データは最高と最低の気温データの他に、雨量や日照時間なども含むが、本論文では、気温に係わる部分について述べる。

図1に示すウインドウ中の上段左の空欄に 月(1~12)を入力すると、右側のテキスト ボックスに平年気温を表示する。下段の空欄 に今週、または、今月の最高と最低気温を入 力すると、右のテキストボックスに平年値と の気温差が表示される。

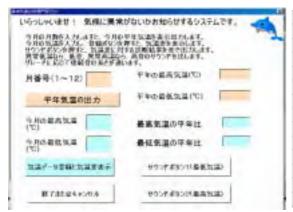


図 1 . 気温診断サブシステムのウインドウ (表計算ソフトのユーザフォーム)画面

図1のウインドウは、サウンドボタンを押すと、 気温差が平年値より高い場合に異常高温を知らせる音を、平年値より低い場合には異常低温を知らせる音を出力するように設計されている。すなわち、気温差を異常低温、平年並み,異常高温の3ランクに区分けする診断を行う。そのために、図2に示すようなメンバ・シップ関数を利用する[4]。+・3 の範囲内の気温差なら平年並みのランクに、それ以上であれ異常(低温か高温)のランクに分類する。縦軸はグレード(0と1の間0.2刻み)を示している。

### 3.サウンドインタフェース設計

異常高温、平年並み、異常低温を区別するランク信号やグレードを音で表現する方法としては、次の6つの方法が考えられる[5]。

- (1) 音の高さ(音程)と強さの違いで区別
- (2) 音の高さ(音程)と長さの違いで区別
- (3) 音の高さ(音程)と反復数の差で区別
- (4) 音色(楽器)と音の強さの違いで区別
- (5) 音色(楽器)と音の長さの違いで区別
- (6) 音色(楽器)と音反復数の違いで区別

まず、音の高さや強さや音色については、音程 や強さや音色ごとに音の意味を学習させる訓練 が必要であり、反復数は訓練無しでもグレードを 表す時に使える。そこで、次のような音出力法を 採用することにした。

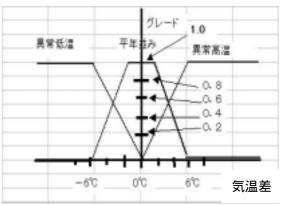


図2.気温差診断メンバ・シップ関数

- (1)異常低音のランクなら1オクターブ低い音をグレードに応じた長さ、演奏する。
- (2) 平年並みのランクなら中間音を出すか、 ノーサウンド (NS) とする。
- (3)異常高温のランクなら 1 オクターブ高い音を グレードに応じた長さ、演奏する。
- (4)最高記温と最低気温の区別をするため、最低 気温に対応する音として A(ラ)の音を使う。
- (5)最高気温に対応する音として C(ド)の音を使 う。

以上の気温差診断の条件式(含意)を整理する と、以下のようになる。すなわち、

<最低気温を平年値と比較して>

最低気温が異常低温なら サウンド A·

最低気温が平年並みなら NS、

最低気温が異常高温なら サウンド A+

<最高気温を平年値と比較して>

最高気温が異常低温なら サウンド C.

最高気温が平年並みなら NS、

最高気温が異常高温なら サウンド C+

#### 4. 音出力システムの設計

して、それぞれ、11 種類の高さや長さが異なる音楽(1小節)を演奏し、録音しておく必要がある。 すなわち、11 種類の音を再生できるようにする手順は以下の通りである。

- (1)キーボード(電子ピアノ)で 11 種類の音楽を 演奏・録音し、FD(フロッピー)に記録された MIDI ファイルを表計算ソフトで気温差データにハイパー リンクする。
- (2)気温差をクリックして MIDI ファイルを読み出し、音を出力する操作をマクロ登録し、マクロコードをコピーする。
- (3) VBE 画面で、図 1 のウインドウ(ユーザフォーム) を呼出し、サウンド用コマンドボタンをダブルクリックして現れる VB コード記入欄にマクロ操作コードを貼り付ける。
- (4) 気温差を表示するテキストボックスの値に対応 した音楽を選択するための条件式(if-Then 文)をマ クロ操作操作コードの前に入力する。
- (5)条件式とマクロ操作コードのセットをコピーし、 10 個分貼付け、条件式の気温差を順に変更し、対 応するマクロ操作コードの中の MIDI ファイル名を 順に変える。最後に End If 分を低所に挿入する。

以上のように VB プログラムを保存しておくと、図 1 のユーザフォームが表示された時に、現在の最高・最低気温を入力すると平年値との差が表示され、各サウンドボタンを押すと、気温差に応じてグレードのサウンドが選ばれて出力される。

# 5. サウンドの利用効果

ここでは、平年値との気温差を数値で表示するだけでなく、異常高温か異常低温か平年並みかを区分けする診断を行い、診断結果をサウンドで知らせる事の意味を議論したい。

一般に、情報システムは視覚情報を出力するものが多く、目を酷使しがちである。視覚出力ばかりのシステムは利用者をPC画面の前に釘付けにする点で好ましいといえない。視覚的表示出力の多すぎるシステムでは、余り重要でない出力情報を減らす工夫が必要であるし、見逃すべきでない重要な情報については、視線の案内が必要である。







図3. 気温差に対応した11種サウンドの楽譜

システム利用者に出力情報の重要さを感じ取らせるには、重要さを説明する手段が望まれるが、ウインドウでの文字列による説明は視覚情報を増やすので、却って逆効果である。

著者が望ましいと考える手段の1つは、重要な入出力情報ごとにサウンドボタンを用意することである。入出力データの意味や診断結果を知りたいときに、サウンドボタンを押すと、意味や診断結果に対応した音(サウンド)を出力できるからである。ただし、入力情報の意味や診断・評価結果を言語で解説するナレーションを音の代わりに使うことはユーザにとって親切であるが、使い続けるとわずらわしく感じるようになる。利用回数の多いユーザにはその人にだけ意味がわかるという音の方がよい。

特に、環境計測システムなどでは、計測で得られたたくさんのデータや情報を入力する時点で、そのデータや情報の意味がサウンドで識別できるようになると計測のやりがいを感じる。環境科学教育にとっては計測データの意味を音で感じ取らせることが役立つ場合もある。統計処理が済むまで意味がわからない状態になる事は関心を薄れさせる。教育の場では回避したい。

### 6.ファジイの利用効果

システムの利用者が入出力情報を扱う場合に サウンドボタンをクリックして音を出力する時に 音の高さの意味や長さの違いを理解するまでにし ばらく時間が掛かるかもしれないが、音の意味がわ かりだすと、システムを利用する時にデータの意味 も素早く理解できる。

入力した気温が平年並みに近いか、異常値に近いかをユーザにサウンドで知らせる(フィードバックする)システムでは、サウンドの長さで表されるグレードがユーザに臨場感を与える重要な要素となる。というのは、異常に低い、平年並み、異常に高いから成る3ランクの信号が音で示されるだけでは、滑らかな気候変化を感じ取りにくいからである。

グレードを決める時にファジイ理論とメンバ・シップ関数を使うもう一つの理由は、専門知識の導入のチャンスを与えることである。 気温差とグレードの関係を定義する図 2 のメンバ・シップ関数は単なる一例である。専門家の目で見て、気温差に対応するグレードの値は週平均か、月平均か、年平均かで大きく異なるであろう。その知識がメンバーシップ関数に取り込める。そのことが知能情報の処理システムにとって重要である。

なお、このようなメンバ・シップ関数の定義変更は、気温差とグレードとの対応表を作り変えて、11 種類の音の出力を選択する VBA プログラムの条件式を修正するだけで容易に達成される。

### 7.おわりに、

情報処理技術教育の場でも地球温暖化による気候変化や環境変化を理解させる環境科学教育が望まれる。地球温暖化の現象を説明し、環境や気候の計測データや統計を示すだけでは環境問題の解決に向けた行動を呼び起こすまでに至らない。そこで気候変動を実感させる気候診断システムを作成し出した。毎日、新聞で発表されている気温データをこのシステムに入力させることで、現実に起こっている気候や環境の変化を認識できるようになる。その際に、サウンドとファジイ理論のグレードを利用すると、環境の変化を感じ取らせる臨場感が高まる。気候診断システムは環境計測データの入力ごと

にデータについての診断結果をサウンドで出力するだけでなく、長期間記録された計測データについての診断結果も観測年月日に同期してサウンド出力できる。

利用者がこのサウンド出力付きのシステムに使い慣れてくれれば、地域別、年度別環境計測データから地域や年度で変る環境変化をサウンドで聞き分けられであろう。したがって、地球温暖化によって起こる異常気象などの発生状況も早くキャッチできるようになるであろうと楽観視する。ただし、一般人が利用する場合に、計測データの診断結果のサウンド出力が真に便利であるかどうかについては、まだ、結論を出せない。音に対する反応の個人差の問題が残る。これをどう解決するかが今後の課題である。個人差評価に基づくインタフェース最適設計に関してご助言いただいた九州大学の高木英之先生、立命館大の大崎美穂先生にここで感謝の意を述べたい[6]。

### 参考文献

- 1 . スティーブンシュナイダー「地球温暖化で何が 起こるか」草思社 1998 年。
- 2 . ブディコロノフ.ヤンシン「地球大気の歴史」 朝倉書店 1989 年
- 3. 立木英機「環境をはかる」日刊工業
- 4 . L.A. Zadeh: "Fuzzy Sets", Information and Control 8, pp 338-353, (1965),
- 高橋恒介「サウンドインタフェースを含む環境 計測システムについて」静岡産業大学研究紀要 No.6 pp195-212、(2004)
- 6 . H.Takagi, "Interactive- Evolutionary Computation: Fusion of the Compatibilities of EC Optimization and Human Evaluation", Proc. of IEEE Vol.89, No.9, pp 1275-1296 (2001)

### 連絡先:

高橋 恒介

静岡産業大学 国際情報学部 〒426-8668 静岡県藤枝市駿河台 4-1-1

Tel: 054-646-5443, Fax: 054-645-0195

E-mail: takahasi@ssu.ac.j

# ビジュアル化を利用した情報教育の実践例

#### 

Junkou Kawaguchi Tadashi Oishi 静岡産業大学国際情報学部

# Shizuoka Sangyo University, Faculty of Communications and Informatics

**Abstract:** This paper reports on practical examples for programming education using visualization of data structures and algorithms. Some of data structures and algorithms can be visualized by Java programming. Visualization examples for data structures of stack and queue, four sort algorithms and Hanoi tower problem's recursive algorithm are shown.

### 1.まえがき

データ構造やアルゴリズムを説明する場合、図 や言葉だけではなく内容をビジュアル化すると、 説明がしやすくなり学生の理解が良くなることが ある。 つまり、対象となるデータ構造やアルゴリズムをプログラムで実現し、その過程や結果をグラフィックで表示して説明すると理解が高まる。

本稿では、Java プログラムによってビジュアル化したデータ構造とアルゴリズムの例を示し、ビジュアル化の効果について述べる。

### 2. データ構造のビジュアル化

スタック、キュー、連結リストなどのデータ構造は、図を使って言葉で説明する場合が多い。しかし、これらには挿入や削除などデータ構造に付随する操作があるため、図と言葉だけでは捉えにくい。特に、キューのように本質的なデータ構造の働きと処理効率をよくするために工夫された実現方法が異なるケースは、図と言葉だけの説明ではわかりにくい。以下では、説明のために作成したスタックとキューのビジュアル化の例を示す。

### 2-1.スタック

スタック(stack)のデータ構造は、次のように説明される。

- ·データは棚に積み上げるようなイメージで、一 方向からデータを出し入れする LIFO ( Last In First Out ) のデータ構造である。
- ·データの挿入 (積むこと)を push、データの 削除 (取り出し)を pop と呼ぶ。
- ·スタックポインタ (最後のデータの場所)で管 理する。

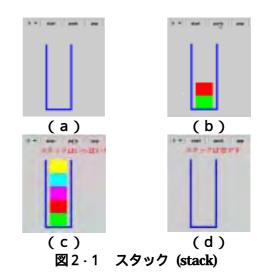
図2-1 は、スタックをプログラムで実現し、push や pop の操作をボタンのクリックと対応させ、ス

タックの構造をビジュアル化した例である。 概要 を説明する。

リストボックスからスタックの個数を選択しスタートボタンをクリックすると、個数に対応した高さの箱が表示される。(図 2-1(a))

push ボタンをクリックすると、データが箱に積まれる。ただし、スタックが一杯の場合は、その旨のメッセージが箱の上に表示される。(図 2-2(b)(c))

pop ボタンをクリックすると、一番上に積まれたデータが消える。ただし、スタックが空の場合は、その旨のメッセージが箱の上に表示される。(図 2-1 (d))



2 - 2 . キュー

キュー(queue)のデータ構造は、次のように説明される。

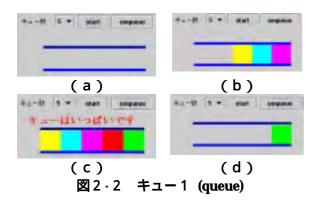
・待ち行列のイメージで、データの挿入はデータ の最後尾に取り出しは先頭から順に行う FIFO (First In First Out)のデータ構造である。

- ·データの挿入を enqueue、データの削除(取り 出し)を dequeue と呼ぶ。
- ·フロント (front:最初のデータの場所)、リア (rear:最後のデータの場所) 格納個数で管理 する。

図 2-2 は、スタックと同様に、キューをプログラムで実現し、enqueue や dequeue の操作をボタンのクリックと対応させ、キューの構造をビジュアル化した例である。概要を説明する。

リストボックスからキューの個数を選択しスタートボタンをクリックすると、個数に対応した長さのパイプ状の箱が表示される。(図 2-2(a)) enqueue ボタンをクリックすると、データが先頭から順に詰めて並べられる。ただし、キューが一杯の場合は、その旨のメッセージが箱の上に表示される。(図 2-2 (b)(c))

dequeue ボタンをクリックすると、先頭から順にデータが取り出され、残ったデータは前詰めにして表示される。ただし、キューが空の場合は、その旨のメッセージが箱の上に表示される。(図 2-2 (d))



上述したキューでは、dequeue するたびにデータを前詰めするので処理効率が悪い。これを避けるための一般的な方法は、配列の一方の端をもう一方の端に回りこませる方法(ラップアラウンド)である[2]。この方法でキューを実現する手順は、次のようになる。

·キュー用の配列を (最大個数 + 1)分確保する。

- ・enqueue では、格納個数が最大個数であるなら ばエラー処理、そうでないならばデータを挿入 し、リアを1アップする。そのとき、リアが配 列の最後の位置の場合は、配列の先頭に位置づ ける。
- dequeue では、キューが空(フロントとリアが 等しい)ならばエラー処理、そうでないならば 先頭のデータを取り出し、フロントを1アップ

する。そのとき、フロントが配列の最後の位置 の場合は、配列の先頭に位置づける。

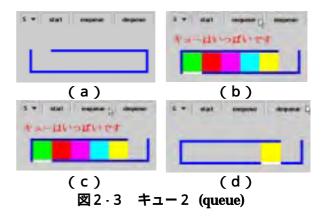
図 2-3 は、上記の方法で実現したキューをビジュアル化したものである。概要を説明する。

リストボックスからキューの個数を選択しスタートボタンをクリックすると、個数に対応した 長さの箱が表示される。箱の上部の開いている 場所が次のデータの入る位置である。

### (図2-3(a))

enqueue ボタンをクリックすると、データが入るべき位置から順に詰めて並べられる。そのとき、次に取り出されるべき位置(フロント)の箱の下部の枠が色違いで表示される。ただし、キューが一杯の場合は、その旨のメッセージが箱の上に表示される。(図 2-3 (b)(c))

dequeue ボタンをクリックすると、フロントの 位置のデータが取り出され、フロントの位置が 移動して表示される。 ただし、キューが空の場合は、その旨のメッセージが箱の上に表示される。 (図 2-3 (d))



# 3. アルゴリズムのビジュアル化

ここでは、4つのソートアルゴリズムと「ハノイの塔」で使う再帰アルゴリズムについてのビジュアル化の例を示す。

### 3.1.ソートアルゴリズム

ソートアルゴリズムは、ソートの対象となるデータに対する操作によって、「選択によるソート」「交換によるソート」「挿入によるソート」「併合によるソート」に分類できる[4]。ここでは、「交換によるソート」であるバブルソートとクイックソート、「挿入によるソート」である単純挿入ソートとシェルソートについて、データがどのように収束されるかをビジュアル化した例を示す。

図 3-1~図 3-4 は、以下の手順でソートされる

データの様子をビジュアル化したものである。 5万個の乱数(0~300の整数)を配列に格納。 配列のデータを各ソートアルゴリズムで昇順 にソートする。

一定の間隔で配列の状態をグラフで表す。横軸(X)方向を配列の添え字(0~49999) 縦軸(Y)方向を配列に格納されている数(0~300)とする。

初期状態では全体に点が散らばっており、ソート済みとなったデータは右上がりの直線上に集まり、最終状態は右上がりの直線となる。

# (1) パブルソート

バブルソートは、「配列の最後尾のデータから隣 どうしを比較し、大小関係が違う場合はデータを 入れ替えて最小値を先頭に移動する」という操作 を繰り返す方法である。したがって、データの先頭から順にソートされていく。図 3-1 はバブルソートの結果であるが、その様子が読み取れる。

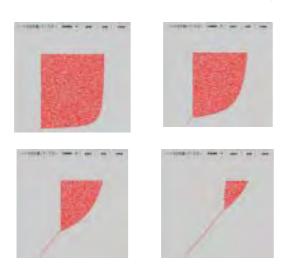


図3.1 バブルソート

### (2)単純挿入ソート

単純挿入ソートは、「先頭からあるところまではソート済みであることを前提として、それ以降のデータの入るべき位置を求めて、その位置にデータを挿入する」という操作を繰り返す方法である。図 3-2 は単純挿入ソートの結果である。バブルソートと同様に先頭からソートされていくが、ソートのされ方が大きく異なることがわかる。

### (3) クイックソート

クイックソートは、「ピボット (pivot: 基軸となる値)により、データをそのピボットより小さいデータ群と大きいデータ群の2つに分け、さらに分けた2つの群に同じアルゴリズムを再帰的に

適用する」という方法である。図 3-3 は、クイックソートの結果である。データが分割され、再帰的にソートされている様子がわかる。また、図の動きから、他のソートに比べて処理時間が短いこともよくわかる。

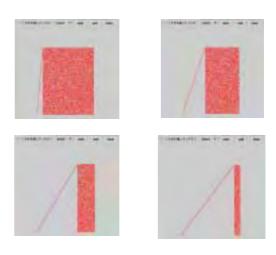


図3.2 単純挿入ソート

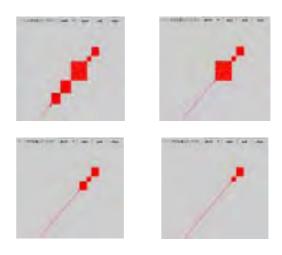


図3.3 クイックソート

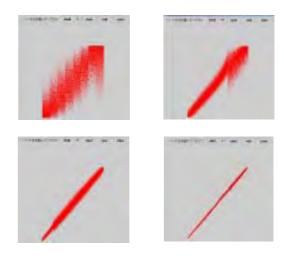


図3・4 シェルソート

### (4)シェルソート

シェルソートは、「一定間隔のデータに単純挿入 ソートを適用し、最初は荒くソートし、間隔をだ んだん小さくしながらソートしていく」という方 法である。図 3-4 は、シェルソートの結果である。 最初は粗く、だんだんと細かくソートされていく 様子がわかる。

### 3・2 . 再帰アルゴリズム

再帰アルゴリズムでよく例に挙げられるのが、「ハノイの塔」の問題である。「ハノイの塔」の問題は、次のような規則によって、図 3-5 の(a)の状態のn枚の円盤を、最小回数の円盤移動の操作で、(c)の状態にするというものである。(規則)

1回の操作で1枚の円盤しか移動できない。 各円盤の上には、自分より大きな円盤を乗せ ることはできない。

3本の柱は自由に使ってよい。

n 枚の円盤を図 3-5(a)から(c)のように 移動する場合、アルゴリズムは次のようになる[3]。 ただし、 に再帰アルゴリズム適用する。

n·1枚の円盤を図3 -5(b)のように移す。 一番下の円盤を目的の柱に移す。

n · 1 枚の円盤を目的の柱に移す。

図3-5は、円盤の移動状態をビジュアル化したものである。番号付けした円盤の移動を文字で表示する替わりに、色違いの円盤の移動を図で表示することによって、移動方法が一目でわかる。さらに工夫すれば、再帰アルゴリズムの考え方の説明にも使える。

#### 4.まとめ

データ構造とアルゴリズムを Java プログラム によってビジュアル化した例を示した。ビジュア ル化による効果について、以下のようなことが確 認できる。

操作が伴うデータ構造では、操作に対応したデータ構造の動きがよくわかり、説明がしやすくなる。

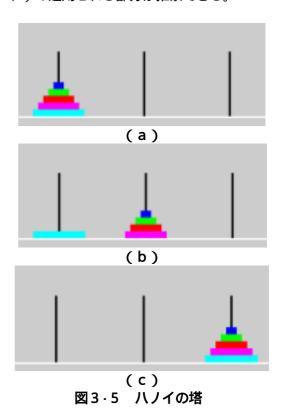
キューのように、本質的なデータ構造の働きと プログラムでの実現方法が違うとき、両方を見 せることによって、処理効率のためのアルゴリ ズムの有効性が理解できる。

ソートアルゴリズムのように多数のアルゴリズムがある場合、それらの違いが視覚的に捉えられる。その結果、例えば、バブルソートの場合、配列の最初にあるデータで配列の後に行くべ

きデータがなかなか移動しないことがわかり、 その改善策としてシェイカーソートが考えられた説明などがしやすくなる。

ソートアルゴリズムの場合、図の動きによって 処理効率がある程度わかる。特に、他のものと 較べて、クイックソートやシェルソートが良い ことがわかる。

再帰アルゴリズム (ハノイの塔やクイックソート)の適用される部分が推察できる。



### 参考文献

- [1]Robert Sedgewick 著、野下浩平他訳「アルゴリズム C」近代科学社、1996
- [2](有)オングス著、杉山貴章他監修「Java アルゴ リズム + データ構造完全制覇」技術評論社、2002
- [3]柴田望洋、辻亮介著「C言語のよるアルゴリズム とデータ構造」技術評論社、2002
- [4]杉山行浩著 「C で学ぶデータ構造とアルゴリズム」東京電気出版局、1995

### [問い合わせ先]

川口順功、大石義

静岡産業大学 国際情報学部

〒426-8668 静岡県藤枝市駿河台 4 · 1 · 1

Tel : 054-645-0191 Fax : 054-645-0195

E-mail: kawaguti@ssu.ac.jp

oishi@ssu.ac.jp

# 数式絵によるCプログラミング教育

# Teaching of C Programming by MathArt

中津山幹男 Mikio Nakatsuyama FC 研 FC Laboratory

**Abstract:** Students are interested in drawing figures by using PC, so we make a proposal for using MathArt to teach C programming. We devise some techniques for simplifying the programming.

#### 1 はしがき

文科系の学生にプログラミングに興味を持たせるのは、かなり難しいことは周知の事実である。理由は簡単で抽象的な説明に全く魅力を感じないことにある。一方、PCによるアニメ風の作図には進んで取り組む傾向があることもよく知られている。

MathArt(数式絵)は初頭関数を主として用い、 二次曲線や直線を用いて、絵を描く手法で、初歩的 な塗り絵風のものから芸術的な作品まで描くことが できる。[1] [2] ここでは MathArt による作図を通 してCプログラミングを教育する方法について説明 する。もちろん、Cのすべてを数式絵で説明できる わけではないので、ある程度の制限事項が存在する。 これについてはさらに検討する必要がある。

### 2 プログラムの初期設定

ここでは Borland C++ Builder の描画技法を用いる。 main()などを直接使うことができないので、使いやすくするために、あらかじめ初期設定をしておく必要がある。 Visual C++などでも、同じようなテクニックを利用できる。

まず次のような定義などをしておく。

#define From(x,y)

Form1->Canvas->MoveTo(x,y)

#define To(x,y)

Form1->Canvas->LineTo(x,y)

#define Futosa(x)

Form1->Canvas->Pen->Width=x #define Iro(x)

Form1->Canvas->Pen->Color=x void mainf(void);

/\* main() の代わりに使用\*/

最初の2定義は線の定義で、x,y は出発点と終点の座標を表す。第3の定義は線の太さを表し、第4の定義は色彩の指定である。色彩は Borland C++ Builder では Red, Blue, White などの色の名前に clを付して指定する。例、clRed、cBlue、clWhite など。 void main(void) は main()を直接使用できないので、代わりに fmain()を使用する。

準備はこれだけだが、正確に記載する必要があるので、フロッピーなどに記録して配布し、適当なファイルに記憶させておいて必要なときにコピーして使うようにすれば、学生の負担が軽くなると考えられる。なお次の文も用意しておいたほうがよい。

#include <stdio.h>

#include <stdlib.h>

### 3 簡単なプログラミングの例

適当なところ (通常は Button1 のところ) に mainf();

と記入しておく。作図は最初の定義を用いる。

3.1 赤い点を描く。

Void mainf(void) {

Iro(clRed);

From(100,100);

To(100,100); }

3.2 青い線を描く。以下、mainf()を省略。 Iro(clBlue);

```
From(100,100);
   To(200,200);
3.3 円を描く。ここで for を使う。
   x=r*sin(0)+x0;
   y=r*cos(0)+y0;
   From(x,y);
   for(i=0; i <=360; i++) {
        x=r*sin(i*pi/180)+x0;
        y=f*cos(i*pi/180)+y0;
        To(x,y);
   } //pi=3.141592653; Iro(clGreen)
3.4 空と海の描き分け。If の使い方。
   for(i=0; i<=500; i++) {
       if(i <= 300) Iro(clAqua);</pre>
       else Iro(clBlue);
       From(0,i);
       To(500,i);
  }
```

3.5 配列の使い方 四角形

int zh[4][2];

From(zh[0][0],zh[0][1]);

For(i=1; i <= 3; i++)

To(zh[i][0],zh[i][1]);

3.6高調波の使い方

```
x = a*sin(t)+b*sin(8*t)+c*sin(64*t);

y = a*cos(t)+b*cos(8*t)+c*cos(64*t);
```



図1 数式絵の1例

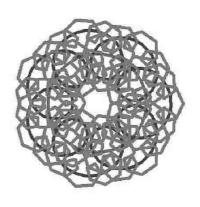


図2 高調波の例

3.7 再帰関数の使い方

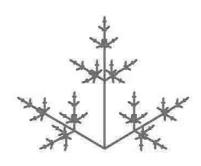


図3 再帰関数の例

### 4 むすび

文系の学生に興味を持たせることを目的として、MathArt を C プログラミングの教育に利用することを提案した。 関数の例として再帰関数の例をあげたが、ほかの機能についても、より効果的な MathArt を模索したい。

#### 参考文献

- [1] 中津山、色彩のファジィ的決定、東北支部研究会、(2004)
- [2] 中津山、数式絵の世界 http://www3.omn.ne.jp/~nakatsu/

### 連絡先

〒992-0025 米沢市通町5-3-35

中津山 幹男

E-mail: vya03741@nifty.ne.jp

# 左脳と右脳の知力を生かした創造性育成法の開発

Development of Creativity Raising Method Which United Logical Thinking Power and Illogical Imaginative Power of Brains

王 碩玉 <sup>1)</sup> 牧野 圭一 <sup>2)</sup> 河田 耕一 <sup>1)</sup> 井上喜雄 <sup>1)</sup> 土谷 武士 <sup>3)</sup> Shuoyu Wang **Keichi Makino** Koich Kawata Yoshio Inoue Takeshi Tsuchiya

1): 高知工科大学 2): 京都精華大学 3): 北海道大学

Kochi University of Technology, Kyoto Seika University, Hokkaido University

**Abstract**: Our research target is developing creativity training methods. We have proposed a new creativity training model. This original model will be called spiral cycle of creativity training. In this report, the robot's actuality and the imaginative power of MANGA are used as a concrete method of realizing the spiral cycle of this creativity training. Since the experiment for a schoolchild was conducted based on the spiral cycle of this creativity training, finally the result is explained.

# 1.はじめに

昨今、児童生徒の「科学技術離れ」「理科離れ」の 懸念が様々な場面で指摘されている。「科学技術創造立国」を実現していくためには、将来の科学技術 を担う児童生徒に科学技術や理科・数学に対する興味・関心を培い、自然についての知的好奇心、探求 心を高め、論理的思考力や創造性を伸ばし将来有意な人材を育成していくことが必要不可欠である[1]。

本研究では、創造性育成法を開発することを目的としている。しかし、「創造性」は極めて高次元の概念であり、人によって創造性に対する理解が異なり、Japan Creativityでは22種類もの定義が掲載されている[2]。著者らは、感性と想像性と創造性と実在性との関係を整理することにより、創造性育成のスパイラルサイクルモデルを提案している[3][4]。本シンポジウムではこのモデルに基づく実験結果を発表した。ここでは、よりリアルなUFOロボットを開発して、実験を行ったので、その結果について報告する。

# 2. 創造力と創造性育成モデル

創造力は、経験のない事物や現象を頭の中に思い 描きながら<u>目的を設定する力</u>と、その目的を達成す るために<u>具体的な問題を解決する力</u>からなると考えている。 創造性は豊かな感性から生れ、想像できる空間で高められ、そして現実世界で検証されるものである。また、真の感性は現実の世界からしか得られない。よって、創造性育成は図1に示すように想像と実在の間で行うべきであり、具体的には図1に示すモデルを提案している。

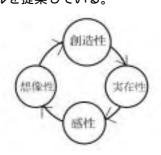


図1 創造性育成モデル

図1に示すモデルを「創造性育成モデル」または「創造性育成のスパイラルサイクル」と呼ぶ。この 創造性育成モデルに従ってトレーニングすれば、形 象的情報処理の右脳と、論理的情報処理の左脳をバ ランスよく取れ、目的設定能力と問題解決能力とも 向上することが期待できる。

# 3. 創造性育成モデルの実現

図1に示す創造性育成モデルの具体的な実現法について説明する。

創造性育成の代表的事例としては体験教室や工作などが挙げられるが、実在性を強調する反面、想像性を軽視する傾向がある。すなわち、左脳の訓練になるが、右脳の働きが無視されてしまう。一方、ロボットコンテストが物づくりを通して問題解決能力だけではなく、多様な結果を生み出せるので、創造性育成の有効手段として認められている。また、マンガ「鉄腕アトム」は少年少女を拘束の無い想像空間までに連れて行ってそこで夢を与えることにより、幼い胸に未来科学志向の心を蒔くことができる。よって、本研究では図1に示す創造性育成モデルの具体的な実現法として、図2に示すようにロボットの実在性とマンガの想像性を融合した創造性教育法を開発している。



図2 創造性育成法モデルの実現

すなわち、創造性育成のスパイラルサイクルは四つの要素つまり、実在性、感性、想像性、創造性から構成されている。これらの要素は環状に関係しており、実在の道具や材料を見たり触ったりすることで実体験をし、その現象や原理について深く理解し、イメージを膨らませて、何かを創り出すという「もの作り」考え方から生まれている。具体的な創造性の育成手段として、実在性においてロボットの実態を体験する。感性において物理現象を深く理解する。想像性においてマンガの表現力で夢のロボットを描く。創造性において今までに無い新型ロボットを創り出す。この一連の作業をサイクルとして繰り返すことにより、創造性の向上が期待される。次に各要素について詳細に述べる。

### 3.1 現実性と感性

ロボット作りやロボコン参加をすることで、創造性を向上するアプローチの有効性がすでに認められている[7][8]。ここで図1に示すように、現実性のフィールドでは、ロボットの持っている実体性を利用し、子供がロボットに、触れる、乗る、操縦するという実体験を通じて、図1に示すように次のステップとして「感性」の向上を誘発する。人間は幼い頃の体験によって、その後の人生に大きな変動をもたらす。幼児期の子供は、好奇心が旺盛なので、外界からの刺激に応じて、思考が始まったり、感情が生まれたりする傾向にあり、この時期で真の感性が育てやすい。よって、感性向上の教育方法の取り組みとして、良い物にできるだけ多く触れる機会を与えることが最適だと考えられてきた[10]。

ところで、感性を育成する立場から、一般的に感性を「物事の価値、価値観に気が付く能力」と広意味的に定義されている[6]が、本研究では、狭い意味ではあるが、感性をより具体的に考えている。すなわち、ここで感性とは速度や加速度など物理的な量に対しての感受性、高速で走っている物体が急に止まれないなどのような物理現象に対しての理解度を指す。したがって、真の感性は現実の世界からしか得られない。具体的には図1中の実在性のフィールドで、ロボットに乗り込んで操縦をしたり、観察をしたりする事で、重力やその振動を体感し、物理的概念や現象を身をもって理解する。

最初に我々がロボットを用意する必要がある。子ども達に、実体としてのロボットの認識をあたえ、なおかつロボットに対する自由なイメージを拘束しないものとして、今回宇宙を飛び回る「UFO型ロボット」というテーマで開発をする。具体的には第3章 感性の向上を目的とした「UFO型ロボット」に示す。

### 3.2 想像性

実体験をする事で、子供の持っていたイメージをより現実的に近づけるという意味では、想像性の幅を狭くするといっても過言ではない。そこで、この図1に示すように、創造性のフィールドにおいては、マンガの持つ想像力を利用することで、狭くなった

子供に空想できる領域を提供する。通常、マンガと 学術的要素とは掛け離れ、娯楽的要素が強いが、本 研究では、子供の内面に持っている、自由な空想性 を外に発散する機会として利用する。マンガを用い てほしい、創りたい夢のロボットを描く特長しては、 まず物の形や特徴をうまく強調したりして、目に見 えない物理現象をも自由に表現できる。次に文字よ り遥かに多い情報が伝達できる。更にストーリー性 も用意に表せる[11][12]。なんのために書いているの か。何を伝えたいのかという事をマンガで描くこと で、子供に思考させることができる。子どもにとっ てはマンガが紙の上に自由な夢を描く手段として最 適である。よって、この空想性フィールドでは、子 供に対して、実際に乗ってみたい、作ってみたいロ ボットのマンガを書かせ、創造性への準備を行う。

### 3.3 創造性

用意した現実「UFO型ロボット」に感性で触れ、 自分の作りたいロボット、夢のロボットについて空 想し、「マンガ」で表現をした子ども達の次のステッ プとして、「ロボット作成教室」を提案する。これは 実際に子ども達が自分たちで形や構成を設計して口 ボットを作り、空想を具現化する力である創造性の 向上を目的としている。その際、既存のロボット作 成キットではなく、我々の提案するロボットのパー ツセットを使用する。その理由として、従来のキッ トでは技術的なしきいが高く、子どもが短時間で理 解しながら作業をするのが困難であること。一部の ものを例外として、その多くは説明書のとおりにし か作れないこと。作った物の規模はあくまでおもち ゃの域を出ず、何かに役立てる物をつくる方法が学 べたという達成感が薄い事などが上げられる我々の 用意するロボットのパーツセットの狙いは、プラモ デルのように与えられた説明書をなぞるのではなく、 子ども達自身が自分で考え、設計し、組み立て、遊 び方を考え、特徴を理解することで創造性を高める ツールを目指す。具体的には第4章 創造性の向上 を目的とした「ロボット製作教室」に示す。

### 4. 創造性向上を目的とするロボット

子供たちにロボット操縦の実体験を与え、物理現

象への興味から感性の向上を図る「UFO型ロボット」を創っている。



図3 開発したUFO型ロボット

図3に示すようなUFO型ロボットを開発した。球型アクチュエータ4個[14]を擁する土台はアルミ製の中空フレームを使用している。操縦者の乗り込むボディはFRPで成形している。移動機構として、球型アクチュエータ4個による全方向移動機構を採用している。今年はよりリアルに体験できるようにUFOロボットを改造し、性能をアップする。具体的にマニピュレータを2本製作してロボットの本体に取り付けるので、物の運搬作業ができるようになっている。さらに画像、音響、通信機能を備える。それに、両サイドから後方にかけて対物センサを配置し、壁の接触などに対する安全対策を取っている。

実際に子ども達がロボットを作り、空想を具現化する創造性の向上を目的として、ロボットを製作する。その際、既存のロボット作成キットではなく、我々の提案するロボットのパーツセットを使用する。

### 5.実験結果

小学3年生を対象として、図4に示すように基礎実験を行うことにより、幾つかの基本事項について確認できた。実験結果の詳細については当日報告する。



図 創造性育成実験の様子

# 6.まとめ

本研究は、14年度より三年間の計画で研究している。創造性育成モデルとして図1に示す創造性育成のスパイラルサイクルを提案し、基礎実験を行っている。現時点では下記の諸点について確認できた。子供達が実物に興味を持っている。

- (1) 試乗や手作業が想像性を促進する。
- (2) マンガやお絵描きが有効な表現手段である。
- (3) 子供達は低学年ほど好奇心が強い。
- (4) 創造性の育成が時期で行うべきである。
- (5) 域の教育委員会や小学校に研究意義をちゃんと説明すれば、積極的にご協力いただける。

謝辞: 本研究は文部科学省科学研究補助金費特定領域研究 A『新世紀型理数科系教育の展開研究』から研究費の一部分をいただきました。ここで筆者らの創造性育成のスパイラルサイクルをご理解くださった審査員の皆様に深くお礼申し上げます。また、本研究に興味を示し、積極的に手伝ってくれた学部生の光山和樹君と阿部大輔君、及び当時院生だった浜口和洋君と野村和寿君に感謝を表す。最後に実験にご協力頂いた片地小学校の先生方々と生徒達、本当にありがとうございました。

〒782-8502 高知県香美郡土佐山田町宮ノ口 185 番地 高知工科大学工学部知能機械システム工学科 王 碩玉

TEL: 0887-57-2306 FAX: 0887-57-2320

E-mail: wang.shuoyu@kochi-tech.ac.jp

http://www.mech.kochi-tech.ac.jp/staff/wang/index.html

# 参考文献

- [1]増本健:新世紀型理数科系教育の展開研究, http://risuka.ei.tohoku.ac.jp/rsroot/mainmenu.html
- [2] 日本創造学会:創造性の定義について、 http://www.soc.nii.ac.jp/jcs2/teigi.html
- [3]王碩玉、牧野圭一、河田耕一、井上喜雄、土谷武士:ロボットの実在性とマンガの想像性を融合した創造性育成法の開発、特定領域研究平成 15 年度中間報告書(2004)
- [4]王碩玉、牧野圭一、河田耕一、井上喜雄、土谷武士:新世紀型理数系教育を考える、「新世紀型数理系教育の展開研究シンポジウム」、日本未来科学館(2004)
- [5]王碩玉、牧野圭一、河田耕一、井上喜雄、土谷武士: ロボットの実在性とマンガの想像性を融合した創造性育成法の開発、特定領域研究申請書(2001)

- [6] 浜口和洋, 王碩玉, 河田耕一, 北野斎一: 創造性 育成を目的とする UFO 型アミューズメントロボ ットの開発, 第6回知能メカトロニクスワーク ショップ論文集, pp.65~70 (2001)
- [7]森正弘: ロボコン博士のもの作り遊論,オーム社, (1999)
- [8]油田信一: ロボットを通した工学教育, ロボット 学会誌, vol.16, no.4,pp21-22 (1998)
- [9]河田耕一: 生産技術者と感性、日本機械学会誌、 102,965, pp221-225 (1999)
- [10] 片 岡 徳 雄 : 子 ど も の 感 性 を 育 む 、 NHKBooks(2000
- [11]牧野圭一: 古今東西・マンガが面白い理由, 東京都現代美術館現代マンガ学講座(1998)
- [12]牧野圭一:マンガ学·情報圧縮の視点から見た マンガキャラクター 熟語的発想法,スタンフ ォード大京都研究センター講演(2001)
- [13]日本創造性学会: 創造性研究 4· 創造と教育· , 共立出版株式会社
- [14]Wada Masayoshi• Haruhiko H Asada: Design and Control of a Variable Footprint Mechanism for Holonomic Omnidirectional Vehicles and its Application to Wheelchairs, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, vol15, No6, 978-989 (1999)
- [15]王碩玉,河田耕一,石田健司,木村哲彦,土谷 武士:健康増進機能と全方向移動機能を備えた電 動車椅子による健康増進実験,第19回日本ロボ ット学会学術講演会論文集,Vol.2,pp.457-458 (2001)
- [16]K. Sinomiya, S. Y. Wang, K. Ishida, T.Kimura: Development and Muscle Strength Training Evaluation for Horseback Riding Therapeutic Equipment Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.14,No.5, pp.48-56 (2002)
- [17]王碩玉,水本雅晴,土谷武士: 命題真理値を考慮した距離型推論法,バイオメデカルファジィシステム学会論文集, Vol.2, No. 1, pp.1-16(2000)
- [18]浜口和洋: ロボットの現実性とマンガの想像性を融合した創造性育成法の開発,高知工科大学修士論文(2002)
- [19] 野村和寿: 感性、創造性の向上を目的とした教材としてのロボットの開発, 高知工科大学修士論文(2002)

# 学生による授業評価アンケートの SOM による解析

An Analysis of Lecture Evaluation by Students Using SOM

### 塚本弥八郎

### Yahachiro Tsukamoto

## 名城大学理工学部情報科学科

Dept. of Information Sciences, Faculty of Science and Technology, Meijo University

Abstract: The methodology of the Customer Satisfaction Survey and Analysis, developed mainly in the field of marketing research, was introduced for analyzing the raw data concerning the questionnaries on the lecture evaluation by students. This challenge aims at establishment of both the numerical and verbal evaluation method for getting the outcomes helpful to lecturers who face the task of assessing their lectures. The previous papers (Tsukamoto [2]) has pointed out the big five issues to be studied more. This paper is concerned with the fifth one, that is, the development for an appropriate method of decreasing the number of the questionnaries. For this task, the purpose of this paper is to classify the not a few questionnaries with the use of SOM in orde to make it much smaller.

# 1 はじめに

前回の FSS での報告 [2] では, CS 分析 (The Customer Satisfaction Survey and Analysis) の考え方を指針としながら, 学生による授業評価のアンケート結果の分析方法およびその表示の工夫を紹介し, さらに, 大規模な実践の後の反省から今後の考慮事項を5つ述べた. すなわち,

- 1. 「良い授業」と「学生の満足度が高い授業」との 乖離
- 2. 事実認識と価値(評価)の関連と区別
- 3. 少人数授業とそうでない授業との間の質的な差:
- 4. 学生サイドの問題:どの比較にも増して,明確な差が見られるのは,「意欲的学生」と「非意欲的学生」との差であるが,この問題性をどう捉えるのか.
- 5. ある時期に何度も書かされる学生の集中力を維持するために,あまりにも多すぎる質問項目を減らす.

今回はこの最後の問題に挑戦するために,SOM により分類を行った結果について報告する.なお,データの概要,項目別改善要求度の導出,言語での改善ポイントの指示等についての詳細は今回は省略しているが,文献,塚本 [1,5] を参照いただければ幸いである.

# 2 SOM による解析

今回の質問項目は以下の 14 項目である. ただし, はじめの 11 項目は授業についての, 後の 3 項目は学生の受講態度についての質問で,自己申告による評定である. いずれにしても,項目の多さが目立つ.

時間厳守 (0.19), 位置ずけ (0.45), 板書 (0.33), 話方明瞭 (0.40), 私語対応 (0.29), ポイント (0.45), 発言促進 (0.32), 授業計画 (0.33), 理解 配慮 (0.45), 興味工夫 (0.54), 総合満足, 学習努力, 集中受講, 欠席回数.

また、5 段階評定は数字を用いずに、a, b, c, d, e で行った.

SOM による検討では, 2 つの全く異なるデータを 用いているので分けて述べる.

### 2.1 SOM による解析 (1)

まず,7万余のレコードのソースデータから集約された情報を使っての分析を行った.すなわち,表1に示されるように,クロス集計による関連度(クラメルの V 値),相関係数,正規分布の近似度,歪度の4 項目からなる属性ベクトルを SOM で使用した.結果として,12 個の質問項目は,5 つに分類された.

表 1: 使用データ

項目	V 値	相関	正規分布	歪度
開始時間	0	0	0	0.898
終了時間	0	0	0.222	1
私語対応	0.156	0.156	0.333	0.592
話し方	0.750	0.750	0.389	0.184
板 書	0.625	0.625	0.411	0.204
発言促進	0.469	0.469	0.788	0.184
授業計画	0.156	0.156	1	0.082
質問促進	0.469	0.469	0.788	0.041
理解配慮	0.938	0.938	0.444	0.020
内容理解	0.938	0.938	0.778	0.010
興味工夫	1	1	1	0.041
熱意誠意	0.844	0.844	0.778	0.224

# 2.2 SOM による解析 (2)

ここでは、学部別に約 100 科目を選び , ソースデータをそのまま SOM にかけた .

表 2: 設定値

項目	
初期学習率	0.2
最終学習率	0
初期近傍領域	3
最終近傍領域	0
シグモイド関数の勾配	7
乱数の種	59575
マップの初期重み	乱数
学習方法	ランダム

全体と7学部別の結果を得たが,それらから抽出される事柄をまとめておく.

- 1. 大きく分けると授業の準備,授業内容および伝達方法にかかわる3つになると思われる,
- 2. 「理解配慮」「興味工夫」「発言促進」および「授業計画」はとくに意欲的学生の場合には同一の項目とみなして差し支えない.
- 3. 「位置づけ」と「ポイントの指摘」は両方の質問 は不要.
- 4. 全体的に、意欲学生の不満度は相対的に小さく,

とくに,薬学部では「意欲学生」と「学生全体」のマップ上の配置が2分され,その差は歴然としている.

# 3 おわりに

すでに以前の相関分析により質問項目を減ずる事ができることが示唆されていたが、今回の検討からますますそのことが裏付けられたと思われる。ただし、どんな質問内容にするかは今後の検討課題である。なお、後半の結果は 2003 年度の本学部情報科学科の卒業研究渡辺 [6] により行われたものである。記して謝意を表する。

# 参考文献

- [1] 塚本弥八郎: ファジィCS 分析, 日本ファジィ学会 評価問題研究会, 第7回あいまいな気持ちに挑む ワークショップ講演論文集, pp.71-74 (2002)
- [2] 塚本弥八郎: ファジィCS 分析 (その2), 第19回 FSS 講演論文集, pp195-198, 日本知能情報ファ ジィ学会 (2003)
- [3] 大村哲, 小原智孝:「大学における授業評価の現状と展望」 企業における顧客満足度調査との比較から , 大学教育学会第4回大会講演論文集, 宮城大学(2002)
- [4] 松本幸正,塚本弥八郎:学生による授業評価アンケート結果の分析手法-授業改善の定量的評価手法の確立を目指して-,名城大学理工学部研究紀要,43号,pp.80-87(2002)
- [5] 松本幸正,塚本弥八郎: CS 分析の考え方を導入した授業評価アンケートの分析,名城大学総合研究所紀要, No. 8 (2003)
- [6] 渡辺弘樹: アンケート結果の SOM による解析, 名城大学理工学部情報科学科,2003 年度卒業論 文(2004)

連絡先:塚本弥八郎

〒 468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501 名城大学理工学部情報科学科

Tel: 052-838-2279

Email: tukamoto@ccmfs.meijo-u.ac.jp

# 石油精製プラントにおけるカオスの高圧ガス漏洩検知への応用

Chaos application on gas leak detection in petroleum refining plant

谷 哲 次<sup>\* 1</sup> 長 迫 透<sup>\* 1</sup> 五 百 旗 頭 正<sup>\* 2</sup> Tetsuji TANI, Toru Nagasako, Tadashi Iokibe

\*1出光興産(株)製造部

\*2㈱複雑系応用技術研究所

Manufacturing Dep. Idemitsu Kosan Co.,Ltd

Research Institute of Application Technologies for Chaos & Complex Systems Co., Ltd.

**Abstract:** For the early detection of high-pressure gas leakage at a petroleum refining plant, we defined "background noise" as a constant. We defined a "leak sound" as the acoustic signal of high-pressure steam manually leaking near steam conversion valve attached to a large-scale private electric power generator. It may be difficult to detect a leak sound by amplitude, as the distance from the leak source may be great. To solve this problem, we applied chaos theory to examine the topological structure of a time-series sample of background noise and leak sounds with various mixing ratios. Threshold levels for detecting the leak sounds were then estimated.

Keywords: カオス分析、音響検知、漏洩音、ガス漏洩、石油精製プラント

### 1. はじめに

石油精製事業所で装置異常による高圧ガスの流 出事故が発生した場合、二次災害を最小化する要 諦は早期に発見できるか否かにある。

暗騒音(定常状態での騒音)を装置の雑多な要因が相互に影響しあい、支配的な音源を特定できない状態と考える。一方、漏洩音は高圧ガスの漏洩が支配的になった音と考えて、ある規則性が存在する状態と考える。そこで、この規則性の強弱をカオス分析により求め、定常状態か否かの判定を試みる。

さらに、漏洩源とセンサとの距離が長い場合は、 騒音レベルの差のみで判定することが困難になる と予想される。そこで、暗騒音と模擬漏洩音との 混合比を変化させた合成音を生成して、音の位相 構造の差に着目した解析を行うことにより、漏洩 音発生(漏洩音が支配的になる)と判定するしき い値を算出する。

# 2. 実験方法

カオス分析データは、自家発電機の蒸気圧力変 換弁近傍における暗騒音データと模擬漏洩音データを用いた。漏洩音発生源には、高圧ガスの代替 として 0.35 M P a 飽和蒸気、細口ノズルの放出口 を使用した。模擬漏洩源とセンサとの距離は 16 m。測定した超音波の結果は、暗騒音 = 34 dB、 模擬漏洩音 = 54 dB であった。データの形式は、 1 データセットは 10 サンプルからなり、1 サンプルは 1,024 点/5msec である(図1)。

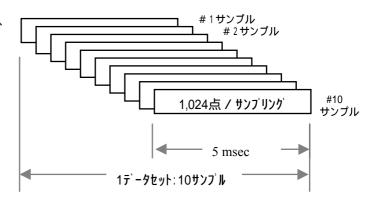


図1 データ構造

# 3. シミュレーションデータとカオス分析

### 3.1 シミュレーションデータ

漏洩音発生と判定するしきい値を算出するために、各#1サンプルを用いて暗騒音と模擬漏洩音との混合比を変化させた合成音を生成した。時間方向で暗騒音と模擬漏洩音の混合割合を約10%ごとに変化させて、合成音を生成する。例えば、合成音10とは、暗騒音データの最後部の100点(約10%)を模擬漏洩音データに置換した合成音である(図2)。なお、#2以降のサンプルを用いた結果も同様であったので、ここでは割愛する。

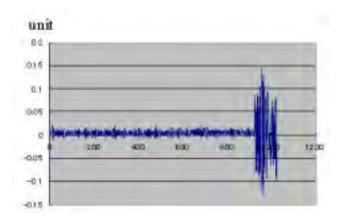


図 2 合成音 10 の波形

表 1 最適埋込パラメータの埋込次元、 遅れ時間、近傍軌道数

名称	暗騒音の 比率 (%)	埋込次元 (d)	遅れ時間 (τ)	近傍 軌道数 (N)
暗騒音	100	2	1	10
合成音10	90	2	1	2
合成音20	81	2	1	2
合成音30	71	2	1	2
合成音40	61	2	1	2
合成音50	51	2	1	4
合成音60	41	2	1	7
合成音70	32	2	1	6
合成音80	22	2	1	4
合成音90	12	2	1	3
合成音100	2	2	1	3
模擬漏洩音	0	2	1	3

### 3 . 2 データの解析手順

データの解析手順は次のとおりである。

ステップ1)暗騒音、合成音 10、...、合成音 100、 模擬漏洩音について、局所ファジィ再構成 法[1]を用いて予測値と実測値の二乗平均 誤差根(Root Mean Square Error: RMSE)が 最小になるように最適パラメータ、すなわ ち埋込次元(d)、遅れ時間( )および近 傍軌道数(N)を求める。

ステップ2)実測値と予測値のRMSEを求める。

ステップ3)最適パラメータを用いてアトラクタ を生成する。

ステップ4) 軌道平行測度 (Trajectory Parallel Measure: TPM) [2]および KS エントロピー (Kolmogorov-Sinai Entropy)を求める。

なお、カオス分析には Chaos Club [3] を用いた。

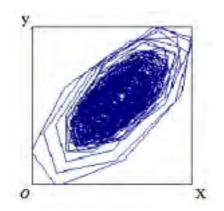


図3 暗騒音のアトラクタ

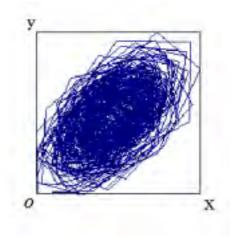


図4 模擬漏洩音のアトラクタ

### 4. カオス分析結果

最適埋込パラメータの埋込次元(d) 遅れ時間 ( ) 近傍軌道数(N)を表1に示す。暗騒音、合成音10、...、合成音100、模擬漏洩音において、d、 はそれぞれ2、1であり、近傍軌道数(N)は2~10までの値である(表1)。したがって、暗騒音、合成音、模擬漏洩音の位相構造に大きな差が無いと言える。解析手順のステップ3での暗騒音と模擬漏洩音のアトラクタを図3、図4に示す。

### 4.1 予測精度評価

時系列データを予測する場合、時系列データの 規則性が良いほど予測精度が高く、非規則性すな わちランダム性が増大するほど予測精度が落ちる。

暗騒音、合成音 10、…、合成音 100、模擬漏洩音の各二乗平均誤差根(RMSE)の変化を表 2 のRMSE欄に示す。合成音 10、…、合成音 40 の場合は、暗騒音が多く含まれるデータを使って混合時系列を予測する事になり、逆に、合成音 60 以降の場合には、模擬漏洩音が多く含まれるデータを使って予測する事になる。したがって、RMSEは合成音 50 でピークとなっている。ただし、暗騒音

表 2 カオス分析結果

名称	RMSE	TPM avg.	KSエントロピー
暗騒音	0.0028	0.103	2.15
合成音10	0.0143	0.101	2.08
合成音20	0.0170	0.098	1.97
合成音30	0.0233	0.100	1.93
合成音40	0.0247	0.091	1.88
合成音50	0.0260	0.086	1.84
合成音60	0.0222	0.086	1.85
合成音70	0.0227	0.078	1.81
合成音80	0.0187	0.074	1.87
合成音90	0.0191	0.071	1.92
合成音100	0.0194	0.062	2.00
模擬漏洩音	0.0196	0.062	1.99

(34 dB)よりも模擬漏洩音(54 dB)の振幅が遙かに大きいため、合成音 60 以降場合の方が値は大きくなる。

# 4.2 軌道平行測度評価

軌道平行測度(TPM)は、アトラクタを構成する部分空間内を通過する軌道の振舞を、平行度合いで評価する。TPMの平均値(TPM avg.)の値がゼロに接近するほど規則性が高く、0.5に近づくにつれてランダム性が大きくなる、すなわち複雑な振舞になる。

表2のTPMavg.の変化をみると、暗騒音のみの時は他に比較して0.103と大きく、混合比が増加するに従い小さくなり、模擬漏洩音のみになると0.062と最も小さくなっている。

### 4.3 KSエントロピー評価

KS エントロピーは、カオスの特徴の一つである予測不能性を定量化する指標である。表2の KS エントロピーは暗騒音のみの時が2.15 と最も大きく予測可能時間の上限が最も短いことを示し、模擬漏洩音の混合比が増えるにしたがって小さくなる。しかし、混合比が70%(合成音70)を超える辺りから逆に増加に転じている。この理由は、暗騒音と模擬漏洩音の時系列がほぼ半数ずつの時を境にアトラクタの様相が変化している可能性があり、この理由は今後の検討課題とする。

### 5. 本実験データからの予測可能性

本研究は、暗騒音と模擬漏洩音との混合比を変化させた合成音を生成して、漏洩音発生と判定するしきい値を算出した。以下、今回の実験データを基に計算した結果を以下に示す。

### (1) 予測精度によるしきい値

二乗平均誤差根 (RMSE) から見ると、暗騒音のみの場合は、RMSE=0.0028で、混合比が10%(合成音10)の場合、RMSE=0.0143で、この差は5.13倍であり、倍率しきい値を4とすると、最大予測誤差と同様に混合比が10%未満で検出可能と予想される。

### (2) アトラクタの位相構造によるしきい値

TPM avg.から見ると、暗騒音のみの時は他の音と比べて 0.103 と大きく、混合比が増加するに従い小さくなり、模擬漏洩音のみになると 0.062 と最も小さくなっている。暗騒音の TPM avg.に対して 10%減をしきい値とすると、TPM avg.= 0.093 となり混合比 40%以上で漏洩検出可能となる。

# (3) KSエントロピーによるしきい値

暗騒音時の KS エントロピーは 2.15 で、模擬漏洩音のみの場合は 1.99 であり、この 2 つを比較すると有意差は見られないが、混合比の増加にしたがって混合比が60%~70%位まで KSエントロピーは減少を続ける。一方 70%以上になると KSエントロピーは増加してゆく。 KSエントロピーの増減傾向を評価することにより、暗騒音と模擬漏洩音の混合が半々である状態を検出できると予想される。また、しきい値を暗騒音時の 10%減、すなわち 1.93 とすると混合比が 20%程度の状態で検出が可能と考えられる。

# 6. おわりに

運転現場で測定した暗騒音や模擬漏洩音と、それらを混合した合成音を基に、音の位相構造の差に着目して、漏洩発生と判定するためのしきい値を算出した。今回使用した模擬漏洩音の振幅が暗騒音の振幅と比べ約 15 倍と非常に大きく、ある意味ではかなり重度な事故の漏洩検出といえる。しかし、現実にはこのような重度の漏洩に至る過程で微小な漏洩が発生する。そこで、大量漏洩に至る前の微小な漏洩をいかに早く検出できるかを今後の課題とする。

なお、本研究は石油産業活性化センター(PEC) の補助金を得て行った。

### 参考文献

[1] 五百旗頭 正, 菅家 正康, 藤本 泰成, 鈴木 新悟, "カオス的時系列の短期予測のための局所ファジィ再構成法," 日本ファジィ学会誌, 第7巻, 第1号, pp.186-194 (1995)

- [2] http://www.riccx.com/j/ChaosClub.pdf
- [3] 藤本 泰成, 五百旗頭 正, 谷村 隆義, "観測された時系列データの決定論的性質を測る軌道平行測度法," 日本ファジィ学会誌, 第9巻, 第4号, pp.580-588 (1997)

### 連絡先:

〒299-0107 千葉県市原市姉崎海岸 26 番地 出光興産(株)製造部プロセスシステムセンター 谷 哲次

電話: 0436-61-7895 Fax.: 0436-61-7836 Email: tetsuji.tani@si.idemitsu.co.jp

# ごみ焼却炉の主成分分析による燃焼制御状態の評価

Robust PCA for Combustion Control of Incinerator

市橋秀友,本多克宏

藤吉誠,福島龍太郎,林一久

Hidetomo Ichihashi, Katsuhiro Honda Makoto Fujiyoshi, Ryut

Makoto Fujiyoshi, Ryutaro Fukushima, Kazuhisa Hayashi

大阪府立大学

Osaka Prefecture University

日立造船

Hitachi Zosen Corporation

Abstract: Robust principal component analysis (RPCA) using Davé's noise clustering and KLFCM clustering is applied to the sensor data measured from a garbage incinerator operated by a combustion control system. Correlations between variables such as  $O_2$  concentration, amount of air and flapper opening, which are represented by factor loadings of the RPCA clearly show typical control actions taken by the control system. The biplot of the factor loadings graphically illustrate the daily status of the control and clarify a close relationship between the CO emission frequency and the factor loadings.

#### I はじめに

ごみ焼却用内部循環流動床炉 [1] の日毎の燃焼制御状態を主成分分析での因子負荷量を指標として評価する方法について述べる.因子負荷量は炉内の  $O_2$  濃度や 1 次空気量などのセンサーデータ (p 個の変数)とそれらの主成分との間の相関を表す数値で,変数間の相関係数はp(p-1)/2 あるのに対して,因子負荷量は p 個だけであり情報がより要約されている.

ごみ焼却炉でオンライン計測されている日毎のセンサーデータに Davé のノイズクラスタリング法 [2] と KLFCM 法を適用する [3] . その際にクラスター数を c=1 とするとロバストな主成分分析となりファジィ因子負荷量 [4] が求められる . 得られる稼動日毎の因子負荷量を観測データのように見なしてさらに主成分分析を行いバイプロット (第 2 固有値までの主成分得点と主成分ベクトルを平面にプロットした図)を作成する . バイプロットでは CO 発生の高い日が中央に表示され , 因子負荷量の相違から CO 発生の高い日の特徴が明確化される .

### II ごみ焼却炉燃焼制御状態のロバスト主成分分析

ごみは破砕装置で破砕されたのちスクリュー方式の給 塵装置で炉内に投入される、炉内は600 に保たれ、内 部循環する流動層内で投入ごみの乾燥,熱分解が起こ る.熱分解で発生した固体有機物,揮発分は1,000 フリーボード部で2次空気を追加することで完全燃焼 される.燃焼ガスは,その後排ガス処理系で処理され大 気放出される.投入発熱量が一定となるように,またご み切れ,どか落ち等がなくなるようにごみを炉内に供給 することが燃焼状態を安定にするうえで重要であるが, ごみ質の相違,1日の焼却量からの制約等により,ごみ 量を常に一定に保つことは困難である.層内温度が580 ~600 の範囲のとき,揮発分,固定炭素の生成割合が フリーボード部での燃焼に最適な割合になることが知ら れている.またごみ供給量に変動があった場合,低酸素 側では酸素不足により,高酸素側ではフリーボード部で の温度低下により不完全燃焼を起こす.そのため,1,2次空気量は酸素濃度を一定とするように供給量が調節さ れる.

フラッパー開度,層上酸素濃度,層内温度が制御器への入力,給塵装置モーター速度,ろ液噴霧バルブ開度,炉内へ供給する空気量が制御器からの出力(操作量)である.制御器は速度型であり,現在の操作量からの修正量が出力される.ダイオキシン類濃度と相関があるとされている CO 濃度平均が 100ppm を超えるデータ発生率を減少させることが当面の制御目的である [1] .

以下の観測データは 2 秒ごとに測定されたもので , Ao は操作量 (制御器の出力) , Ai はセンサーでの測定値である . 制御器の出力は実際の測定値と必ずしも同じ値ではないので Ao と Ai が用いられている .

- ・Ai1:フラッパ開度 (0~100.00 %) ごみが炉内に投入されるより約 30 秒前のごみ量の計測値.
- ・Ai2:炉出口  $O_2$  濃度  $(0 \sim 25.000 \%)$  流動層層上  $O_2$  センサーによる燃焼直後の酸素濃度 .
- ・Ai3: 2 次空気量  $(0 \sim 7.500 \mathrm{KNm^3/h})$  空気量をセンサーで測定した値 .
- ・Ai4:焼却量 (t/H)
- ・Ai5:モード指令 (0 停止, 1 運転)
- ・Ai6:層内温度  $(0 \sim 1200.0)$  )K 熱電対センサーによる 流動層砂層温度 .
- · Ai7:CO 濃度 (0~500.0ppm)
- ・Ao8: ろ液噴霧量 (0~1.00m<sup>3</sup>/h)
- ・Ao9:コンベア供給速度 (0 ~ 7.000rpm) ごみを炉内に投入する速度を増減する量
- ・Ao10:2 次空気修正  $(0 \sim 7.500 \mathrm{KNm^3/h})$  炉内の酸素濃度を一定とするように空気供給量を増減する量 .
- ・Ao11:1 次空気修正 (0~7.500KNm<sup>3</sup>/h) 同上

今回用いたデータは,2003年に計測された日々のデータのうちからランダムに選んだ 1 号炉 20 日,2 号炉の 19 日分で延べ 39 日分である.また用いた変数は上記の 11 種類からあまり変化の無いモード指令とろ液境霧量,および主たる制御量である CO 濃度の 3 変数を除いた 8 変数とした.CO 濃度はその発生と燃焼制御との関連を主成分分析の結果と対比することによって明確化することが目的である.また,計測に要する時間などの時間遅れを考慮するためにすべて 10 件毎(20 秒間)に平均した.さらに,計測単位の影響が無いように平均 0,分散 1 に基準化を行った.

変数間の相関係数はそれらがどの程度比例的もしく は逆比例的に変化しているかを表すものであるので,当

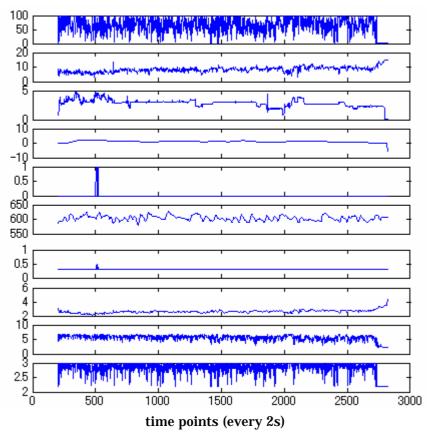


Fig.1 An example of sensor data observed in a day from No.2 incinerator. Each column corresponds to a variable.

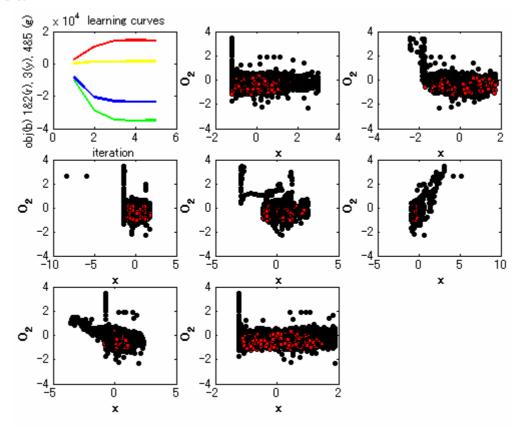


Fig.2 Noise clustering results with c=1,  $\lambda$  =2.0,  $\Delta$ =-3. Left top graph shows the learning curves, i.e., changes of values in the objective function (blue) and its four terms (1&2:red, 3:yellow, 4&5:green). Other figures show 2-D plot of the variables of Ai1 ~ Ai4, Ai6,Ao9 ~ Ao11 against O<sub>2</sub> concentration (from left to right and top to bottom). Black circles are regarded as noise data.

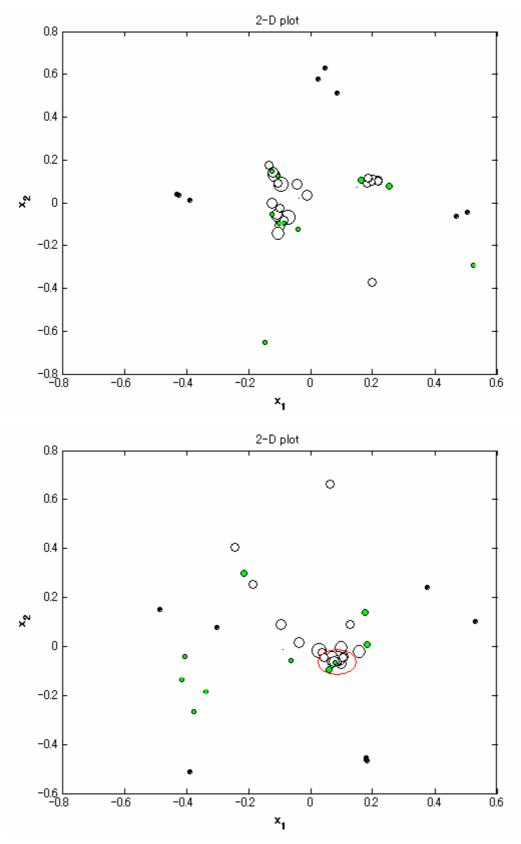


Fig.3 Biplot of factor loadings obtained from PCA of incinerator data. Top: Regular PCA, Bottom: Robust PCA with the noise clustering. Each white circle represents a day when the incinerators were operated. Diameter of white circle denotes CO emission frequency. Each black circle corresponds to a variable represented by the elements of PC vectors associated with the two largest eigenvalues . Signs of the factor loadings are arranged so that the one for the flapper is positive. In the bottom figure, 5 days with the largest CO emission are included within the red ellipse.

該日に制御量や操作量の間の比例制御がどの程度強く現れたかを示している。因子負荷量は主成分と変数間の相関を表しているが,主成分は主要な変動を代表しているので,第1主成分の因子負荷量を変数間の比例関係のおおまかな指標,もしくは特徴量として用いる。そして,さらに要約した表示法として日毎の因子負荷量を主成分分析によるバイプロットで平面に布置する。

KL 情報量正則化 FCM 法に Davé のノイズクラスタリングを採用した Local Robust PCA[3] の目的関数を

$$J_{\lambda\Delta} = \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{n} u_{ik} d_{ik} + \delta \sum_{k=1}^{n} u_{c+1 \ k}$$

$$+ \lambda \sum_{i=1}^{c+1} \sum_{k=1}^{n} u_{ik} \log \frac{u_{ik}}{\pi_{i}}$$

$$+ \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{n} u_{ik} \log |A_{i}|$$

$$+ \sum_{k=1}^{n} u_{c+1 \ k} \log K$$

$$d_{ik} = (\mathbf{x}_{k} - \mathbf{v}_{i})^{T} A_{i}^{-1} (\mathbf{x}_{k} - \mathbf{v}_{i})$$
(1)

とする.クラスターの中心ベクトルを  $v_i$  , データ  $x_k$  が クラスター i に属する度合いをメンバシップ  $u_{ik}$  とする.  $d_{ik}$  はデータ点からクラスター中心までのマハラノビス 距離の 2 乗である.

それぞれの日毎にクラスター数 c=1,  $\lambda=2.0$ ,  $\delta + log K = -3$  としてロバスト PCA を行った.また, 比較のために通常の主成分分析も行った.第1主成分 に対応する因子負荷量を求め,それらの2次元平面の バイプロットを作成した.これにより,因子負荷量の近 い日同士は一日の燃焼制御における変数の変化 (変数間 の比例関係)が類似していると考えられるので,平面上 の布置から CO 発生率の高い日の特徴が明らかになる。 Fig.1 は , ある日の 1 日分の 2 秒毎の計測データの時系 列で CO 濃度を除く Ai1 から Ao11 の 10 変数を上から 順に表示している. Fig.2 はノイズクラスタリングの結 果を表示したもので,左上は目的関数値(青)[3]が収 束する様子を示している.目的関数の各項の第1と2の 和,第3,第4と5の和の値が,順に赤,黄,緑で表さ れている. その他のグラフは左上から右下へ 〇2 以外の 7 つの変数を横軸に $, O_2$  を縦軸にデータ(20 秒ごとの 平均値)をプロットしたものである.黒丸はノイズクラ スターに分類されたデータを表している.

Fig.3 の上図は主成分分析による場合,下図はノイズクラスタリングによる場合の因子負荷量のバイプロットである. どちらも,日毎の因子負荷量の8次元ベクトルに対して主成分分析を再度行ったもので,第2固有値(下図は寄与率57.5%)まで求めバイプロットを描いている. Fig.3 で白丸の直径は CO 濃度の20秒間の平均値が100ppm以上の回数に比例させて表示している.下図ではCO発生の最も多い7日分が中央(-0.05,-0.1)付近にプロットされている. タい方から5日分は赤の楕円の中に含まれている.中央付近にはCO発生率の低い日

Table I フラッパ開度,2次空気修正,1次空気量の因子負荷量が高い割合

CO 発生件数	3 変数で高因子負荷量
0~50(8日)	4 日 $(50.0%)$
50~100(21日)	8 日 (38.1%)
100~ (10日)	8 日 (80.0%)

(黄緑) もあるが,高い日はすべて中央付近にプロットされている.

このように、ノイズクラスタリングによって、主成分析を用いた日々の燃焼制御のグラフィカルな表現が可能である.また、Table 1 よりノイズクラスタリングによるロバスト PCA の場合は、フラッパ、2 次空気修正、1 次空気修正の3つの変数の因子負荷量が高い場合に CO 発生率が高い傾向が窺える.すなわち、提案法によって主要な傾向を表すデータだけのクラスターを抽出すれば、CO 発生件数が多い日はフラッパ開度と2次空気修正、1 次空気修正の相関が高いといえる.

#### III おわりに

ごみ焼却炉の制御状態をノイズクラスタリングによるロバストな主成分分析によりグラフィカルに表示し, CO 発生とセンサーデータ間の相関の特徴を明らかにできることを示した.M 推定やロバスト主成分分析の種々の手法での比較や提案法で得られた分析結果を燃焼制御の改善に繋げることが今後の課題である.

### References

- 1. 藤吉誠,福島龍太郎,桝屋道治:ごみ焼却炉制御の インテリジェント化,第18回ファジィシステムシン ポジウム講演論文集,pp.25-28 (2002)
- 2. R. N. Davé, R. Krishnapuram: Robust Clustering Method: A unified View, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol.5, No.2, pp.270-293(1997)
- 3. 市橋秀友,本多克宏:リレーショナルクラスタリン グへのノイズクラスタの応用,第 20 回ファジィシステムシンポジウム講演予講集 (2004)
- Y. Yabuuchi and J. Watada: Fuzzy Principal Component Analysis and Its Application, *Biomedical Fuzzy and Human Sciences*, Vol.3, No.1, pp.83-92 (1997)

[連絡先] 市橋秀友 599-8531 堺市学園町 1 - 1 大阪府立大学大学院工学研究科電気・情報系専攻 TEL 0722-54-9352 , FAX 0722-54-9915(事務室) E-mail ichi@ie.osakafu-u.ac.jp

# ファジィエネルギー領域切換え法による 劣駆動マニピュレータの制御

# Control of Underactuated Manipulators Using a Switching Method of Fuzzy Energy Regions

泉 清高,渡辺桂吾,一田啓介,保田明男 Kiyotaka Izumi, Keigo Watanabe, Keisuke Ichida, and Akio Yasuda 佐賀大学

Saga University

**Abstract**: A switching control method has been already proposed to control nonholonomic systems by suitably switching some partially-stable controllers. For the conventional methods that use a fuzzy switching rule composed of errors in positions, velocities, etc., if a controlled situation is different from the trained one, then we could not necessarily obtain a satisfactory result. In this paper, we propose a new switching control method using fuzzy energy regions. The fuzzy reasoning for switching logic of energy regions provides the suitable index of partially stable controllers. Design parameters of fuzzy energy regions are acquired by a genetic algorithm (GA). The effectiveness of the present method is illustrated through some simulations.

### 1. はじめに

劣駆動システムとは,非ホロノミック拘束を有するシステムの一つであり,少ない制御入力で多くの一般化座標を制御できる.劣駆動システムの簡単な例として,非駆動(自由)関節を有する2リンク平面劣駆動マニピュレータが挙げられる[1,2].動力学の非線形性からカオス挙動など劣駆動マニピュレータでしか実現できない挙動を示し,巧みな動作実現が可能となる.

劣駆動システムの一制御手法として,切換え制御法[3,4]があり,ハイブリッド制御法とも呼ばれている. 文献[3]では,文献[5]で述べられているドリフト項を含まないシステムに対して,論理型切換え法を提案しており,切換え領域の設定において,重複領域を導入することによりチャタリングを抑制している.文献[4]では,部分安定化制御器をトルク算出制御法で設計し,ファジィ推論にて直接用いるべき制御器番号を算出する切換え手法を提案している.

本稿では,ファジィエネルギー領域切換え法とその設計パラメータを遺伝的アルゴリズムにより設計する方法について提案する.制御系の基本構成は,文献[4]と同様に部分安定化制御器をトルク算出制御とし,切換え手法としてファジィエネルギー領域法を用いる.提

案手法の特長としては,エネルギー領域をいくつかの部分安定化制御器適用領域に分割する境界曲線をファジィルールで表現することにより,設計が困難であった境界曲線の設計を大雑把に行えるようになる利点がある.ファジィエネルギー領域の設計は遺伝的アルゴリズム(GA)を用いる.本手法を2リンク劣駆動マニピュレータに適用し,その有効性をシミュレーションにより検討する.

# 2. 2 リンク劣駆動マニピュレータ

物理パラメータを表 1 のように定義するとし,第 2 関節を非駆動関節とする 2 リンク劣駆動マニピュレータを図 1 に示す.

また,動力学はラグランジュ法にて導出でき,ラグランジュ方程式は

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} + \frac{\partial \Phi}{\partial \theta_1} = \tau_1$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} + \frac{\partial \Phi}{\partial \theta_2} = 0$$

となる.ここで,L はラグラジアン, $\Phi$  は散逸関数である. $\theta = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ , $\tau = [\tau_1 \ 0]^T$  とすると動力学モデルは,以下のように書ける.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) = \tau \tag{1}$$

Table 1 Definition of physical parameters

Symbols	Physical meaning
$ au_1$	Input toruqe [Nm]
$\theta_1, \theta_2$	Link angles [rad]
$m_1, m_2$	Mass of link [kg]
$l_1, l_2$	Link length [m]
$l_{g1}, l_{g2}$	Distance between joint
	and center of gravity [m]
$I_1, I_2$	Inertia [kgm <sup>2</sup> ]
$\mu_1,\mu_2$	Viscous coefficent [Ns/m <sup>2</sup> ]

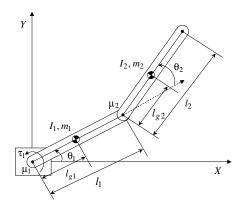


Fig. 1 Model of 2-link underactuated manipulator

ただし

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} M_{11}(\theta) & M_{12}(\theta) \\ M_{21}(\theta) & M_{22}(\theta) \end{bmatrix}$$

$$M_{11} = (m_1 l_{g2}^2 + m_2 l_1^2 + I_1) + (m_2 l_{g2}^2 + I_2) + 2m_2 l_1 l_{g2} \cos \theta_2$$

$$M_{12} = (m_2 l_{g2}^2 + I_2) + m_2 l_1 l_{g2} \cos \theta_2$$

$$M_{21} = m_2 l_{g2}^2 + m_2 l_1 l_{g2} \cos \theta_2 + I_2$$

$$M_{22} = m_2 l_{g2}^2 + I_2$$

$$h(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} h_1(\theta, \dot{\theta}) h_2(\theta, \dot{\theta}) \end{bmatrix}^T$$

$$h_1 = -(m_2 l_1 l_{g2})(2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2 + \mu_1 \dot{\theta}_1$$

$$h_2 = m_2 l_1 l_{e2} \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 + \mu_2 \dot{\theta}_2$$

である.

# 3. 切換え制御法

### 3.1 制御系の構成

n 自由度を有するシステムを考える場合,このシステムにおけるアクチュエータの数を  $m_u$  とするならば,一つの部分安定な制御器により安定化できる状態変数をr(r < 2n) と定義する.複数の部分安定な制御器を用

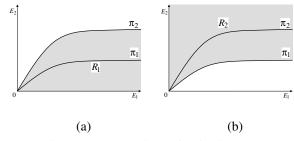


Fig. 2 Energy regions of switching method

いて安定可能な状態変数が,重根も含み 2n 個の状態変数をすべて含むような提案手法で,必要な部分安定な制御器の数 p を決定する.例えば,部分安定化制御器としてトルク算出制御器を用いるとするならば,トルク算出制御器で確実に安定化できる状態変数の数 r は, $2m_u$  である.n 自由度の非ホロノミックシステムに適用する場合,必要な部分安定な制御器の数の最小値は

$$p_{\min} =_n C_{m_u} \tag{2}$$

となる.

3.2 トルク算出制御による部分安定化制御器の設計 2 リンク劣駆動マニピュレータの順動力学は

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = M^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \left\{ -h(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \boldsymbol{\tau} \right\}$$

となる.展開すると

$$\ddot{\theta}_1 = -\frac{M_{22}}{D}h_1 + \frac{M_{12}}{D}h_2 + \frac{M_{22}}{D}\tau_1 \tag{3}$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{M_{12}}{D}h_1 - \frac{M_{11}}{D}h_2 - \frac{M_{12}}{D}\tau_1 \tag{4}$$

と表現できる.ただし,Dは慣性行列 $M(\theta)$ の行列式で

$$D = M_{11}M_{22} - M_{12}^2$$

である. $\theta_1$  のみを安定化するトルク算出制御器はリンク 1 の目標角度を  $\theta_{d1}$  , 目標角速度を  $\dot{\theta}_{d1}$  , 比例ゲインを  $K_{\nu 1}$  とし,修正角加速度

$$\ddot{\theta}_{1}^{*} = \ddot{\theta}_{d1} + K_{v1} \left( \dot{\theta}_{d1} - \dot{\theta}_{1} \right) + K_{p1} \left( \theta_{d1} - \theta_{1} \right) \tag{5}$$

を用いて

$$\tau_1 = \frac{D}{M_{22}} \left( \ddot{\theta}_1^* + \frac{M_{22}}{D} h_1 - \frac{M_{12}}{D} h_2 \right) \tag{6}$$

として構成する.同様にして  $\theta_2$  のみを安定化するトルク算出制御器は

$$\ddot{\theta}_2^* = \ddot{\theta}_{d2} + K_{v2} \left( \dot{\theta}_{d2} - \dot{\theta}_2 \right) + K_{p2} \left( \theta_{d2} - \theta_2 \right) \tag{7}$$

$$\tau_2 = -\frac{D}{M_{12}} \left( \ddot{\theta}_2^* - \frac{M_{12}}{D} h_1 + \frac{M_{11}}{D} h_2 \right) \tag{8}$$

となる.

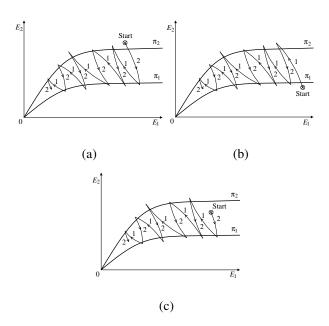


Fig. 3 Convergence situations of switching method with two controllers

### 4. ファジィエネルギー領域切換え法

#### 4.1 論理型切換え法

従来の論理型エネルギー切換え法 [3] では,ドリフト項を含まない非ホロノミックシステムを取り扱っている.しかしながら,2リンク劣駆動マニピュレータのようにドリフト項を有するシステムに対しては議論されていない.

本稿では,動力学導出のときの一般化座標を用いてエネルギーを定義する.比較的容易に利用できる一般化座標を用いてエネルギーを定義する.エネルギー領域切換え法の概念を 2 リンク劣駆動マニピュレータの例で説明する.このマニピュレータの一般化座標は各リンクの関節角  $\theta_1$  , $\theta_2$  であり,各リンクの目標関節角を  $\theta_{d1}$  , $\theta_{d2}$  とし,各リンクの関節角度誤差を

$$e_i \stackrel{\triangle}{=} \theta_{di} - \theta_i, \quad i = 1, 2$$
 (9)

とし, 各リンクのエネルギーを

$$E_i \stackrel{\triangle}{=} e_i^2 + \dot{e}_i^2, \quad i = 1, 2 \tag{10}$$

と定義する.さらにリンクiのみを安定化させる部分安定化制御器を $C_i$ とする. $E_i$ で構成されるエネルギー面を図2に示す.ここで, $\pi_i$ はエネルギー面を分割する境界曲面であり,文献[3]と同じように指数関数で表している $R_i$ は $C_i$ を用いる部分エネルギー領域である. $C_1$ を制御器として用いると, $\theta_1$ に関しては安定化され

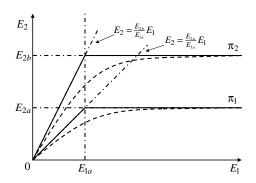


Fig. 4 Region approximations for a logical switching

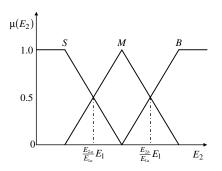


Fig. 5 Membership functions for  $E_1 \le E_{1a}$ 

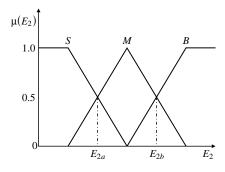


Fig. 6 Membership functions for  $E_1 > E_{1a}$ 

るので  $E_1$  は減少し, $E_2$  は増加する.同様にして  $C_2$  を制御器として用いると, $E_1$  は増加し, $E_2$  は減少する.各エネルギーが減少するとき単調であると仮定するならばエネルギー面で応答は図 3 となる.ただし,図中の軌跡の横に示している数字は,そのとき用いている部分安定化制御器  $C_i$  の添字である.図 3(a) は初期値が  $R_2$  の領域から始まる場合,図 3(b) は  $R_1$  の領域から始まる場合である.ただし,図 3(c) となる場合は添字の番号が最も大きい制御器を選択する.この例では部分安定化制御器が  $C_1$  と  $C_2$  としているので,制御器  $C_2$  を選択する.

#### 4.2 エネルギー境界曲線の直線近似

エネルギー領域を分割するための境界曲線の設計パ ラメータは,指数関数を用いるとステップ応答の振幅 と時定数で表せる.マニピュレータの制御応答はこれ らのパラメータに依存するので,所望の制御応答を得 るためには,適切にこれらのパラメータを設定しなけ ればならない、しかしながら、一意には設定すること ができず,その設定は困難である.そこで,設定パラ メータを大雑把に設定できるように,ファジィ推論を用 いて境界曲線にあいまい性を含ませることを提案する. その準備として,境界曲線の直線近似を考える.例え ば,図2におけるエネルギー面での境界曲線 $\pi_1$ を,図 4 に示すように  $\pi_1$  の  $E_1$  に対する立ち上がり接線と漸 近線  $E_2 = E_{2a}$  との  $E_1$  軸上の交点を  $E_{1a}$  とすると,そ の接線の方程式は  $E_2 = (E_{2a}/E_{1a})E_1$  として得られる.  $\pi_2$  に関しては  $\pi_1$  の振幅の実数倍として設定するもの とすれば , 同様にして  $\pi_2$  の  $E_1$  に対する立ち上がり接 線の方程式は  $E_2 = (E_{2b}/E_{1a})E_1$  として得られる.ただ し, $E_{2b}$ は $\pi_2$ の極限値である.得られた直線を用いる と,領域  $R_i$  は  $E_1 \le E_{1a}$  のとき

$$R_1: 0 \le E_2 < \frac{E_{2b}}{E_{1a}} E_1$$
  
 $R_2: \frac{E_{2a}}{E_{1a}} E_1 \le E_2$ 

となり,  $E_1 > E_{1a}$  のとき

$$R_1: 0 \le E_2 < E_{2b}$$
  
 $R_2: E_{2a} \le E_2$ 

となる.

# 4.3 近似直線のファジィルール表現

先に述べた直線近似による領域分割を導入し, $E_{1a}$ , $E_{2a}$  および  $E_{2b}$  を設計パラメータとすると,図 5 と図 6 に示すように  $E_2$  に対してファジィ集合が定義できる.

提案手法によれば,導入したファジィ集合により境界曲線が一種の幅を持つことになる.近似直線のパラメータ  $E_1$  が  $E_1 \leq E_{1a}$  のときは, $E_2$  が  $E_{2a}E_1/E_{1a}$  と  $E_{2b}E_1/E_{1a}$  となるとき,メンバシップ関数の適合度が 0.5 となるように設計する.また  $E_1$  が  $E_1 > E_{1a}$  となる場合は, $E_2$  が  $E_{2a}$  と  $E_{2b}$  となるときにメンバシップ 関数の適合度が 0.5 となるように設計する.さらに,図 3 に示した理想的なエネルギー応答を得るためには,重複領域では一時刻前の制御器を保持するので,一時刻前の制御器番号  $\phi_{t-1}=i$  を導入すると,図 3 を実現するファジィルールは

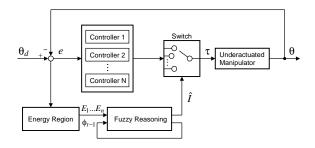


Fig. 7 Block diagram of the proposed control system

Rule 1: If  $E_2 = S$  then  $s_1 = 1$ 

Rule 2: If  $E_2 = M$  and  $\phi_{t-1} = 1$  then  $s_2 = 1$ Rule 3: If  $E_2 = M$  and  $\phi_{t-1} = 2$  then  $s_3 = 2$ 

Rule 4: If  $E_2 = B$  then  $s_4 = 2$ 

となる.ただし, $s_i$  はルールi における使用すべき制御器番号である.このとき,前件部適合度 $h_i$  は,i=1,4に関しては

$$h_i = \mu_i(E_2) \tag{11}$$

とし, i = 2, 3 に関しては

$$h_i = \mu_i(E_2)\mu_i(\phi_{t-1})$$
 (12)

とする. ただし, $\mu_i(\phi_{t-1})$ , i=2, 3はl=1, 2に関して

$$\mu_i(\phi_{t-1}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \phi_{t-1} = l \text{ is true} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$
 (13)

とする.ファジィ推論は,重み付き平均値として

$$\hat{s} = \sum_{i=1}^{4} v_i s_i$$

$$v_i = \frac{h_i}{\sum_{j=1}^{4} h_j}$$

で算出する.ただし, $\hat{s}$  は実数値での制御器番号の推定値である.推論結果としては,選択すべき制御器番号(整数値)であるので,最終的なファジィ推定結果 $\hat{I}$  は

$$\hat{I} = [\hat{s} + 0.5] \tag{14}$$

として算出する.ただし,[·] はガウス記号を示す.図7 にファジィエネルギー領域切換え法による劣駆動マニピュレータの制御系を示す.

# 5. GA によるファジィエネルギー領域設計

ファジィエネルギー領域の設計パラメータ  $E_{1a}$  ,  $E_{2a}$  および  $E_{2b}$  の設定に GA を用いる.各パラメータを 32 [bit] で遺伝子表現し,探索範囲は各パラメータについ

Table 2 Physical parameters of 2 link underactuated manipulator

$m_1$	$m_2$	$l_1$	$l_2$	$\mu_1$	$\mu_2$
0.582	0.079	0.400	0.220	0	0.020

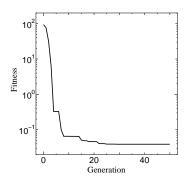


Fig. 8 Generation history of GA

て 0.1 から 15 までとする. 評価関数の構成では, 異なる 2 つの初期状態ベクトル

による時間応答を同時に最適化するものとし,サンプリング間隔は 0.01 [s],シミュレーション時間を 30 [s] とし,目標角度  $\theta_d = [\theta_1 \ \theta_2]$  および目標角速度  $\dot{\theta}_d$  はすべて 0 とする.リンク 1 に対する部分安定化制御器 1 の比例ゲイン  $K_{p1}$  は 1 、微分ゲイン  $K_{v1}$  は 1 とし,リンク 2 に対する制御器 2 では比例ゲイン  $K_{p2}$  を 1 、 $K_{v2}$  を 12 としてシミュレーションを行い,評価関数の設定は

$$f_c = \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=2001}^{3000} \sum_{k=1}^{2} E_k(j)$$
 (15)

とする.ただし, i は初期条件の番号, j はシミュレーションにおける離散時間指標であり,マニピュレータの物理パラメータは表2とする.劣駆動システムは初期値に対して敏感であり,過渡応答の領域を考慮せず,シミュレーション時間で20秒から30秒間におけるエネルギーの総和を用いていることに注意されたい.GAの設計パラメータとして,交叉手法は,3個体によるトーナメント選択を用いた一様交叉とし,交叉率を0.6とする.世代交代の際には,エリート戦略を用い,エリート個体数は10とする.突然変異率は,96とする.

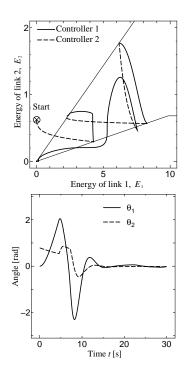


Fig. 9 Control results for the same initial state vector  $[0 \pi/4 \ 0 \ 0]$  as that in the GA search

終了条件は 50 世代とし,個体数は 100 とする.最大適応度の世代履歴を示す図 8 から,25 世代で収束していることが分かる.また,GA により最適化したことで得られた結果は, $E_{1a}=9.849$ , $E_{2a}=0.682$ , $E_{2b}=2.823$ であった. $^1x(0)$  のときのエネルギー軌道と時間応答を図 9 に, $^2x(0)$  のときのそれらを図 10 に示す.図 9 では,制御器 2 を適用すべき領域から制御を開始しているので,制御器 2 を適用し,その後制御器を 5 回切換えて最終的には制御器 1 を用いて収束している.そのときの時間応答から,幾分振動しているものの収束していることが分かる.図 10 では,制御器 1 を適用すべき領域から制御を開始しており,切換えなしに各リンクが収束していることが分かる.これらの結果より,切換え領域が適切に設計できていることが確認できる.

# 6. テストシミュレーション

探索された設計パラメータは一切変更すること無しに初期状態値を  $\theta_1(0)=5/6\pi$ ,  $\theta_2(0)=\pi/4$ ,  $\dot{\theta}_1(0)=0$ ,  $\dot{\theta}_2(0)=0$  および  $\theta_1(0)=4/5\pi$ ,  $\theta_2(0)=\pi/14$ ,  $\dot{\theta}_1(0)=0$ ,  $\dot{\theta}_2(0)=0$  としたときのエネルギー軌道を図 11 に示す . 図 11 から探索摂動領域の初期値に対しても同様に収束している結果が得られ,本手法の有効性が示されて

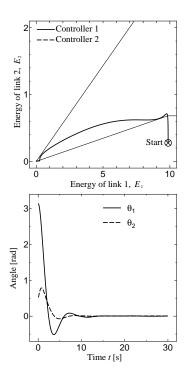


Fig. 10 Control results for the same initial state vector  $[\pi \pi/6 \ 0 \ 0]$  as that in the GA search

いることが分かる.これらのシミュレーションにより,本手法が劣駆動マニピュレータの制御法としてうまく利用できることが検証できた.

# 7. おわりに

本稿では、部分安定化制御器にトルク算出制御を用いた切換え制御における切換え手法として、ファジィエネルギー領域切換え法を提案した、提案手法の設計パラメータを遺伝的アルゴリズムで最適化し、ファジィエネルギー領域の設計を簡略化することができた。また、提案手法を2リンク劣駆動マニピュレータに適用し、探索された設計パラメータを変更すること無しに、探索時と異なる初期値からも各リンクの角度が目標値に収束することを確認した。

# 参考文献

- [1] 中村仁彦, 濃沼雅史, 鈴木高宏: 自由関節を持つ平面アームのカオス的挙動と非線形制御 ドリフトを持つ非ホロノミック機械の制御-, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 4, pp. 602-6111, 1996
- [2] 小林啓吾,井村順一,吉川恒夫:一つの非駆動関節 を持つ平面劣駆動マニピュレータの可制御性,日

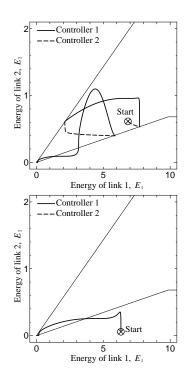


Fig. 11 Test simulation results with initial state vectors  $[5/6\pi \pi/4 \ 0 \ 0]$  and  $[4/5\pi \pi/14 \ 0 \ 0]$ 

本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 8, pp. 1167-1172, 1999

- [3] J. P. Hespanha and A. S. Morse: Stablization of non-holonomic integrators via logic-based switching, *Automatica*, Vol. 35, pp. 385–393, 1999
- [4] L. Udawatta, K. Watanabe, K. Izumi, and K. Kiguchi: Control of underactuated manipulators using fuzzy logic based switching controller, *J. of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 38, pp. 155–173, 2003
- [5] R. W. Brockett: Asymptotic stability and feed-back stablization, *Diffential Genetric Control The-ory*, Vol. 27, pp. 181-191, Springer Verlag, 1983

# 連絡先

# 泉清高

佐賀大学大学院工学系研究科 生体機能システム制御工学専攻 〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地

Fax: 0952-28-8587

E-mail: izumi@me.saga-u.ac.jp

URL: http://robot.me.saga-u.ac.jp

# 話し言葉における感情を考慮した 知的インタラクションシステムの構築

# **Emotion Oriented Intelligent Interaction System for Spoken Language**

目良 和也 黒澤 義明 市村 匠

Kazuya MeraYoshiaki KurosawaTakumi Ichimura広島市立大学広島市立大学広島市立大学

Hiroshima City University Hiroshima City University Hiroshima City University

**Abstract:** We propose the "emotion oriented intelligent interface for spoken language" to be able to access computers easily. We applied three methods about natural language dialogue and emotion, analyzing the user's utterances, estimating and expressing the user's emotions, and analyzing the user's intention from his/her utterances. By using these three methods, the user would be able to communicate with the system naturally. We constructed an interface system based on the methods, and the interface system has been applied into the "web-based health service system for elderly people."

# 1. はじめに

現在,高齢者の健康管理のための地域職域コ ミュニケーションネットワークが構築されてい る.しかし,高齢者人口の急増や金銭的コスト などの問題により、それらのサービスは重度の 要介護者を主に対象とすることが多く,軽度の 要介護者や身体的には健康な高齢者については 何のケアもされないことがある、とはいえ、精 神面でのケアを考えた場合,日々のカウンセリ ングやコミュニケーションは非常に重要な役割 を持つ, そこでこのようなコミュニケーション 機能を持つインタラクションシステムが一時的 にでも忙しい介護者の代わりに話し相手になる ことが出来れば,これらの被介護者に対する精 神面でのケアを支援することができる.そこで, どのようなインタラクションシステムを望んで いるかについて高齢者に質問紙調査を行ったと ころ、人間と同じように対話することができ、 表情を表出するものが好まれていることが分か った.

我々は現在,挨拶やあいづちなどのような簡単な会話が可能なインタフェースシステムについて研究を進めており,現在,高齢者健康診断システムへの適用を行っている.このシステムは QOL(Quality of Life)に関する 50 個の質問に対する回答をもとに,解析結果やカウンセリングコメントを返すというものである[1].

本研究では,自然言語による対面的コミュニケーションを通じて健康診断を行い,同時にユーザの現在の感情を解析することで,ユーザを心身両面からケアするインタラクションシステムを提案する.このシステムでは,自然言語発話を入力とし,その内容からユーザの発話意図および生起感情を解析する.そして,解析結果に応じてシステムの反応を決定し,それに応じた顔画像を出力する.

# 2. 感情指向型インタラクションシステム 2.1. 処理の流れ

図1に本システムの全体構造を示す.まず,QOLに関する質問をユーザに尋ね,マイクを通じてユーザの返答発話音声を取得する.次に,この発話を解析し発話意図を抽出する.ここでの発話意図とは,各質問に対する返答(Yes/No)である.抽出した発話意図はサーバに送られる.サーバでは,これらの返答に基づいたカウンセリングコメントを生成し,返信する.一方,内容に対してユーザの視点からの感情を計算する.そして,この感情とサーバから送られてきたカウンセリングコメントをもとにインタフェースシステムの反応を決定し,表情画像を作成したのち,ユーザに提示する.

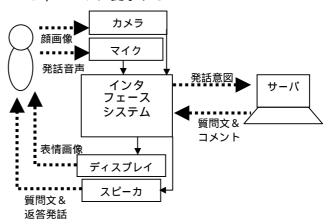


図1 インタフェースシステムの構成

図 2 は本システムにおけるインタラクション 部の処理の手順である.本システムでは自然な対話処理を目指すため,返答は「はい」、「いいえ」のような決まった形式だけではなく,自由な表現も処理できるようにする.また,言いよどみや言い間違いにも対応できるようにする.

そのため,黒澤が提案している正規表現を導入した構文解析手法[2]を用いる.そして,解析結果をもとに,肯定/否定の発話意図を計算する.この手法では,発話中に含まれる語や表現を抽出し,それぞれが持つ肯定/否定の度合をもとに発話全体の意図を計算する[3].

また,構文解析の結果から,ユーザが生起しているであろう感情を計算する.我々は,発話が表す事象から20種類の感情を並行して生起する情緒計算手法(Emotion Generating Calculations method: EGC)を提案している.この手法では,ユーザの嗜好情報に基づいて快/不快を計算し,その事象の状況や他者の心理状態などから,20種類の感情を生起する[4].

生起した感情からは,ユーザに対してシステムが返すべき適切な反応が計算される.基本的には,算出したユーザの感情と同じものを表出するが,相手の状態に応じて「なぐさめる」,「元気付ける」といった異なる感情を表出する.

20 種類の感情やシステムの反応は,表情に関連する 6 種類の感情に分類され,それらの強度に基づいて 1 つの合成表情を生成する.表情画像のもととなる顔画像は,あらかじめシステム側で用意したものやユーザがカメラを通じて入力したものを学習させたニューラルネットワークを用いて生成する[5].

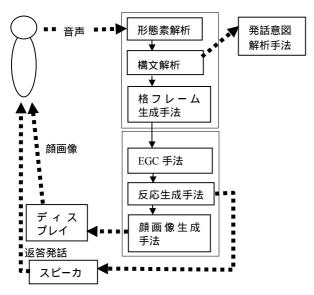


図2 インタラクションシステムの処理の流れ

### 2.2. 正規表現を用いた構文解析規則記述法

黒澤らは,表現の自由度が高く,言いよどみや言い直しを含む話し言葉を解析するため,正規表現を用いた構文解析規則記述法を提案している[2].この手法では,音声認識装置の出力に対して形態素解析を行った結果を入力とし,それらを構文解析した結果を出力とする.そして,形態素の関係を表す規則の記述に正規表現を用

いることによって,ロバストな構文解析を実現している.図3に規則の例を示す.この規則は,「自立動詞の後に1つ以上の助動詞または終助詞の並びがあれば,それを1つのまとまりとみなす」という意味を持つ.

図 3 構文解析規則

#### 2.3. 格フレーム表現生成手法

構文解析処理によって得られた意味構造は,格フレーム表現に変換され,情緒計算部に渡される.格フレーム表現には,ガ格やヲ格といった格要素を持つ表層格フレーム表現と,主格や目的格といった格要素を持つ深層格フレーム表現があるが,本研究では情緒計算処理の都合上,深層格フレーム表現を作成する.しかし構文解析で得られる構造は表層表現であるため,これを深層表現に変換する処理が必要となる.

そこで我々は、表層表現の格要素を深層表現に変換するため、助詞の特性にもとづいて表 1のような変換規則を作成した.この表では、二格は"目標"格と"拠り所"格の 2 つに変換されるが、これは主となる述語のタイプによって識別される.例えば「Xに行く」ならば"目標"、「Xに勝つ」ならば"拠り所"とみなされる.また、八格も"主体"と"対象"に変換されるが、この場合"主体"が存在しなければ"主体"、"主体"が存在するが"客体"が存在しなければ"客体"と判断する.

格フレーム表現には時間や否定に関する記述 も含まれるが,これらは文中の文末表現や副詞 表現から求められる.

表層格 深層格 ガ 主体 カラ 出発点または源 ニ,ヘ,マデ 目標 拠り所 1 相互作用の相手 ヲ 対象 デ 道具 八,モ 主体,客体

表 1 表層格と深層格の対応

#### 2.4. 情緒計算手法

続いて情緒計算手法の概要を説明する.まず,格フレーム表現された事象に対して事象タイプに応じた情緒計算式を適用することで快/不快を計算する.計算には事象中の格要素に対して

ユーザがあらかじめ持っている好感度を用いる. 好感度は,自分の好きな事物に対して正,嫌いな事物に対して負の値を持つ.各事象タイプの高々3種類の必須要素の好感度を三次元空間(情緒空間)の直交軸にベクトルとして配置し,その合成ベクトルの存在する象限から快/不快を,長さから快/不快の強度を計算する.

次に,算出した快/不快を,20種類の情緒に分類する.この手法では,"他者の視点","予測と確認","行為の承認/非難"という条件に基づいて情緒の分類を行っている.20種類の情緒は,"幸福"群に「喜び,悲しみ」,"他者の運命"群に「嬉しい,ほくそえむ,憤慨,気の毒」,"将来的"群に「望み,恐れ」,"確認"群に「満足,安堵,恐れていた通り,失望」,"帰属"群に「誇り,賞賛,羞恥,叱責」,"幸福/帰属"群に「感謝,怒り,自己満足,自責の念」と分類される.

#### 2.5. 反応生成手法

以前提案したインタフェースシステム[5]は、メールソフトやチャットシステムに応用されていたため、ユーザの感情をユーザ自身の顔画像によって表出していた.しかし今回目指すシステムではユーザの話し相手として反応を返すため、必要に応じてユーザと異なる反応をしなければならない.

本手法では基本的に2種類の反応を行う.1つ めは従来と同様に、ユーザが生起した感情と同 じ感情を表出するものである.これにより、シ ステムがユーザに共感しているような感覚を与 えることができる. もう 1 つはユーザの感情状 態があまり良くないと判断したときに、その負 の感情を緩和するような感情を表出するもので ある.この場合,必要があれば健康管理コンピ ュータネットワークを通じて,専門医やカウン セラーに通知する.現在は,感情状態が与える 身体面への悪影響と,感情状態から推察される 心理面での要注意状態から,表2の状態を対処 すべき感情状態としている.これらに対する反 応感情は,サーバや健康管理コンピュータネッ トワークから得られるカウンセリング知識やユ ーザの個人情報に基づいてサーバで決定され, 本インタラクションシステムに送信される.

# 2.6. 表情画像生成手法

我々は,実際の顔画像を並列砂時計型ニューラルネットワークに学習させ,その中間層に情緒計算手法から得られた20種類の感情の値を与えることで,複数の感情が交じった1つの表情画像を生成する手法を提案している[5].この手法では,まず"喜び,悲しみ,嫌悪,怒り,恐れ,驚き"の6種類の表情と通常の顔の画像を

表 2 要注意感情状態

要注意感情状態	不安視される要因
長期間ネガティブな感情が	うつ病
続いている	
興奮性の感情(怒り,叱責	血圧の過度の上昇
_など)が強く生起している	(高血圧のユーザ)
抑制性の感情(悲しみ,失	胃潰瘍、自己免疫力
望など)が強く生起してい	の低下
న	
強い感情同士の同時生起に	胃潰瘍、悩み状態
強い感情同士の同時生起による葛藤が起きている(少	胃潰瘍、悩み状態
	胃潰瘍、悩み状態
よる葛藤が起きている(少	胃潰瘍、悩み状態
よる葛藤が起きている(少 なくとも片方がネガティブ	胃潰瘍、悩み状態 痴呆、自暴自棄、無
よる葛藤が起きている (少なくとも片方がネガティブな感情)	
よる葛藤が起きている(少なくとも片方がネガティブな感情) 全体的な感情生起が減少し	痴呆、自暴自棄、無
よる葛藤が起きている(少なくとも片方がネガティブな感情) 全体的な感情生起が減少している	痴呆、自暴自棄、無 関心、うつ病

並列砂時計型ニューラルネットワークに学習させる.本手法で扱うニューラルネットワークでは,中間の第3層のニューロン数を2個にしており,この2つのニューロンの活性値を直交軸として平面に配置することで,各感情の位置関係を決定する(図4).

次に,情緒計算手法あるいは反応生成手法によって得られた感情を 6 種類に分類し,それぞれの強度から平面における感情全体の重心を求める.そしてその場所に該当する活性値を第 3 層のニューロンに与えることで,最終的な顔画像を獲得する.

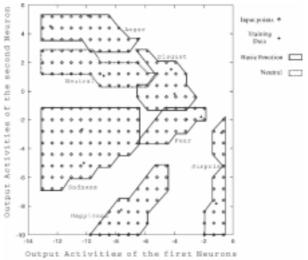


図4 第3層に構築された感情平面

# 2.7. 発話意図解析手法

我々は,真偽疑問文に対する返答発話を解析し,その発話全体が表す肯定及び否定の意図とその度合を計算する手法を提案している[3].この手法では,まず発話の構文解析結果から肯定あるいは否定の意図を表す語(肯定否定要素)を抽出する.肯定否定要素には、「はい」、「いい

え」のような直接的なものから、「書ける」のように質問表現に依存するもの、「難しい」のように間接的な表現のものまで含まれる.それらにはそれぞれ肯定値と呼ばれる肯定 / 否定の度合を表す値が与えられている.さらに、「とても」や「あまり」のように、程度副詞が付いている場合には、その副詞ごとの変化倍率をもとに肯定値を変化させる.このようにして収集された肯定値をもとに、最終的に発話全体の肯定あるいは否定の度合を算出する.

# 3. 評価実験

図 5 に本インタラクションシステムの実行画面を示す.このシステムは Linux OS 上で構築され,音声認識装置に Julius[6],形態素解析装置に ChaSen[7]を用いている.

本システムを実際に使用してもらったところ, 80%のユーザから良い評価が得られた.しかし, 「表情があいまいである」,「実画像よりアニメ のような顔のほうが良い」,「やはり機械より人 間のほうが良い」といった意見も聞かれた.



図 5 インタラクションシステムの動作画面

# 4. まとめ

本論文では、ユーザの発話音声から発話意図と生起感情を解析し、その内容に応じた反応を返すインタラクションシステムを提案した.特に、構文解析結果の格フレーム表現への変換手法と、ユーザへの反応の生成手法について新たに提案を行い、それらを組み込んだインタラクションシステムを構築した.

要注意の心理状態の検知およびその対応についての評価実験も今後行っていく予定であるが、評価には専門的知識が必要となるため、注意が必要である.また,本システムを実際に現場で使用するためには,初期設備や通信費などについても考慮していく必要がある.

# 参考文献

- [1] K. Yoshida, T. Ichimura, H. Sugimori, T. Izuno, and H. Inada, "Analytical System of Health Service needs among Healthy Elderly by using Internet," *Proceedings of Gerontechnology Third International Conference*, 1999
- [2] 黒澤義明,市村匠,相澤輝昭:シナリオを対象とした構文解析手法,第19回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp.617-620,2003
- [3] 吉江誠, 目良和也, 市村匠, 山下利之, 相沢 輝昭, 吉田勝美: 真偽疑問文における返答発 話の肯定/否定意図の解析と Web インタ ーフェイスへの応用, 日本ファジィ学会誌, Vol.14, No.4, pp.393-403, 2002
- [4] K. Mera, T. Ichimura, T. Yamashita, "Complicated Emotion Allocating Method based on Emotional Eliciting Condition Theory," Journal of the Biomedical Fuzzy Systems and Human Sciences, Vol.9, No.1, pp.1-10, 2003
- [5] 市村匠, 石田与志, 目良和也, 大枝真一, 杉原亮宏, 山下利之: 並列砂時計ニューラルネットワークと情緒生起手法を用いた 感情指向型インタフェースの応用, ヒューマンイン タフェース学会誌, Vol.3, No.4, pp.225-238, 2001
- [6] A. Lee, T. Kawahara, and K. Shikano, "Julius --- an open source real-time large vocabulary recognition engine," Proc. of the 7th European Conference on Speech Communication and Technology, pp. 1691-1694, 2001
- [7] 松本祐治, 北内啓, 山下達雄, 平野善隆, 松田寛, 高岡一馬, 浅原正幸: 日本語形態素解析システム『茶筅』version 2.2.7 使用説明書, 奈良先端科学技術大学院大学, 2001

# 連絡先:

目良 和也

広島市立大学情報科学部知能情報システム工学科 〒731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1

Phone + Fax: 082-830-1677

E-mail: mera@its.Hiroshima-cu.ac.jp

# 話し言葉に対する音声認識誤りの分析

# An Analysis of Speech Recognition for Error-patterns in Spoken Language

黒澤 義明 Yoshiaki KUROSAWA 目良 和也 Kazuya MERA 市村 匠 Takumi ICHIMURA

広島市立大学 Hiroshima City University

Abstract: The purpose of this paper is to analyze some errors of speech recognition and propose an approach to correct them using rules automatically captured without any correct/incorrect decisions. We noted the lists of morphemes and calculated their plausibility as a nonsentense collected from various corpora. As a result of experimental evaluation, we found over new 100 rules, which increased accuracies of our experiment. Therefore, we came to the conclusion that our approach is effective.

# 1. はじめに

近年,コンピュータ技術の発展に伴い,多くの人々が家庭でコンピュータを使うようになってきている.しかし,依然としてコンピュータを使用する上で,問題に直面している人々がいる.例えば,キーボードによるタイピングなどの,インタフェースに直結したスキルの問題である.

こうしたスキルに精通していないことによって生じる問題を解消するためには ,キーボードやマウスを入力装置として使うのではなく ,我々が通常行っているような ,音声を用いた入力装置を使う必要がある .

このような必要性にもかかわらず,音声認識装 置の精度はそれほど上がっていない.まったく予 想もしない出力が生じることがあるかと思えば, 既に経験した誤りと同一の誤りが生じることが ある.このため,多くの研究者は,この誤りの問 題に関心を持ち,音素等の特徴から,誤りを修正 する規則を学習することを目的とした,機械学習 の研究を行っている(Litman et al. 1999; Hirschberg 1999). 機械学習の立場では, 誤りを 修正するため,様々な特徴を持った,そしてその 特徴に基づいて正事例・負事例とラベル付けを行 った、より多くの事例が必要となる、しかもユー ザ個人の特徴記述が不可欠である . 例えば , 単語 と単語の時間間隔,単語の繰り返しの頻度など 様々な特徴を加味しなければならない、しかし、 コンピュータに不慣れなユーザが,こうした事例 を用意し,しかもユーザの特徴に基づいた規則を 学習させることは,簡単なことではない.

そこで本研究は,事例を自動的に取り扱い,特に日々の生活~例えば,質問応答~に関連した認識誤りを自動的に修正する方法を考察する.特殊な操作法を必要とする方法ではなく,コーパスから採取した統計情報に基づき,さらに音声入力による自然な応答に基づいた修正判断を行う方法を提案する.この方法は家庭での使用を前提とし

ており,学習に際してはコンピュータについての知識が必要ないため,これまでの方法より扱いやすいという利点がある.

こうした家庭で使うことを主眼とし,また取り扱いが容易であるという観点から,Linux上で動作する音声認識システム(Julius)を使用する(Kawahara et al. 2000; Lee et al. 2001; 鹿野他 2001). そして, Julius の結果をもとに,後処理として修正を行う.

なお,後処理として行う利点としては,音声認識システムにおいて考慮されていない特徴を容易に追加できる点にある(Ringger and Allen 1996). さらに高精度な形態素解析器を誤りの修正に利用できる点も利点であると考えられる.

# 2. 音声認識誤り

Julius は Linux を含む UNIX 環境において, 多くの研究者が使用している, 高精度の音声認識 エンジンである (Kawahara et al. 2000; Lee et al. 2001; 鹿野 他 2001).また, Linux は近年家庭でも使用されるようになっており, その上で動く Julius もまた広く使用することができると考えられる.したがって, 我々は Julius を用いて, 自動誤り訂正についての分析を行う.

# ·実験

まず最初に,認識の際の誤りを分析するため, 以下の手順に基づいて実験を行う.

文: 「はい,そうです」「いいえ,そうではないです」などQ&Aシステムで使用されるような26の文を使用した.このうち,10文は「はい」から始まり,10文は「いいえ」から始まる文であり,指定通りに発声することが求められた.一方,残り6文は「かまいます」等,「はい」「いいえ」のどちらかを用いて発声するように求められた.

被験者: 大学生または大学院生 5 名(うち, 女性1名).全員,日本語が母国語であった.

手続き: 被験者は個々に机の前に座り,紙に書かれた文を,10 回繰り返して,声に出して読み上げるよう教示が行われた.なお,音量調整・雑音除去等,音声入力に関する最適化は行わなかった.ただし,明らかな音量不足等,システムに正しく入力が行われなかった場合には,必要に応じて,10 回以上の読み上げが行われた.

音声認識評価: Julius は 2 回走査を行う解析器であり,最初に 2-gramをもとにした計算,そして 2 回目に 3-gramをもとにしたより正確な計算を行う.また,2 回目の走査の際には最適解以外の候補を表示することができるため,この候補を使用して,不明瞭な入力だったかどうかの指標とする.すなわち,明瞭な入力であれば,複数の候補が共通の文として認識されるのに対し,不明瞭な入力であれば,一見おかしな候補が表示される.そこで,2 回目の走査結果として,全5 文の候補を表示させることにする.

#### ·結果

Table 1.に個々の走査結果を示す.「1st Pass」は最初の走査結果を示し,「2nd Pass Best」は2回目の走査中の最適解を示す.「All Candidates」は,全ての候補を示す.それぞれ,260個,260個,そして1560個のデータを含んでいる.

表 1 解析結果

		Pass				
		1st Pass 2nd Pass Best		All Candidates		
	S	19.2 %	32.7 %	27.0 %		
	1	(50/260)	(85/260)	(421/1560)		
	S	27.3 %	32.3 %	25.8 %		
>.t-	2	(71/260)	(84/260)	(402/1560)		
被験者	S	27.7 %	43.5 %	35.6 %		
老	3	(72/260)	(113/260)	(556/1560)		
	S	33.1 %	<b>50.0</b> %	39.9 %		
	4	(86/260)	(130/260)	(623/1560)		
	S	43.7 %	60.0 %	51.9 %		
	5	(118/260)	(162/260)	(841/1560)		

表 1 から明らかなように ,「2nd Pass Best」が 最も成績がよい . しかし ,Julius はこれらの文に 最適化されておらず ,不正確な結果になっている . 主な誤りの原因を , 以下に示す .

- a. 不明瞭な音節に伴う誤った語彙化
- b. 不明瞭なポーズや雑音による過語彙化
- c. 子音落ち(母音前)
- d. 子音落ち(母音無し)

例えば ,「いいえ , かまいます」を意図した発 声により ,「いいえかマイナス」と誤認識が起こ る.これが a.である.「はい,そう思います」を 意図したときに,「配送」と認識される誤りが b. である.さらに,「はい」が「I」と認識される誤 りが c.である 最後の d.は「ありませ ん」の「ん」 が認識されず,「ありませ」または「あります」 と解釈されてしまう誤りである.

一般的には,こうした誤りを含む多くの文に, 非文としての解釈が成立する.例えば「いいえ, 市が今さん」は文字通り非文であり,こうした文 を構成する品詞列(感動詞/助詞·終助詞 /名詞· 一般)は文法的に出現しにくいと考えられる.

我々は,こうした品詞列がおかしいということにすぐ気がつく.しかしながら,コンピュータに認識させることは容易ではない.そこで,こうした品詞列の自動処理法が必要となることは明らかである.

# 3. 認識誤り訂正の自動化

現在までに,形態素誤りの修正に関する研究が行われている(Kurosawa et al. 2003; Mera et al. 2004). しかしながら,これらの研究は知識ベースを自動で構築せず,手動での記述を行うことで修正を行っている.

この手法に従えば、「いいえかマイナス」のような誤りを発見する際に、誤りを含んだ品詞列 (感動詞/助詞・終助詞/名詞・一般)に着目し、 規則を作成する、図1に修正規則の例を示す、

感動詞/助詞・終助詞/名詞・一 般¥ 0/(いいえ)/1/(か)/2/(マイナス) ¥ 0/1/2->{ ... 形態素列 "いいえ , かまいません " ... }

図1 修正規則例

規則は,3行から成り立っており,主規則部,副規則部,効果部と呼ぶ.主規則部には品詞列を記載し,副規則部にはさらに詳細な条件を記載する.そして,効果部に出力内容を記載する.記載内容については,今回の研究の範囲ではないため,詳述を避ける.

この表記法を用いることにより,数多くの形態素誤りを修正することができる.しかしながら,音声認識誤りに対して同様の手続きを行うと,規則数が爆発的に増えるという問題がある.すなわち,形態素解析誤りは意図した表記と解析結果が一対一対応になるため,主規則の内容が固定となり,したがって規則数が限られるが,音声認識りにおいては,意図した表記が得られるかどなりにおいては,意図した表記が得られるかどないためがわからない.誤り分類(a. d.)に示したように,複数の可能性が生じ,しかもその並びはまったく予想できないため,どのような規則を記述かればよいかわからない.したがって,形態素解析誤りと同様に,手動で規則を記載することは困難であると考えられる.

すなわち,一般的な手法,機械学習を用いた手法が必要となる(cf. Hirschberg et al. 1999; Litman et al. 1999; 内山 1999). ただし,この主の方法の問題点としては,事例を用意しなければならないところにある. 先にも述べたように,音声認識誤りは,様々なタイプがあり,事例を用意する場合には,非常にたくさんの事例が必要となる.この必要な事例を,研究者が個々のユーザに合わせて用意するのは困難である.また,個々のユーザが事例を収集するのも一層困難である.

以上の理由により、こうした誤りを扱う際には、 品詞列が正しいか誤っているかを自動的に判定 する手法が必要となる.そこで、本研究では、以 下のふたつの手続きを用いて、自動的に非文であ ることを認識し、自動的に非文を修正する規則を 生成する.

### ・非文の認識

コーパスを利用して,値を計算する.次のふたつのルールを有する.(F1) 品詞列に含まれる全ての2-gramまたは3-gramの値,そして(F2) 品詞列全体(すなわち,N-gram:Nは品詞数)の頻度である.非文の場合には,これらの値が0になることが予想されるため,積を計算し,非文の尺度とする.

なお,修正規則を作成するために必要な手続きを述べる際には,上のように片仮名で「ルール」と述べる.これは,修正規則とは別である.

# ・修正規則候補の作成

Julius の出力に着目する .2 章に述べたように, 我々は6種類の出力を利用する(「1st Pass」2nd Pass Best」そして A 種類の「All Candidates」). 一般的には、「1st Pass」が非文となる可能性が 高い.そして,2章の「手続き」の箇所で述べた ように,明瞭な入力であれば,2回目の走査結果 に共通項目が増えるという特性があった.そこで, ふたつの条件を同時に満たすときに,前者の「1st Pass」品詞列を誤り(すなわち,主規則部に相当) と考え,後者の「2nd Pass Best」を正解(効果 部に相当)と考えることとした. 例えば,「2nd Pass Best」と,4種類の「All Candidates」が 全て同じだった場合を(G1), さらに,「2nd Pass Best」と,4種類の「All Candidates」のうち3 種類が同じだった場合を(G2)等と定義し、(G1) ·(G5) で表される 5 種類のルールを用意した.

# ・修正規則の生成

また,より正確な判定を行うため,修正規則に含まれる主規則と効果部の品詞列の値を(F1)または(F2)の判定ルールに基づいて計算することにより,規則候補として正しいかどうかを判定することとする.例えば,図1の場合には主規則部

「感動詞/助詞・終助詞/名詞・一般」の値と,効果部「感動詞/動詞・自立/助動詞/助動詞(いいえ,かまいません)」の値とを比較して,規則として適切かどうかを判断することになる.

# 4. 実験

前章までに述べた非文かどうかの判断を行うため,コーパスを用意した.本研究では,青空文庫(青空文庫 2004)から,およそ100万文を含む2012作品を抽出した.

品詞数を計数するため,一旦形態素解析を行った.本研究で使用する形態素解析器は茶筅である(Matsumoto 他 2000). さらに形態素解析の誤りを修正するため,誤り修正法を使用し,より正確な値の計測を行う(Kurosawa et al. 2003; Mera et al. 2004).

なお、計測の結果、非文認識ルール(F1)は有効でないことが明らかとなった.何故なら、2-gramの計算では、2章で採取した品詞列の中には、ふたつの組み合わせを除いて、ほとんど全ての値が0ではなかったからである.したがって、積を計算しても0とならないことが明らかとなった.形態素解析の誤りが依然含まれているため、誤った品詞列を計数している可能性もある.また、今回の採取データ中の品詞組み合わせがたまたま0の採取データ中の品詞組み合わせがたまたま0にならなかった可能性もある.詳しい検討が必要であるが、今回は、仮に設定する別の基準をもとに考察を進める.新たに作成した基準は次の通りである.

(F1a) 主規則部\*10 の N 乗 < 効果部 N:品詞数

(F1b) 主規則部\*100 < 効果部

2 章で採取したデータを用いて , クローズドテストして評価を行う .

得られた修正規則候補は,303 個であった.このうち,判定ルールによる出力結果,及び精度を以下に示す(表2).

表 2 規則判定結果

		規則			精度	
		総数	正解/不正解		相反	
判ル定	F1a	58	42	16	72.4	
	F1b	79	39	40	49.4	
ル	F2	123	87	36	70.7	

表 2 の結果 , F1a と F2 の判定ルールに基づく 判定結果が良好であることがわかる . ただし , あ くまで F1a は仮の値であり , 詳細な議論のため には最適化が必要であると考えられる . したがっ て , 以降の分析の対象とはしない .

(F2)ルールを適用し,規則の判定を行い,その

後,規則を適用して,修正を行った.その結果を次の表に示す(表3).表中「b」は基準値(baselineを示しており,表1に示した値と同一である.したがって,どのように値が変わったかを比べることが可能である.たとえば被験者 S1 の結果は,当初正解が 85 個であったが,新たに 17 個が正しく修正されたことを示す(O:17).その結果,精度が 6.5%アップし,39.2%になったことがわかる.

表3 規則適用後の精度

	73073C737A					
		Pass				
		2nd Pass Best	All Candidates			
		39.2% (102/260)	32.1 % (500/1560)			
	S1	6.5%	5.1%			
		b:85, O:17, X:0	b:421, O:123, X:44			
		31.6 % ( 82/260)	26.5 % (413/1560)			
	S2	0.7%	0.7%			
		b:84, O:6, X:8	b:402, O:72, X:61			
被		48.9 % (127/260)	44.1 % (688/1560)			
験	S3	5.4%	8.5%			
者		b:113, O:15, X:1	b:556, O:143, X:11			
		56.2 % (146/260)	48.3 % (754/1560)			
	S4	6.2%	8.4%			
		b:130, O:18, X:2	b:623, O:176, X:45			
		65.8 % (171/260)	60.1 % (856/1560)			
	S5	5.8%	8.2%			
		b:162, O:9, X:0	b:841, O:115, X:8			

この表から明らかなように、被験者 S2 において、精度の逆転現象が見られるという問題もあるしかしながら、これらの問題は、共起関係などの重要な言語知識を持たないことによって起こると考えられる。例えば、否定の助動詞「ん」が感動詞「いいえ」と共起しやすい等という知識はまったく持っていない。このため、このような修正規則が得られないとは言え、本研究の有効性が否定されたわけではない。本研究の手法は、通常の出力として用いる「2nd Pass Best」の出力を修正することが可能であり、さらに過適用が少ないため、有効な手法であると言える。

# 5. おわりに

音声認識処理によって得られた誤りを分析し, 品詞列に注目することにより,学習のためのトレーニングデータを必要とせず,また個人に対する 認識訓練を必要としないで,修正に必要な規則を 学習し,適切に修正を行えることがわかった.

今後の課題は、入力を一文に制限することなく、自由な発話場面から同様の規則を発見できるかどうか検討することである。その際、単語の繰り返しなどの誤りを判断するために使用される尺度 (Krahmer et al. 1999; Krahmer et al. 2001)と、本研究の計算との比較を行うことが重要になると考えられる。

# 参考文献

- 青空文庫 . 2004. WWW page, Available from < http://www.aozora.gr.jp/>.
- Hirschberg, J., Litman, D., and Swerts, M. 1999.
  Prosodic cues to recognition errors. Proceedings of the 1999 International Workshop on Automatic Speech Recognition and Understanding, pp. 349-352.
- Kawahara, T., Lee, A., Kobayashi, T., Takeda, K., Minematsu, N., Sagayama, S., Itou, K., Ito, A., Yamamoto, M., Yamada, A., Utsuro, T., and Shikano, K. 2000. Free software toolkit for Japanese large vocabulary continuous speech recognition, Proceedings of the 6th International Conference on Spoken Language Processing, pp. 476-479.
- Krahmer, E., Swerts, M., Theune, M., and Weegels, M. 1999. Problem spotting in human-machine iteraction, Proceedings of EUROSPEECH, pp.1423-1426
- Krahmer, E., Swerts, M., Theune, M., and Weegels, M. 2001. Error detection in spoken human-machine interaction, International Journal of Speech Technology 4:19-30
- Kurosawa, Y., Ichimura, T., and Aizawa, T. 2003. A description method of syntactic rules on Japanese filmscript. Proceedings of the 7th International Conference on Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems & Allied Technologies, pp.446-453.
- Lee, A., Kawahara, T., and Shikano, K. 2001. Julius --an open source real-time large vocabulary recognition engine, Proceedings of the 7th European Conference on Speech Communication and Technology, pp.1691-1694.
- Litman, D., Walker, M., and Kearns, M. 1999. Automatic detection of poor speech recognition at the dialogue level. Proceedings of the 37th Annual Meeting of the Association of Computational Linguistics, pp.309-316.
- Matsumoto, Y., Kitauchi, A., Yamashita, T., Hirano, Y., Matsuda, H., Takaoka, K., and Asahara, M. 2000. Morphological analysis system ChaSen version 2.2.1 manual. http://chasen.aist-nara.ac.jp/.
- Mera, K., Kurosawa, Y., and Ichimura, T. to appear in 2004. Emotion oriented interaction system for elderly people. Knowledge Based Intelligent Systems for Health Care (T. Ichimura and K. Yoshida Eds.), Advanced Knowledge International.
- Ringger, E. and Allen, J. 1996. Error correction via a post-processor for continuous speech. Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, pp.427-430.
- 鹿野清宏 ,伊藤克亘 ,河原達也 ,武田一哉 ,山本幹雄 2001. 音声認識システム , オーム社.
- 内山将夫 . 1999 . 形態素解析結果から過分割を検出する 統計的尺度,自然言語処理,6(7),pp.3-28.

#### 連絡先:

黒澤 義明

広島市立大学 情報科学部

〒731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1

Phone: 082-830-1581 Fax: 082-830-1792 E-mail: kurosawa@its.hiroshima-cu.ac.jp

# 韻律的特徴による感情音声の分類と認識に関する基礎検討

A study of classification and recognition of emotional speech using prosodic features

# 岩井 淳\* 矢野 良和\*\* 大熊 繁\*

Atsushi Iwai Yoshikazu Yano Shigeru Okuma

# \*名古屋大学大学院工学研究科

# \*\*名古屋大学大学院経済学研究科

Graduate School of Engineering, Nagoya University Graduate School of Economics, Nagoya University

#### Abstract:

Automatic recognition of human's emotion is natural object for research. This paper focuses on emotion recognition using prosodic features in speech. There are some differences in prosodic features among individuals. Therefore, the accuracy of emotion recognition goes down. This paper proposes user-adaptive emotion recognition system, making use of Self-Organizing Feature Map(SOM). Human's emotion consists of complex emotion. This paper proposes how to express complex emotion and degree of each basic emotion using SOM. Experimental result show the effectiveness of proposed method.

keyword: SOM, User-Adaptive, Emotion Recognition, Prosodic Feature, Degree of Emotion, Complex Emotion

# 1 研究背景

近年,ペットロボットをはじめとした様々な種類のロボットが人間の生活の中に入ってきている.それに伴い,人間とロボットが協調動作を行うようになったり,人間とロボットとのコミュニケーションが必要になる.その際,人間がどのような感情かを推定することは,ロボットが行動や発話を決定するのに重要な要素となる.人間の感情を観測する対象として,表情・しぐさ・音声など挙げられるが,本稿では音声,特に韻律的特徴の変化からの感情認識を考える.

従来の感情音声の研究では,感情が音声の韻律的特徴の変化に大きく関与していることが述べられている[1].さらに,その韻律的特徴の変化をもとに感情を認識する試みが行われている[2].これらの研究では,人間の音声特徴として一般的な人間に定義できる特徴を用いて感情を認識していた.また,人間の感情としては単一感情であることを定義して認識していた.

しかし,各個人において音声の韻律的特徴には揺らぎがあるため,汎用性のある認識器を用いて感情の認識を行うと認識率の低下を引き起こす.また,人間の感情には感情の程度や複合的な感情があるため,単一感情を考えるだけでは不十分である.

そこで、各個人における特徴の揺らぎを吸収するために、感情認識システムが各個人に適応する必要があると考える、本稿では、各個人に適応するための手法として Kohonen の自己組織化特徴地図 (SOM:Self-Organizing Feature Map)を用いた感情認識システムを提案する. さらに、感情特有の感情の程度や複合的な感情を表すために、SOM の複合感情表現について言及する.

# 2 提案システム

# 2.1 提案システムの概要

音声の韻律情報から感情を認識するために,音声の韻律情報から韻律的特徴を抽出する.その韻律的特徴を SOM を用いて学習させる.学習された SOM に対して教師を用いて視覚化を行うことで認識器を構築する.この視覚化された SOM を用いることで,感情認識を行う.

図1に提案システムの概要を示す.本稿では一般の人に 利用可能な汎用性のある特徴地図を構築するのではなく, 認識したい特定話者に特化した特徴地図の構築を行う.あらかじめ用意される一般の人に利用可能な特徴地図をもと に,特定話者の発話データを追加学習する.それにより,特 定話者の発話の癖や特徴に特化した特徴地図の構築を行い, 特定話者の感情認識率の向上を目指す.

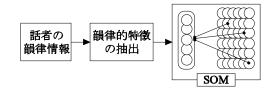


図 1: 提案システムの概要

#### 2.2 韻律的特徴の学習

本稿で認識する感情は「平静」の感情を基本として「怒り」「悲しみ」「喜び」の計4感情を認識することを考える。これらの感情を認識するための韻律的特徴としては[1]などで有用と述べられていた「ピッチの最大値」「ピッチの平均値」「ピッチのダイナミックレンジ」「パワーの最大値」「発話時間」を用いた.これら5つの特徴を1つの単語の韻律的特徴とし、5次元の入力ベクトルとしてSOMに学習させる.ただし、本稿ではデータを正規化して用いた.

次に SOM の学習則を示す.入力ベクトルをx,競合層のニューロンiの重みを $m_i$ とおく.ベクトルx はある測度ですべての $m_i$ と比較し,最整合ニューロンcを決定する.本稿では式(1)を用いて決定した.

$$||x - m_c|| = \min_i ||x - m_i||$$
 (1)

学習則は最整合ニューロン c の重み  $m_c$  と学習回数 t を用いて式 (2) のように表される .

$$m_i(t+1) = m_i(t) + \alpha(t) \cdot h_{ci}(t) \{x - m_i(t)\}$$
 (2)

ここで, $\alpha(t)$  は学習率係数, $h_{ci}(t)$  は近傍関数であり,それぞれ式 (3),式 (4) に示す.

$$\alpha(t) = \alpha_0 \left( 1 - \frac{t}{step} \right) \tag{3}$$

$$h_{ci}(t) = exp\left(-\frac{\|r_c - r_i\|^2}{2\sigma^2(t)}\right)$$
(4)

ただし, $r_i$ , $r_c$  は配列の中でのニューロン i,c の位置ベクトルである.また, $\sigma(t)$  は近傍の幅であり,全学習回数 step を用いて式 (5) とおいた.

$$\sigma(t) = 1 + (\sigma_0 - 1)\left(1 - \frac{t}{step}\right) \tag{5}$$

# 2.3 感情表現方法

前節で示した学習則によって学習された SOM の競合層におけるニューロンに感情を意味づけする.ニューロンに意味づけされた感情はそのニューロンが発火したときの感情となるため,特徴地図の感情表現が重要となってくる.人間の感情の定義の仕方には様々なものがあり,定義の仕方に応じて特徴地図の表現を変える必要があると考える.そこで,SOM の感情表現方法について示す.学習されたSOM で認識器を構築するためには教師が必要となる.ここでは,学習に用いた各入力ベクトルは感情が定義されており,それを教師とする.

#### 2.3.1 単一感情表現

 $\mathrm{SOM}$  に単一感情を表現させる場合について示す. $\mathrm{SOM}$  の競合層におけるニューロンi が4 感情のどの感情を表現しているかを知る.そのために, $\|x-m_i\|$  を最小とするような入力ベクトル $x_c(i)$  を求め,その入力ベクトル $x_c(i)$  の教師をニューロンi の感情とした.さらに,その $\|x_c(i)-m_i\|$ の大きさに応じて,感情の程度やその感情の尤もらしさを定義できると考える.

#### 2.3.2 複合感情表現

単一感情表現の方法の場合,ニューロンは単一感情の情報しか持っておらず,複合感情を考えることは難しい.また,入力ベクトルの教師に不適切な教師が多く含まれるようなものであると,その入力ベクトルxが  $\|x-m_i\|$  を最

小とするニューロン i は影響を大きく受けることになる.そこで,SOM の競合層におけるニューロンの感情表現を決定する際には,それらニューロン周辺の入力ベクトルを考慮しながら決定する必要がある.また,複合感情を表現するために,ニューロンに平静・喜び・怒り・悲しみの感情程度の情報をたせる必要があり,それぞれ  $L_{neutral}(i)$ , $L_{joyful}(i)$ , $L_{angry}(i)$ , $L_{sad}(i)$  とする.以下にその手法を述べる.入力ベクトルの集合  $X \in \{x_1, x_2, \cdots\}$  のなかで,平静と意味づけされた入力ベクトルの集合を  $X_{neutral}$  とおく.このとき,SOM の競合層におけるニューロン i の表現する平静の感情程度  $L_{neutral}(i)$  は,ニューロン i の重みベクトル  $m_i$  を用いて,

$$L_{neutral}(i) = \sum_{x \in A_{neutral}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{emotion}^2}} e^{-\frac{(x-m_i)^2}{2\sigma_{emotion}^2}}$$
(6)

と表す.そして,喜び,怒り,悲しみの感情程度について も式(6)と同様に求め,そのニューロンが表現する感情と した.

# 3 実験及び考察

# 3.1 感情音声データベース

本実験で用いた音声データベースについて述べる.音声のテキストは「おかあさん」という 1 つの単語を用いた.話者は演劇の経験がない  $21 \sim 23$  歳の男子学生 2 人とした.話者は平静・喜び・怒り・悲しみという感情を込めながら,繰り返し発話した.音声の録音は防音室で行った.音声サンプル数を表 1 に示す.表 1 の音声サンプルのうち 80%を学習用,20%を検証用に用いた.

表 1: 音声サンプル

話者	話者 A	話者B
音声サンプル	220	232

聴者は3人とし,話者に対して初見ではない人とした. これにより,聴者は音声に込められる話者特有の感情表現 も認識でき,話者の揺らぎが十分に含まれた感情音声デー タベースが作成できると考えられる.音声に対する教師感 情は,聴者が音声サンプルを聴いて決定した.聴者は,全 ての音声に対してどれかの感情に割り振る.

#### 3.2 認識器の生成

本稿では,提案システムの基礎検討として単一話者による特徴地図の作成を行った.さらに,その特徴地図を単一 聴者の教師感情によって視覚化を行った.

SOM の初期パラメータとしては ,  $\alpha_0=1.0$  ,  $\sigma_0=10.0$  を用いた. また , SOM の競合層は  $10\times 10$  のニューロンで構成される . 全学習回数は step=5000 とし ,  $m_i(0)$  には乱数を用いた .

SOM の学習結果を示す.表 2 は SOM の競合層のニューロンを 2.3.1 節と 2.3.2 節のそれぞれの方法を用いて視覚的

に表示したものである.それぞれの話者の特徴地図に対してそれぞれの聴者の教師感情を用いて行った.ここで,複合感情表現の特徴地図において式 (6) の  $\sigma_{emotion}$  の値は競合層のニューロン間の距離の平均と照らし合わせ  $\sigma_{emotion}=0.002$  を用いた.また,複合感情表現では 4 感情のうち感情の程度が最も大きかった感情をニューロンの上から表示してある.これらは,初期値に揺れを与えた  $\mathrm{SOM}$  で複数回学習させ直した結果からも,同一話者では形状の似た地図が作られた.

表2の特徴地図の結果より,どのマップも同じ感情ごとにまとまりが得られることと,そのまとまりがある中でも距離の遠い近いがあることが確認できた.2.3.2節の方法で視覚化された特徴地図は,複合的な感情が表現されていることが確認された.また,話者間で特徴地図を比較すると,話者が異なることによって隣接する感情特徴の類似性が低いことが確認できた.

# 3.3 感情表現の連続性

単一感情で表現した特徴地図と複合感情で表現したそ れぞれの SOM において感情表現の連続性について検討す る.SOM の競合層のニューロンとそのニューロンの教師と なった入力ベクトルとの距離がそれぞれのニューロンでど のようになっているかを調べた.この距離が遠いものほど そのニューロンは致死ニューロンに近いと考えられる.単 一感情表現の場合はSOM の競合層のニューロンi に対して  $d(i) = ||x_c(i) - m_i||$  を用いて距離を測った d(i) が大きいも のほど, ニューロンi は致死ニューロンに近いと考えること ができ, d(i) < d となるニューロン i は致死ニューロンとし た. 複合感情表現の場合は ,SOM の競合層のニューロン i に 対して  $L(i) = L_{neutral}(i) + L_{joyful}(i) + L_{angry}(i) + L_{sad}(i)$ を用いた.式(6)より,L(i)が小さいものほど致死ニュー ロンに近いと考えることができ , L(i) < L となるニューロ ンi は致死ニューロンとした.そして,L,d をそれぞれ変 化させ, SOM の致死ニューロンの数を増やしていったと き,特徴地図がどのようになるかを考えた.

結果を表  $2 \sim$ 表 5 に示す.致死ニューロンの数が単一感情表現と複合感情表現でほぼ同じになるように,L,d を調整しながら致死ニューロンの数を変化させた.

致死ニューロンの数を増やしていく過程を見たとき,単一感情表現の特徴地図と複合感情表現の致死ニューロンの発生の仕方が違う.単一感情表現の特徴地図は致死ニューロンの発生の仕方が散在して発生している.例えば,話者 A の特徴地図において左から 2 つ目,上から 3 つ目のニューロンに注目したとき,単一感情表現の場合は d=0.0015 において致死ニューロンとなるが,複合感情表現の場合は L=3 となり致死ニューロンが増えても,致死ニューロンとはならない.これにより,複合感情表現の方は感情が意味づけされているニューロンのまとまりが維持されること

が分かる.

また、致死ニューロンを増やした際の複合感情表現の特徴地図をみることにより、感情間の関係がより分かりやすくなった、例えば、L=3の複合感情表現の特徴地図を見たとき、話者 A の場合は喜び・平静・悲しみが隣接しあっているのに対して怒りは他の感情より遠くなっている.一方、話者 B の場合は喜びと悲しみが近くに位置し、平静と怒りはそれぞれ遠くなっている.

複合表現を用いることで、隣接ニューロン間の意味的な境界面が緩やかになった。また、隣接ニューロン間での意味的な結合が強くなった。これにより、クラス内での致死ニューロンが減少することが確認された。また、感情のようにクラスの境界においてクラスが混ざる場合には、境界を忠実に表現できることが示された。

# 4 まとめ

本稿では、音声の韻律情報から各個人に適応した感情認識をするための手法として、SOMを用いた感情認識システムを提案した、単一話者の発話から韻律的特徴を抽出し、SOMに学習させることで同じ感情ごとにまとまりがある特徴地図が作成できた、その生成された特徴地図は、話者が異なることにより、まとまり方が違うことを示した、特定話者に特化した特徴地図の構築が必要であることを示した。

感情特有の複合感情や感情程度を考えるための手法として、SOMの複合感情表現を提案した.入力ベクトルとSOMの競合層のニューロンとの距離を測ることにより、SOMの複合感情表現における感情の連続性が示された.

今後は,各個人に特化したシステムの有用性を議論するために,音声サンプルを増やして更なる検討を行う.そして,個人に適応する際のSOMの逐次学習についても検討を行う.複合感情表現の有用性を議論するために,心理学的立場から感情モデルの考え方について検討を行う.さらに,複合感情表現に対して評価を行い有用性を検討する.

# 参考文献

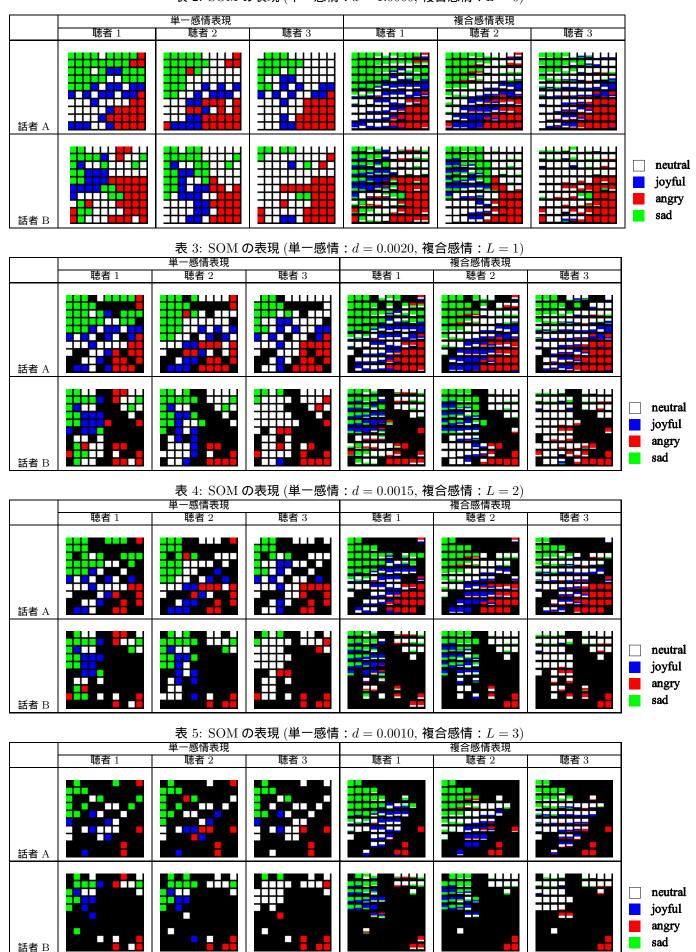
- [1] 森山剛,斎藤英雄,小沢慎治,"音声における感情表現語と感情表現パラメータの対応付け",信学論,Vol.J82-D-II No.4 pp.703-711 , April 1999
- [2] J.Nicholson , K.Takahashi , R.Nakatsu , "Emotion Recognition in Speech Using Neural Networks" , Neural Computing and Applications Journal , Vol.9 No.4 pp.290-296, 2000

# 連絡先:

〒 466-8603 愛知県名古屋市千種区不老町名古屋大学 工学研究科 電子情報学専攻岩井 淳

電話:052-789-2776 FAX:052-789-3140 Email:iwai@okuma.nuee.nagoya-u.ac.jp

表 2: SOM の表現 (単一感情:d=1.0000, 複合感情:L=0)



# 一連の行動情報からの有意行動パターン抽出法 The Technique of Behavior Extraction from Motion Series

村上 香治\* 矢野 良和\*\* 道木 慎二\*

Koji Murakami Yoshikazu Yano Shinji Doki Shigeru Okuma

# \*名古屋大学大学院工学研究科

\*\*名古屋大学大学院経済学研究科 Graduate School of Engineering, Nagoya University Graduate School of Economics, Nagoya University

Abstract: In this paper, we propose the mimic system for entertainment robot in order to gain the basic behavior autonomously. Significant behavior patterns used to appear frequently. This system extracts significant behavior patterns from a time-series observed motion using a elastic matching. Observed motion consists of basic behaviors and insignificant behaviors. Proposed method obtains some basic patterns from observed motion, and show its effectiveness. keyword: pattern extration, autonomous robot, time series data

#### 研究背景 1

近年、ペットロボットやヒューマノイドロボットにみら れるような人間との共存を目指したロボットが多く開発さ れている。人間共存型ロボットはコミュニケーションの中 で自律的に行動することが求められる。成長についても自 律的に行うことが必要となる。

ロボットの成長にもさまざまな面があるが、本稿では新 たな行動パターンの獲得に注目する。人間は他人のしぐさ や行動を真似ることで自分の行動パターンを増やしている。 そこで、ロボットにも同様のシステムを構築することで行 動パターンを増やしていくことを考える。

観測する一連の行動は行動パターンと推移過程が含まれ ている。この中で有意な行動は行動パターンのみである。 以上のことからロボットには観測した一連の行動情報の中 から行動パターンを抽出し、獲得する能力が必要となる。 しかし、行動パターンとして獲得していない動きについて は、行動パターンか推移過程かを判断することはできない。 そこで、本稿では繰り返し現れる行動を有意行動と考え、 その行動を基本行動と呼び、一連の行動情報から基本行動

本稿では観測した行動情報を関節角度とし、関節角度は 全て観測できていることを前提とする。また、ロボットと して SONY の AIBO(ERS-7) を用いて関節角度データを作 成した。AIBOの一つの脚には関節が3つある。

#### 一脚からの基本行動獲得 2

を獲得することを目的とする。

AIBO の脚一つ、つまり3次元時系列関節角度データか ら基本行動を獲得する手法を提案する。提案手法の流れを 図1に示し、後に流れに沿って詳しく説明する。

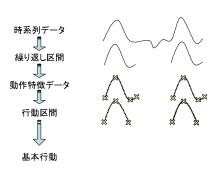


図 1: 提案手法の流れ

#### 前処理 2.1

3次元時系列関節角度データ中に含まれるノイズの影響 を軽減するために各次元で(1)式で表される移動平均を適 用する。

$$\overline{deg(t)} = \frac{deg(t)}{3} + \frac{deg(t-1)}{3} + \frac{deg(t-2)}{3} \tag{1}$$

ここで  $\overline{deg(t)}$  は時刻 t のときの移動平均適用後の関節角度 であり、deg(t) は時刻 t のときの関節角度である。

#### 2.2繰り返し区間の抽出

平滑化された3次元時系列関節角度データに対しRefraiD(Refrain Detecting Method) [1] を応用したものを適 用して繰り返し区間を求める。RefraiD は音楽の中からサ ビ区間を検出するために作られた手法である。音楽中のサ ビは同一テンポ、同一韻律で現れるが、行動は毎回速さや 大きさが異なる。よって、そのままでは全く同じ繰り返し 区間しか抽出できない。

そこで本稿では大きさの違いに対応できるように時刻tのときにそれよりラグ  $l(0 \le l \le t)$  だけ過去のデータとの 類似度を(2)式とする。

$$r_t(t,l) = 1 - \frac{|\overline{deg_t(t)} - \overline{deg_t(l)}|}{deg_{max}}$$
 (2)

ここで  $r_t(t,l)$  は時刻 t、ラグ l の類似度。 $deg_{max}$  は関節がとることができる範囲の角度。 $\overline{deg_t(t)}$  は時刻 t の角度、 $\overline{deg_t(l)}$  は時刻 t のときにラグ l の角度である。

そして 3 次元全ての類似度が 0.8 以上であり、関節角度の傾向 (増加か減少か) が同じ点を類似点として t-l 平面にプロットする。

一連の行動は音楽と違い毎回速度や角度が変化する。よって、類似点は時間軸に平行に並ばない。そこで傾きが閾値以内で類似点の連なった区間を行動が繰り返し出現した区間とする。これにより行動全体の速さの違いや行動内の速さの変化に対応できる。

t-l 平面の類似点の様子を図2 に示す。丸で囲んだ区間が繰り返し区間となる。

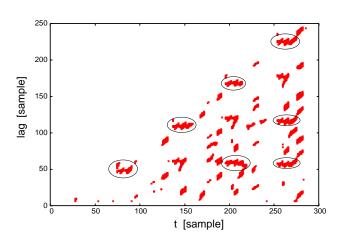


図 2: t-l 平面の類似点の様子

# 2.3 動作特徴データへの変換

繰り返し区間の関節角度データを変極点に変換する。これにより動きの流れを少ない情報で表現することができる。また、同じ経路を通る動きはその速度が異なっていても同じ表現になるという利点がある。

変極点への変換の様子を図3に示す。まず、3次元時系列関節角度データのうち一つでも変極点になる次元がある時刻を見つける。その時刻と繰り返し区間の始点、終点の時刻の3次元時系列関節角度データを動作特徴データとし、その数を動作特徴データの長さTとする。図3の場合T=5となる。

# 2.4 行動区間の抽出

2.2 で説明した RefraiD は繰り返し区間を抽出するだけなので、抽出された区間には行動前後の推移過程も含まれることがある。そこで、繰り返し区間の中からさらに行動区間を抽出しなければならない。行動区間を抽出するため

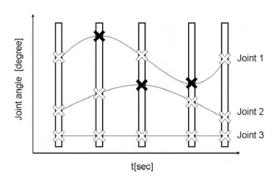


図 3: 動作特徴データの選出

に、抽出された繰り返し区間の中から行動と考えられる十分に長い共通区間を抽出する。

ここで、共通区間を抽出するために RefraiD の類似点の 考え方に基づいた共通区間抽出法を提案する。

図4のように左下から右に、また左下から上に向かって、比較する2つの動作特徴データの要素を並べる。ある要素ごとに比較する側の全ての要素について(3)式で求められる類似度が0.8以上のとき類似度が高いとして類似点に印をつける。

$$r_n(n1, n2) = 1 - \frac{|\overline{deg_n(n1)} - \overline{deg_n(n2)}|}{\underline{deg_{max}}}$$
(3)

ここで、 $r_n(n1,n2)$  は特徴データ 1 の n 番目の要素と特徴データ 2 の n 番目の要素の類似度。 $\overline{deg_n(n1)}$ 、 $\overline{deg_n(n2)}$  はそれぞれ特徴データ 1 の n 番目、特徴データ 2 の n 番目の要素の角度。 $deg_{max}$  は関節がとることができる範囲の角度である。

特徴データは変極点の集合であり、時間情報は保持しない。類似点が右肩上がりに斜めに連なっている区間が共通 区間となる。この共通区間を行動区間とする。

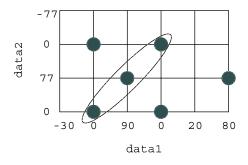


図 4: 共通区間抽出法

# 2.5 クラスタリング

抽出された行動区間をクラスタリングする。クラスタリングの際に必要なことは同じ行動は同じクラスタに分類することである。同じ行動とは以下の2つの条件を満たすものとする。

- 全ての次元で行動区間の平均値が閾値以内にある
- 正規化後の変極点の変化量が閾値以内にある

行動区間の平均値とは次元 d 毎に (4) 式で求められる Ave(d) となる。

$$Ave(d) = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{T} D(n, d)$$
(4)

ここで、D(n,d) は行動区間の n 番目、次元 d での変極点の関節角度。T は行動区間の特徴データの長さである。行動区間の平均値が類似する場合、比較する 2 つの行動は近い位置で行われたことになる。

正規化は次元毎に平均値を基準として、比較する行動の 大きさに合わせる。正規化後の変化量が閾値以内にあれば 比較した2つの行動は同じような変化の仕方をしているこ とになる。

# 2.6 オンラインでの基本行動獲得手順

時系列関節角度データは相手の行動を観測する限り入力 し続けるので、これまでの作業を以下のように繰り返し行う ことにより、基本行動を動的に追加しながら変更していく。 時系列データの中から新たな繰り返し区間を見つけるた びに、すでに獲得した基本行動全てに対して共通区間抽出 法を行い、見つけた共通区間と新たな繰り返し区間につい て既存の基本行動全てとクラスタリングを行う。同じもの があれば基本行動をこれまでの平均値に変更する。また共 通区間や新たな繰り返し区間が既存の基本行動になければ それらを新たに付け加える。

# 3 両前脚からの基本行動獲得

これまでは一脚からの基本行動獲得を考えていたが、本章では両前脚という二脚からの基本行動獲得手法を提案する。対象が両前脚になったことにより、行動には両脚のものと片脚のものが存在する。両脚の行動は一脚の手法と同様にすればよい。しかし、それでは片脚だけの行動を抽出することができない。よって、単に6次元の中から基本行動を獲得するのではなく脚毎に行動を考えて獲得する必要がある。

# 3.1 両脚が揃った時の基本行動獲得手法

右脚と左脚が同じ行動を左右対称に行う基本行動の獲得 手順を述べ、両脚行動の判断を図5に示す。

1. 右前脚と左前脚それぞれで2章の提案手法により基本行動を獲得し、前脚の基本行動とする

- 2. 獲得した基本行動を右前脚、左前脚の入力と比較して出現する時間と回数を求める
- 3. 出現する時間差が閾値以内にある同時出現回数を求める
- 4. 出現回数を同時出現回数で割ったものが閾値以上であれば、両脚で行う行動であると判断する

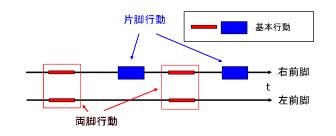


図 5: 両脚行動の判断

# 4 実験・考察

# 4.1 実験方法

提案手法の有用性を調べるため、実験を行った。観測データとして、AIBO の脚をランダムに動かし、その時取得された関節角度の時系列情報を用いた。そのランダムな動作の中に基本行動 A、B、C をそれぞれ 4 回ずつ埋め込んだ。基本行動 A、B は両脚行動であり、基本行動 C は片脚行動である。このデータより基本行動の獲得を行った。なお、センサーから取得するサンプリングタイムは 160ms である。入力データの一部を図 6 と図 7 に示す。全部で 705 サンプル、約 2 分のデータである。

# 4.2 実験結果

提案手法により獲得した基本行動の総数は12個であった。獲得した基本行動のうち有意行動と考えることができる、出現回数が4回以上だったものを表1に示す。表中の基本行動は獲得した基本行動の番号であり、出現回数が多い順に付けた。横に括弧でかかれているものは意図的に埋め込んだ基本行動であった。出現行動総数と検出行動総数はそれぞれ行動単位で見たときの、実際に現れた回数と入力との比較により検出できた回数である。片脚行動の時は左右の和になり、両脚行動の時は左右揃って一回となる。括弧内の左と右はそれぞれ左前脚と右前脚の回数である。検出サンプルは図で示した400サンプルまでの入力で検出したときの始めのサンプル数と終りのサンプル数である。被形は基本行動の変極点を直線でつないだものであり、横軸時間、縦軸関節角度であるが基準とする角度は全て異なっ

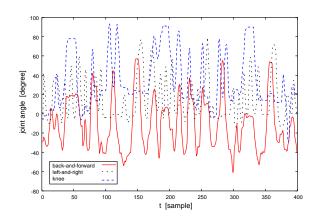


図 6: 右前脚の入力

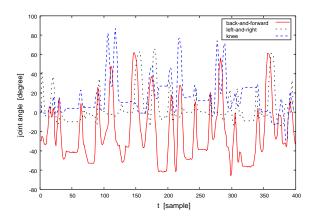


図 7: 左前脚の入力

ている。基本行動 2 (A) と基本行動 3 (B) は両前脚で行う行動であるので、同じ波形の行動を両前脚で行う。

# 4.3 考察

結果より意図的に埋め込んだ基本行動3つ全てが埋め込んだ形で獲得できていることが確認できた。

最も多く検出した基本行動は意図的に埋め込んだ行動ではなく、ランダムに動かした中に多く現れていたものであった。この基本行動を入力と比較すると、最も多く現れていた。このことから提案手法により繰り返しの多い行動を獲得できていることがわかった。

基本行動 2 (A) や基本行動 4 (C) は出現した回数全てを検出することができた。しかし他の基本行動では検出することができない場合があった。同じ行動をしたのに違う行動と判断された原因は、動作特徴データへの変換が一意に決まらなかったことである。提案手法では複雑な行動や長い行動の場合動作特徴データへの変換が一意に決まりにくい。動作特徴データの長さが異なると行動区間の抽出やクラスタリングは本来の行動パターンとは異なるものになる。

表 1: 提案手法の実行結果

基本行動	1	2(A)	3(B)	4(C)
	(片脚)	(両脚)	(両脚)	(片脚)
出現行動総数	10	4	4	4
(左、右)	(4,6)	(4,4)	(4,4)	(0,4)
検出行動総数	9	4	3	4
(左、右)	(3,6)	(4,4)	(3,3)	(0,4)
右前脚検出	87-98	98-123	123-162	39-50
サンプル		266-292	346-372	188-195
(400 まで)				319-328
左前脚検出		98-130	130-162	
サンプル		270-291	346-369	
(400 まで)				
波形				
back-and- forward left-and- right knee  t [sample]	- ARE-			

# 5 まとめ

本稿ではロボットが観測した一連の行動情報の中から基本行動を獲得する手法の提案を行った。実験により人間が情報を与えることなく、時系列関節角度情報のみから繰り返し現れる基本行動を獲得することができたことを確認した。

特徴量として動作特徴データを用いた。複雑な行動や長い行動の場合に、この変換が一意に決まりにくいという課題を残している。

今後は同じ行動であれば大きさが異なる場合も繰り返し 区間で抽出を可能にすることと、両前脚でのさまざまな行 動の獲得を目指す。

# 参考文献

[1] 後藤 真孝, "SmartMusicKIOSK:サビ出し機能付き音 楽試聴機", 情報処理学会 インタラクション 2003 論文 集,pp.9-16, 2003

#### 連絡先

〒 464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町名古屋大学 工学研究科 電子情報学専攻村上 香治

電話:052-789-2777 FAX:052-789-3140 Email:murakami@okuma.nuee.nagoya-u.ac.jp

# 動的テキスチャに対する perceptual filling-in の起こりやすさ Facilitation of perceptual filling-in for dynamic textures

横田 正恵横田 康成Masae YokotaYasunari Yokota名古屋文理大学岐阜大学

Nagoya Bunri University Gifu University

Abstract: When a small object surrounded by dynamic texture is presented in human peripheral vision, the object is perceived to fade and disappear within a few seconds, under certain condition. This phenomenon is called perceptual filling-in. Analysis of filling-in facilitation for various sorts of surrounding textures is important to understand the manner of information processing in human vision, because filling-in has been considered that it greatly contributes to capturing external visual information efficiently. From this point of view, influence of several texture attributes, such as color, spatial density, or moving speed, on filling-in facilitation had been reported. On the contrary, little is known about influence of power spectrum density in spatio-temporal frequency of dynamic texture on filling-in facilitation, although it is considered that filling-in is a phenomenon in the primary visual cortex (Weerd et al. 1995) and that cells in the primary visual cortex have relatively simple spatio-temporal frequency characteristics.

In this study, we first introduce a criterion, perceptual power, to represent distinguishability of small object, filling-in target, from the surrounding texture; its initial value is defined as an inner product between difference of spatio-temporal power spectrum for surrounding dynamic texture and the filling-in target, and spatio-temporal sensitivity in human vision. We then propose a numerical model to represent induction process of perceptual filling-in. In this model, we suppose that perceptual power decreases while dynamic texture is being presented; if it decreases less than a certain threshold value, we cannot distinguish the filling-in target from the surrounding texture, i.e., filling-in is occurred. Estimating the spatial human visual sensitivity through a preliminary psychological experiment, we obtained perceptual power quantitatively. We next measured the time to filling-in for various surrounding dynamic textures which have different spatio-temporal frequency properties. Applying these results to the proposed model, we inferred that perceptual power decreases with spatio-temporal sensitivity of vision.

# 1. はじめに

視知覚充填(Perceptual filling-in,以下filling-in)は、網膜乳頭部や血管が存在する部分で起こるだけでなく、網膜周辺部でも発生する.これは、ヒトの網膜周辺にその周囲とはテキスチャの属性が異なる小領域を含む光刺激を呈示したとき、しばらくすると小領域が消滅し周囲のテキスチャで埋め尽くされて知覚される現象として観測される. ヒトは、filling-in が発生することにより、眼球の構造等に起因する優先度の低い光情報を効率的に削除していると考えられ、filling-in の発生特性を知ることで、視覚神経系での効率的な光情報獲得メカニズムの一部を解明できると考えられる.

これまで網膜周辺部で発生する filling-in に関し、幾つかの特性が調査され報告されてきた. 例えば、filling-in させる小領域(以下、filling-in 対象)の周辺テキスチャが動く場合に filling-in が早く誘導されること、filling-in されるまでの

時間(以下, filling-in 時間)は filling-in 対象周辺のテキスチャの空間的密度や filling-in 対象の大きさ, filling-in 対象を提示する網膜位置に依存することなど[1-5]が分かっている.

一方、サルを用いた電気生理実験より、大脳皮質視覚第2野および第3野で網膜周辺部から入力を受ける細胞から、filling-in が発生していると解釈される応答が報告され[6]. また、サルの視覚第1野では、網膜盲点を受容野に持つ細胞がfilling-inに対応した応答を示すことなどが報告されている[7,8]. これらの知見より、filling-inは網膜から視覚第1野に至る初期視覚の段階で実現されると考えられる. 初期視覚の神経細胞応答特性は、時空間周波数を対象に比較的詳しく知られていることから、filling-in発生に関して時空間周波数特性を明らかにできれば、その発生機構を初期視覚の細胞特性から議論できる可能性がある.

この観点から,横田ら[9,10]は, filling-in 対象 と周辺テキスチャとの識別容易性を表す filling-in 発生プロセスのモデルを提案している。本稿では、はじめに横らが提案している filling-in 発生プロセスのモデルを説明する. 次に、このモデルを用いて filling-in 発生特性を解析する目的で、網膜周辺部の時空間周波数感度特性を計測する実験を行った結果を報告する. また、様々な字空間周波数を持つテキスチャの中に filling-in 対象を置いたときの filling-in されるまでの時間を計測した結果を述べる. 最後に実験結果を filling-in 発生プロセスのモデルに適用し、filling-in が発生するまでの filling-in 対象の識別容易性の時間推移を、周辺テキスチャの時空間周波数に対して推定する.

# 2. Filling-in 発生プロセスのモデル

Filling-in の起こりやすさの尺度として、計測の容易さから、これまでは filling-in 時間が用いられてきた. しかし filling-in は filling-in 対象が周辺テキスチャから識別できなくなる現象であることを考えると、filling-in 対象と周辺テキスチャとの識別容易性を数値化できることが望ましい. 本モデルは、filling-in 対象と周辺テキスチャとの識別容易性を知覚パワーと呼ぶこととし、幾つかの仮定を設けることによって、知覚パワーを数値化する.

このモデルでは、被験者の視野周辺部に、動くテキスチャ(以下、動的テキスチャ)に囲まれた灰色均一色で塗られた filling in 対象を呈示したとき、その filling in 発生過程を知覚パワーを用いて図1のように考える. Filling in 対象を含む動的テキスチャが呈示された直後、filling in 対象の知覚パワーは短時間の過渡的変動を経て、動的テキスチャが持つ時空間周波数に基づき時間とともに減衰する. 知覚パワーがある閾値を

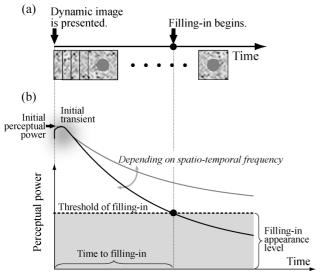


図1 Filling-in発生モデルによる知覚パワーの時間 推移

下回るとき, filling-in 対象が周辺と識別不可能になり, filling-in が発生する.

動的テキスチャを呈示開始した瞬間に動的テキスチャが持つ知覚パワー $P_{init}$ は、視覚の時空間周波数感度特性 $S(f',f^s)$ の2乗と動的テキスチャが持つパワースペクトル $W(f',f^s)$ の内積として、式(1)で与えられるとする.

$$P_{init} = \iint W(f^t, f^s) S^2(f^t, f^s) df^s df^t$$
 (1)

f' および f' は、それぞれ時間周波数、空間周波数を表す。本モデルでは filling-in 対象が均一な画素値を持つので、filling-in 対象の知覚パワーは 0 になる。従って、動的テキスチャが持つ知覚パワーが、filling-in 対象と周辺との識別容易性そのものとなる。

また、知覚パワーは過渡的変化の後、指数関数的に減衰すると仮定する. 時刻 t での知覚パワーP(t) は、式(2)として表される.

$$P(t) = P_{init}e^{-\lambda(f^S, f^t)t}$$
(2)

 $\lambda(f',f')$  は減衰の度合いを表すので、以降では減衰定数と呼ぶ、指数関数は、システムの故障率や分子間の結合を表す確率モデルでよく用いられる。知覚パワーが指数関数的に減衰する仮定を設けることで、後に意味ある理解ができる可能性がある。

# 3. 実験 1:網膜周辺部の時空間周波数感 度特性

感度特性は、一般的に知覚可能な刺激強度の 逆数で与えられる。本説では、様々な時空間周 波数特性を有する動的テキスチャを被験者の視 野周辺部に呈示した際に知覚可能な輝度振幅の 閾値を計測した実験について述べる。

# 3-1. 動的テキスチャの作成

輝度値が、平均値 127、標準偏差の正規分布に従う乱数である、127/3512×512 [pixel]×64 [frame]から成る動画像を作成する。これを 3次元フーリエ変換し時空間周波数領域へ変換する。時空間周波数軸上で表された動的テキスチャに対し、表 1 に示す空間周波数帯域[ $f^{S}_{low}$ ,  $f^{S}_{up}$ ] および時間周波数帯域[ $f^{S}_{low}$ ,  $f^{S}_{up}$ ] および時間周波数帯域[ $f^{S}_{low}$ ,  $f^{S}_{up}$ ]で各周波数を制限する。空間周波数は、視覚 1[deg] あたりに含まれる波数[cpd](cycles per degree)で表される。空間、時間周波数の帯域は、それそれの対数軸上での中間値  $f^{S}_{med}$ ,  $f^{T}_{med}$ を用いて表すことにする。帯域制限したことにより画像が持つパワーが減衰する影響を避けるため、各周波数成分に式(3) を乗じ、画像が持つパワーを一定

にする.

$$\frac{(f_{up}^{S} - f_{low}^{S})\sqrt{f_{up}^{T} - f_{low}^{T}}}{f_{s}^{S}\sqrt{f_{s}^{T}}},$$
(3)

なお、 $f_s^S$ 、 $f_s^T$  はそれぞれ空間、時間ナイキスト周波数を表す.その後、3 次元逆フーリエ変換を行い、動的テキスチャを時空間領域に変換する.さらに、動的テキスチャの輝度の振幅(輝度振幅)に $\sqrt{2^{-n/2}}$ 、n=0、1、2、…、20 を乗じた後、[0,255]間の整数値で量子化する.こうして、帯域制限された画像ごとに 21 種類の輝度振幅を持つ動的テキスチャを作成する.

Filling in 対象は、画素値 127 で均一に塗られた直径 125[pixel]の円形とし、動的テキスチャに含まれる全フレームの中央に貼り付けた. 固視点は黒色十字形とした.

以上の手法によって作成された動的テキスチャに含まれるフレームの例を図2に示す.

#### 3-2. 実験方法

動的テキスチャは、1000/30[Hz]のフレームレートで 17 インチ CRT モニタに表示する。モニタの輝度 l は画素値 k に対し l=0.36 k [cd/m²]である。被験者を顔面がモニタ前面と 35[cm] の距離になるよう、顎を顎台に固定して座らせる。このとき 1[pixel] は視角 0.048[deg] に相当し、被験者が固視点を固視すると、filling-in 対象の中心が網膜上の偏心度 12[deg] の位置に入射する。実験は優位眼で行い他方の眼はアイマスクで覆った。

被験者は 20 代の健常な視覚を持つ男性 7 名である。実験開始時には,画素値 127 で均一に塗られた画像上に固視点だけが表示される。被験者には,固視点を固視させ,固視が完成したと感じたときにマウスボタンを押すよう指示した。その後も固視を維持させる。マウスボタンが押された 2[s]後に 1[s]間だけ表示される動的テキスチャが表示されるので,filling-in 対象が見えたか否かを披験者に回答させた。

動的テキスチャはランダムな順に呈示し、全ての動的テキスチャに対し各被験者が3回ずつ

表1 制限した空間および時間周波数帯域

Spatial	Spatial frequency bands [cpd]		Tempor	al free	quency ba	ınds [Hz]	
$f_{low}^{S}$	-	$f_{up}^{S}$	$f^{S}_{med}$	$f_{low}^{T}$	-	$f_{up}^{T}$	$f_{med}^{T}$
0.69	-	0.78	0.73	1.0	-	1.0	1.00
0.82	-	0.90	0.86	1.5	-	1.5	1.50
0.94	-	1.06	1.00	2.0	-	2.5	2.24
1.10	-	1.31	1.20	3.0	-	4.0	3.46
1.35	-	1.55	1.45	4.5	-	5.5	4.97
1.59	-	1.84	1.71	6.0	-	8.0	6.93
1.88	-	2.16	2.02				
2.20	-	2.61	2.40				
2.65	-	3.10	2.87				

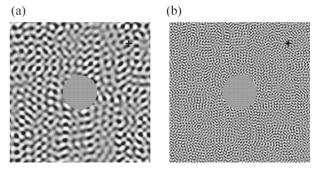


Figure 2. 動的テキスチャに含まれるフレームの例 (a)  $f_{med}^{s}=0.86$  [cpd]; (b)  $f_{med}^{s}=2.02$  [cpd]

実験を行った.

# 3-2. 実験結果

各動的テキスチャごとに filling-in 対象が知覚された確率を求めた. その後, 時空間周波数ごとに, 輝度振幅に対し filling-in 対象が知覚された確率を補間し, 確率が 50%となる輝度振幅を,知覚閾として推定した. 視覚の感度特性は,知覚閾の逆数として図 3 に示すよう推定された. これは網膜偏心度 12[deg]で推定された視角の時空間周波数感度特性であり, おおむね他の報告[11,12]と類似した特長を有する.

# 4. 実験 2: Filling-in 時間の計測

# 4-1. 実験方法

動的テキスチャは、実験 1 で用いたもののうち、時空間周波数ごとに輝度振幅が最大な動的テキスチャのみを用いた。その他の実験条件等は、実験 1 と同様である。

被験者は実験1と異なる20代男性7名である. 被験者を実験1と同様にモニタに正対して座らせる. 実験開始時には,モニタに動的テキスチャに含まれる1フレームが呈示される. その固視点を固視し,固視が完了した時点でマウスボタンを押すよう指示した.マウスボタンが押されると動的テキスチャが呈示開始される. 被験

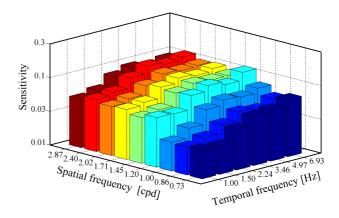


図3. 網膜偏心度12 [deg]で推定された時空間周波 数感度特性

者は固視を維持したまま、filling-in 対象が知覚されないと感じたときに再びマウスボタンを押す.被験者の負担を考慮し、動的テキスチャの表示は20[s]までとした.マウスボタンが2度押される間の時間間隔をfilling-in 時間として測った.この時間が20[s]を超えたデータはfilling-in が起きなかった,あるいは実験に失敗したものとして以降の解析から除外した.

# 4-2. 実験結果

固視が十分でないとき、filling-in が起こらな い,あるいはfilling-in時間が延びる傾向があり, filling-in 時間は固視の状態に依存する. さらに 固視には集中力が要求されるため、被験者の体 調, 気分や個人の特質に影響を受ける. 実際, 計測された被験者個人ごとの filling-in 時間の平 均値は、それぞれ 7.4, 7.2, 6.3, 5.6, 5.1, 4.8, 2.3 [s]となり、被験者間の個人差を無視することは できない. そのため本実験では、実測された filling-in 時間に対し、被験者ごとにその平均値 で除し、被験者全員の平均値 5.5[s]を乗ずる正規 化処理を行った. さらに, 固視不十分なデータ と披験者によるミスを削除する目的で、小さい 方から2番目から7番目までの平均値を、計測 された filling-in 時間として,以降の解析に供す ることとする.

以上により得られた filling in 時間を図4に示す. 同図より Filling in 時間は時空間周波数に依存することが分かる.

# 5. Filling-in 発生プロセスのモデルへの適用

第 2 節で説明した filling-in 発生プロセルのモデルへ, 実験 1 および実験 2 の結果を適用する.

式(1)により動的テキスチャ呈示開始直後の知覚パワーが算出され、式(2)に従い知覚パワーが減衰する。知覚パワーの減衰は指数関数的であることから、知覚パワーの時間推移は、対数軸

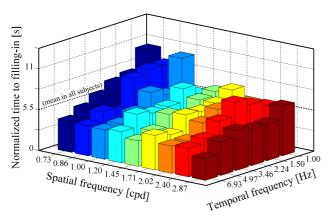


図4. 動的テキスチャの時空間周波数に対し、計 測されたfilling-in時間

グラフで表すと直線になる。また、filling-in が誘導された瞬間の知覚パワーは 1.0 であるため、各動的テキスチャに対し、知覚パワーは、図 5 のように時間推移すると推定される。図 5 は、動的テキスチャが持つ空間周波数ごとにグラフを分け、時間周波数ごとに直線の色を変えて表した。同図では、filling-in の起こりやすさは、直線の傾きに対応する。

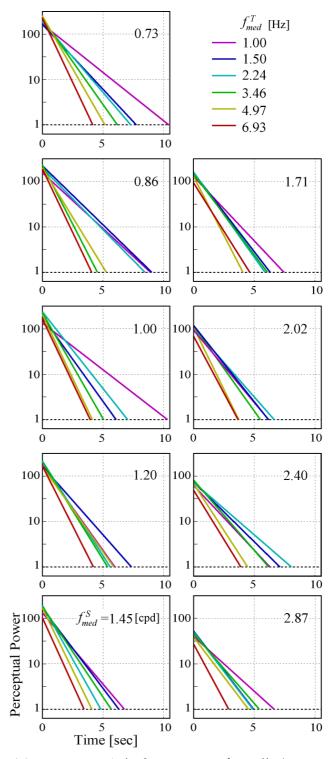


図5. Filling-in発生プロセスのモデルに基づいて 推定された知覚パワーの時間推移

# 6. 時空間周波数に対する減衰定数

図 5 の直線の傾きは、式(2)で導入した知覚パワーの減衰定数 $\lambda(f',f')$ である. 動的テキスチャの時空間周波数に対する減衰定数 $\lambda(f',f')$ を図6 に示す.

さて, filling-in は, filling-in 対象領域, また は filling-in 対象のエッジ部分から入力を受ける 神経細胞が疲労することによって引き起こされ るとする考えが広く受け入れられている[1,4]. しかし, その明確な根拠は, 現在までに示され ていない. Filling-in が神経細胞の疲労によって 引き起こされるとすれば、強い刺激が入力する とき、より早く細胞が疲労し、filling-in がより 早く誘発されると考えられる. 光刺激が持つパ ワーが等しい刺激を与えたときには, 感度が高 い刺激の方が、急速に知覚パワーが減衰するは ずである. 図6に示す知覚パワーの減衰定数と, 図 3 に示した視覚の時空間周波数特性を比較す ると、その相関係数は 0.57 であり弱い相関があ る. これは、filling-in が神経細胞の疲労により 誘発される可能性を示す一つの根拠となる可能 性がある.

さらに、図6と図3を比較する.図6は、空間周波数が高い部分で、図3に比べ減衰定数が幾分低い傾向が見られる.本研究では filling-in 時間を計測する際,はじめに被験者に,動的テキスチャに含まれる1枚のフレームを呈示している.これは,動的テキスチャを呈示開始した瞬間に固視が一時的に解除される影響を除外するためである.しかし、事前に動的テキスチャと示前に知覚パワーが無視できないほど減衰している可能性が考えられる.そのため動的テキスチャ呈示開始前に被験者が固視を維持したまま動的テキスチャを呈示する実験上の工夫が必要である.

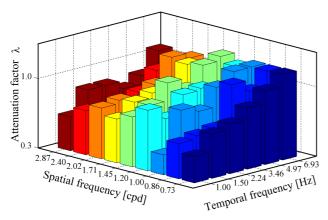


図 6 推定された知覚パワーの減衰定数  $\lambda(f^t,f^s)$ 

また、この特性は、視覚神経系の情報処理過程を反映している可能性も考えられる。網膜からV1に至る途中経路に存在するLGN(外側膝状体)には、高い時間周波数、低い空間周波数に感度のピークを持つMagno細胞、低い時間周波数、高い空間周波数に感度のピークを有するParvo細胞が存在する[13–15]. Filling-in が初期視覚野の細胞レベルで実現されていることを考えると、本結果には、LGNレベルでの細胞応答が関与している可能性も考えられる。その議論を進めるためには、更なる実験を行う必要である。

# 7. まとめ

視野周辺部での時空間周波数感度特性を推定し、また、動的テキスチャが有する時空間周波数に対する filling-in 時間を計測した。それらの結果を filling-in 発生プロセスのモデルに適用したところ、感度が高い刺激ほど知覚パワーが速く減衰し、filling-in が起こりやすい可能性が示された。これは、filling-in が神経細胞の疲労によって誘発される根拠の一つになり得る。

# 謝辞

本研究の一部は、平成 15 年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究[C]#15500332)を受けて行われた。

# 参考文献

- [1]V. S. Ramachandran, R. L. Gregory and W. Aiken, "Perceptual fading of visual texture borders", *Vision Res.*, Vol.33, 5/6, pp.717–721, 1993
- [2] V. S. Ramachandran and R. L. Gregory, "Perceptual filling in of artificially induced scotomas in human vision," *Nature*, Vol.350, pp.699–702, 1991.
- [3] P. D. Weerd, R. Desimone and L. G. Ungerleider, "Perceptual filling-in: a parametric study," *Vision Res.*, Vol.38, No.18, pp.2721–2734, 1998.
- [4] A. E. Welchman and J. M. Harris, "Filling-in the details on perceptual fading," *Vision Res.*, Vol.41, No.16, pp.2107–2117, 2001
- [5] Y. Sakaguchi, "Target/surround asymmetry in perceptual filling-in," *Vision Res.*, Vol.41, No.16, pp.2065–2077, 2001.
- [6] P. D. Weerd, R. Gattass, R. Desimone, and L. G. Ungerleider, "Responses of cells in monkey visual cortex during perceptual filling in of an artificial scotoma," *Nature*, Vol.377, pp.731–734, 1995.

- [7] M. Fiorani, M. Rosa and R. Gattass, "Dynamic surrounds of receptive fields in primate striate cortex: a physiological basis for perceptual completion?", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol.89, pp.8547–8551, 1992.
- [8] H. Komatsu, M. Kinoshita and I. Murakami, "Neural responses in the retinotopic representation of the blind spot in the macaque V1 to stimuli for perceptual filling-in", *J. Neuroscience*, Vol.20, No.24, pp.9310–9319, 2000
- [9] 横田正恵, 横田康成, "周辺動的テクスチャの時空間周波数特性と Filling-in の起こりやすさの関係", 電気学会論文誌, Vol. 123-C, No. 12, pp.2103-2110, 2003
- [10] M. Yokota, Y. Yokota, "A hypothesis of perceptual filling-in process for spatio-temporal frequency of dynamic textures", *Proc. of 25th Annual International Conference of the IEEE EMBS* (CD-ROM), 2003
- [11] D. H. Kelly, "Motion and vision II. Stabilized spatio-temporal threshold surface," J. Opt. Soc. Am., Vol.69, pp.1340–1349, 1979.
- [12] R. J. Snowden and R. F. Hess, "Temporal frequency filters in the human peripheral visual field," *Vision Res.*, Vol.32, No.1, pp.61–72, 1992
- [13] M.Livingstone and D. Hubel, "Segregation of form, color movement, and depth: anatomy, physiology, and perception", *Science*, Vol.240, pp.740–749, 1988
- [14] P. H. Schiller and N. K. Logothesis, "The color-opponent and broad-band channels of the primate visual system", *Trends in neuroscience*, Vol.13, pp.392–398, 1990
- [15] R. De Valois, N. Cottaris, L. Mahon, S. Elfer and A. Wilson, "Spatial and temporal receptive fields of genuiculate and cortical cells and directional selectivity", Vision Res., Vol.40, pp.3685–3702, 2000

# 連絡先:

横田 正恵

名古屋文理大学情報文化学部情報文化学科 〒492-8520 愛知県稲沢市稲沢町前田 365

Phone: 0587-23-2400 Fax: 0587-21-2844

E-mail: yokota@nagoya-bunri.ac.jp

# 音楽経験のレベルによる調認識の差異について

Difference of Tonality Recognition Depend on Level of Music Experience

山脇 一宏\* 椎塚久雄\*

Kazuhiro YAMAWAKI\* and Hisao SHIIZUKA\*

\*工学院大学大学院工学研究科情報学専攻

\*Informatics, Kogakuin University Graduate School

**Abstract**: This paper discusses the recognition of tonality in music which causes it from the level of a musical experience. We do the questionnaire survey in the recognition of tonality, for two groups of students, the first is general student who doesn't major in music and second is student who majors in music. It is clarified that in these two student groups, there is a marked difference for recognition. Moreover, it is clarified that the student who majored in music felt the difference of a detailed image for the recognition of tonality.

# 1.はじめに

従来,楽音を把握する能力(以下ソルフェージュ能力)がそのまま調を判別・同定する能力と重なると考えられて来た.調を同定することは調に対する認識を深める大きな手段である.従ってソルフェージュ能力が高く音楽的知識の高い人達だけが調に対するイメージを深く持ちえるのであり、ソルフェージュ能力が低い音楽的知識がそれほど高くない人達には、楽音を同定できないから、調の違いを判別できない.だから、ソルフェージュ能力が低い人たちは調に対するイメージをほとんど有していないだろうと想像されてきた.しかしこのソルフェージュ能力と調に対するイメージ・認識の間にどのような感性的な関連・対応が存在するかという点についての詳細な考察はなされていない.

本論文は,音楽の特徴の決定に重要な楽曲の調に対する認識の,音楽の経験の相違によって生じる対応の変化を探るものである.

以下2.ではアンケートの詳細について述べる.3.では 我々が開発した形容詞イメージチャートによる特徴認識法 [1]を用いて調の認識・イメージの分析結果について述べる. 4.では,実験結果から得られた音楽経験の相違による調に 対する認識の差異について述べる.尚,巻末にアンケートに 使用した楽曲の譜例を付録した.

我々の検証によって,音楽的な経験の差異が調の認識について与える影響についての興味深い結果が得られた.

# 2.アンケートの詳細

# 2.1 アンケートの手順

サンプル曲は譜例1 (Sample1:八長調·Cdur)と譜例1をSample2:嬰ヘ長調(Fis dur)Sample3:変イ長調(Asdur),Sample4:変ニ長調(Desdur),Sample5:ホ長調(Edur)に転調した5曲と譜例1の短調版である,譜例2 (Sample6:変ホ短調・es moll)の計6曲とした.サンプル曲を聞かせ,以下の3

# つの質問を課した.

尚,演奏者は著者の一人が担当し,機材等も全て同じ条件で6曲録音した.尚,アンケートは3~4名のグループ単位で行ったが,グループによって,サンプル曲再生の順序も変化させた.

以下の2つのグループを設定してアンケート調査を行った. 第1グループ(以下 G1): 貞静学園保育福祉専門学校の学生 15名(全て女性)

第2グループ(以下 G2):国立音楽大学ピアノ科および音楽教育学科の学生8名(全て女性)

# 2.2 アンケートの設問

アンケートは以下の3つの設問の設定した.

- A. 形容詞自由選択によるサンプル曲のイメージ聴取.
- B. サンプル曲を聴いて思い浮かべる色彩を自由に記載.
- C. 演奏された楽曲の調性について記載.

設問 A について:音楽における気分検索についてその有用性が確認されている著者らが開発した独自の特徴抽出法を採用した.著者らの方式では,形容詞の自由選択による特徴抽出が可能である.今回は56の形容詞を選択肢として使用した.

設問Bについて:調のイメージを形容詞以外で表現する場合,一言でイメージを表すことが可能でしかも認識の差がはっきり現れる方法として色彩に置き換える手法を採用した. 我々の特徴認識法は色彩のイメージを把握するために作られたカラーイメージチャート[2]を利用しているため,色彩のイメージとの関連は調認識の差異を解析するに

設問 C について: 被験者の音感についての資料とした. 今回の実験では,6曲全て正解の学生およびアンケート調査後の質問等で絶対音感[3]であると思われる学生を絶対音感保持者と規定した. 又,3~5曲程度正解であった学生を相対音感保持者であると規定することとする.

実験の結果第一グループ8名には絶対音感保持者が6

名,相対音感保持者が2名存在した.又、第二グループに は絶対音感・相対音感の学生は存在しなかった.

#### 3.アンケートの結果解析

# 3.1 設問 A に使用した特長抽出法について

著者らが開発したカラーイメージチャートを元にした特長抽出法は、2段階のフェーズにて行われる.

第一段階:カラーイメージチャートに使用されている形容 詞郡から,代表的な形容詞を抽出して選択肢として用意する. 尚,今回は56の形容詞を選択肢とした

第二段階:カラーイメージチャートに使われている形容詞イメージチャートを元に各形容詞の座標位置を求め、その座標点に各形容詞の選択頻度を元に作成したバルーンをプロットする.このプロット図を元に分析を行う.チャート図は形容詞のイメージの近似を元に音楽の特徴を把握できるため、大まかなイメージの把握が可能である.

本研究でも使用されているチャート図は形容詞イメージチャートに準拠しており、X軸がWarm-Cool軸、Y軸がSoft-Hard軸となっている.

#### 3.2 設問 A の結果の形容詞イメージチャートへのプロット

ここでは、著者らが開発した特徴把握法によって処理された形容詞イメージチャート図を示す。G1 - Sample1の結果を図1,G1 - Sample4の結果を図3に示す。又 G2-Sample1の結果を図4,G2 - Sample4の結果を図5にG2-Sample6の結果を図6にそれぞれ示す。

尚,形容詞イメージプロット図はカラーイメージスケールに 用いられている形容詞イメージチャートを元に各形容詞の選 ばれた頻度をバルーンの大きさとして表現している。しかしバ ルーンの大きさは各チャート図の中の相対的な大きさを示し ている。よってバルーンの大きさが各形容詞の絶対的な値を 示しているわけではない。

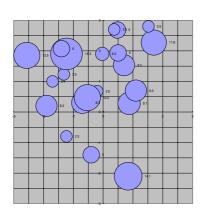


図1 G1-Sample1: Cdur プロット図

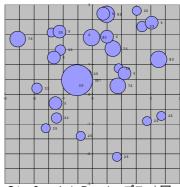


図2 G1 - Sample4: Des dur プロット図

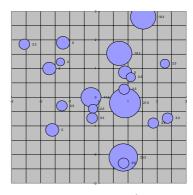


図 3 G1 - Sample6:es moll プロット図

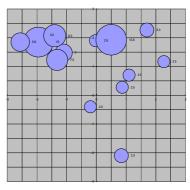


図4 G2-Sample1 : C dur プロット図

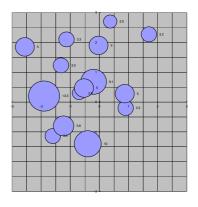


図 5 G2-Sample4: Des dur プロット図

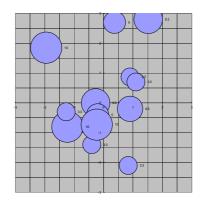


図 6 G2 - Sample 6: es moll プロット図

#### 3.3 設問 A の結果解析

# G1 グループ(一般学生)の傾向分析

- (1) 聴取者が音楽専門家ではない場合,アンケート調査における形容詞選択率は,個人的な嗜好に左右されやすいという,我々の先行研究[4]もあり,当初から予測されていたが、,G1 グループにおいては,今回掲載しなかった他の Sample 曲においても,形容詞のイメージに明確な法則を見つけることはできなかった.
- (2) ほとんどの学生が調性判定についてはわからないということで空欄であった.しかし形容詞によるイメージの聴取では,調性以外全〈変わらない図1,Sample1(C dur)と図2,Sample4(Des dur)において全〈別の反応を示している.絶対音感・相対音感ではないにせよ,調性の違いよってイメージの変化を感じている.

#### G2 グループ(音楽大学生)の傾向分析

- (1) 図3のSample1については調性判定が安易な八長調(C dur)であるため全員が正解している. やはリイメージは集中している.
- (2) 図5の Sample 4 (Des dur) についてはイメージの拡散が 起きている. これは変ニ長調 (Des dur) が異名同音調で ある嬰ハ長調 (Cis dur) との混同が見られることに起因 する可能性がある.

このように異名同音的な認識のずれが生じる調性については,イメージも拡散する方向にある.

表 1 Sample 4 調性判定一覧

	# * · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
調性	選択人数
変二長調	4
嬰八長調	3
その他(間違い)	1 (二長調・Ddur と記載)

(3) 図 4 G2-Sample 1 (C dur)と図 6g2-Sample 6 (es moll)では、傾向が大きく異なっている。G2-Sample

1のプロットデーターはカラーイメージチャートの 形容詞イメージチャートでは「ロマンティック」「プリティ」「ナチュラル」と分類させているエリアである.G2-Sample6のプロットデーターは,形容詞イメージチャートでは,「ゴージャス」「ダンディ」と分類されているエリアが中心となっている.

このように,形容詞の選択には一定の傾向が見出される場合が多かった.

#### 3.4 設問 B の結果解析

設問 B で選択された色について G1グループの結果を表2に, G2 グループの結果を表3にそれぞれ示す.尚,色彩に微妙な変化を書き込んだ聴取者もいたが,基本的にイメージを統合させて評価した.(例:濃い緑 緑,きれいな赤 赤)

表2 G1 グループ色彩評価結果表

Sample 曲名	色彩評価(全 15 名)
Sample 1	ピンク-3 水色-3 緑-3 赤-3
(C dur)	その他 :黄色 紅色 銀色
Sample 2	黄色 - 5 水色 - 4 ピンク - 3
(Fis / Des dur)	その他 :白 灰色 黄緑
Sample 6	灰色 - 10 深い赤 - 2
(es moll)	その他: 黒 白 紺色

表3 G2 グループ色彩評価結果表

Sample 曲名	色彩評価(全8名)		
Sample 1	水色 - 3 白 - 2		
(C dur)	その他∶赤 桃色 黒		
Sample 2	ピンク - 3		
(Fis / Des dur)	その他:茶 金色 水色 黄緑 黄色		
Sample 6	紫 - 2 ベージュ - 2 灰色 - 2		
(es moll)	その他∶茶 緑		

#### 3.5 設問 B の結果解析

(A) カラーイメージスケールの色彩配色と類似点がある.

設問 A の結果解析において G2 グループの Sample 1 は「ロマンティック」「プリティ」「ナチュラル」エリアにある程度集中している.又 Sample 6 は「ゴージャス」「ダンディ」エリアに集中していると述べたが、G1・G2 グループとも設問 B で選択された色のほとんどはその定められた色彩は、カラーイメージスケールにおけるそれぞれのエリアに定められている3色の配色パターンのイメージに非常に近い、本論文は色彩の微妙なニュアンスを印刷で表現できないので、ここでカラーイメージスケールの記述を記述する.

・カラーイメージチャートより

#### 「ロマンティック」

柔らかく,夢のある,優しいイメージ.淡いソフトな清色や白を 微妙にまとめ,メルヘンの雰囲気をかもし出す.

#### 「ダンディ」

格調と落ち着き,安定感,男性的な渋さが基本のイメージ. ハードな感覚の寒色系を中心としためりはりのある配色.

G1 グループのプロット(図1,図3)では,形容詞のイメージ

は拡散し、傾向を見出すことはできなかったが G2 グループ の示した傾向と設問 B の選択された色彩は一致している. (B)全ての Sample 曲について検討してみても設問 B の色彩 選択は G1と G2 グループに類似点が存在する. 音感に関しての能力に差があるにも関わらず色彩の選択傾向は類似している.

(C) G2 グループは Sample 2 を異名同音調として Ges dur(変ト長調)として把握する可能性もあるにも関わらず,正解した6 名全員が嬰ヘ長調と答えている。今回は使用したピアノのピッチが442Hz と高めであったこともあり、シャープ系の調に聴こえた可能性が高い.

#### 4. まとめ

#### 4.1 G1グループの反応について

G1グループは設問 A についてはほとんど傾向が見出せない状況であった. 我々の先行研究にもあるように, 音楽家ではない人たちには, 個人差が激しく, 稀な反応が多いため, 今回のような単純でリズム的変化の乏しい楽曲については, イメージの確定が難しいと推察される.

しかし設問 B については,絶対音感・相対音感の能力保持者が皆無であるにもかかわらず G2 グループより,色彩の選択に一定の傾向が見出せた.この結果には著者らも驚きを覚えた.彼らはどのようにして調性の差異を見極めているのだろうか?調整に対する認識レベルが低いのにもかかわらず,色彩的には一定の傾向を見出せた

#### 4.2 G2 グループの反応について

絶対音感および相対音感を保持している音大生グループ (G2 グループ) は設問 A における反応は非常に単純な楽曲 (カデンツ: - - という和音の繰り返し) について も, 設問 A について, 反応が的確で, ある程度の傾向が読み 取れた. これは調性に対するイメージがある程度は確立しているからだと推測される. 一方, G2 グループの設問 B は G1 グループより拡散している傾向が高い. しかし, カラーイメージスケールのカテゴリー・色彩のイメージからかけ離れた選択はほとんどない. 大きなイメージは外れていないが, 微妙な感覚の相違点がある. G1 グループが音楽家の集団であることから, この微妙な相違点が個人差なのかもしれない.

### 4.3 総括

一般の学生(G1)は,音楽の経験が浅〈音感に対する訓

練がなされていないが、調に対する認識は専攻学生とは大きく変らない、しかしその認識は非常に大まかである。専攻学生(G2)は、大まかな認識としては的確に把握しているものの、非常に微細なイメージの差異をも感じており、個人差が現れることが判明した。

著者らは、G1グループも大まかな認識であるにせよ、調のイメージを判別し、しかもその認識が音楽の知識の高いG2グループとそれほど違わないということに驚きを覚えた。しかもその結果が特に色彩としての把握において起こったといくことから、音楽の特徴認識が脳内でどの様に行われているか、という興味深い問題への関連も想起された。

この結果を元に音楽における諸情報を我々はいかに把握しているのかという認識に関する研究も行っていく予定である.

#### 参考文献

[1]山脇 一宏, 椎塚 久雄: カラーイメージスケールの音楽検索システムへの応用について, 日本感性工学会 第9回あいまいと感性研究部会、pp.44-47(2002) [2](株)日本カラーデザイン研究所編: 新・カラーイメージ事典, p.96, 講談社, 東京(1993).

[3]最相葉月:絶対音感,小学館、2002.

[4]Kazuhiro YAMAWAKI & Hisao Shiizuka:

Individual Differences on Feature Recognition of music, 6th Asian Design Conference: E-47 (2003)

# 連絡先

〒163-8677 新宿区西新宿 1-24-2

工学院大学大学院情報学専攻 博士後期課程2年 山脇 一宏

Email:yamawaki@a3.ctkev.ne.jp

# 付録

譜例2 Sample 1:八長調(C dur)尚, Sample 2·5は Sample 1をそれぞれの調に転調して使用した.



譜例2 Sample 6:変水短調(es moll)



# 不完全情報ゲームにおける対話型パートナーシステムの構築

# **Interactive Partner System in Imperfect Information Game**

矢野 智聡 Tomoaki Yano 筑波大学 University of Tsukuba 鬼沢 武久 Takehisa Onisawa 筑波大学 University of Tsukuba

Abstract: This paper aims at the construction of the interactive partner system that plays seven-card stud with a human partner player against opponent players. The present partner system is the extended version of the poker playing system, which is already developed considering the strategy tendency of opponent players and the bluff strategy. The partner system gives some advice to a human partner player for the decision in a poker game and presents some comments fluctuating between hopes and fears on win/lose of games to a human partner player. This paper also compares the results of games with the partner system and those of games without the partner system, and analyzes the ways of making decision in games with/without the partner system in order to confirm the usefulness of the present system.

# 1. はじめに

コンピュータを用いたゲームプレイにおいて、コンピュータはゲームをプレイする場、あるいは対戦相手として使われている。また、対戦相手用に開発されたアルゴリズムを転用してコンピュータを教師システムとして用いる場合もあり、この場合人間プレーヤは戦術をシステムに学ぶことになる。

チェスやチェッカーのような完全情報ゲームでは、人間のトッププレーヤに対し目覚しい戦果をあげているアルゴリズムが開発されている[1]。また、結果が確定的[2]であることから教師システムの示す戦術は勝利に直接結びつくものであることが期待できる。しかし、不完全情報ゲームのアルゴリズムはいまだ人間プレーヤの強さにはおよばない。しかも、どれほどアルゴリズムが強くなってもゲームの結果を保証することは出来ず、そのようなアルゴリズムを転用した教師システムでは見当はずれのことをプレーヤに教える危険性が付きまとう。それゆえ、開発されたアルゴリズムに基づいた判断を利用し、戦術を示すだけのシステムではプレーヤがその理由を推測することが非常に困難になり、混乱を招くことになりかねない。

そこで本研究では従来の教師システムのように戦術のみを教えるのではなく、プレーヤと意見を交わしながら共に考え、より良いプレイのためにはどうすればいいのかを追及していくパートナーシステムを構築する。システムがなぜそう判断するのかをインタラクションを通じて知ることで、プレーヤがゲームに対しての理解を深めることができる。本論文では、どう行動するべきかという意志のみを伝える従来の教師型システムと、対戦の結果に一喜一憂し、自分の意志を述べつつもプレーヤの相談も受け付ける本システムとで比較実験を行い、その有効性を確かめる。

# 2. セプンカードスタッド

本研究で扱うセブンカードスタッドポーカーゲーム [3]について簡単に説明する。

スタッドポーカーには手札の交換はなく、カードには 所有者のみが見ることの出来るホールカードと他のプレーヤも見られるアップカードがある。一人のプレーヤ がゲームに用いる7枚のうち、図1に示すようにはじめ の2枚と最後の1枚がホールカードとなる。

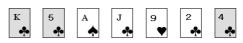


図 1 カードの例

カードは、はじめ3枚ずつが配られ、ベッティングインターバルをはさんで7枚まで1枚ずつ配られる。7枚のカードがそろった後は、同様にベッティングインターバルをはさみながらホールカードを一枚ずつ開いていく。

ベッティングインターバルでは各プレーヤがポイントを賭けてゲームに参加する(ベット)か、ポイントを放棄してそのゲームをあきらめる(ドロップ)かのアクションを選択する。

すべてのカードが開かれたとき、最も強いポーカーハンド(以下ハンド)を持っているプレーヤが勝者となる。しかし、他の全てのプレーヤがゲームを放棄した場合は残ったプレーヤが勝者となる。勝者はそのゲームでベットされた全てのポイントを獲得することが出来る。

なお、本研究ではひとつのゲームが終了後、全てのカードを開いて実際のハンドを確認する。

また、本論文で扱うゲームは先攻、後攻の二人で行い、 先攻をプレーヤ、後攻を対戦相手とする。

# 3. システム

# 3.1. 概要

本システムの流れを図2に示す。本システムは、プレーヤがベット、ドロップ、カードオープンなどのアクションの決断を迫られた際に、パートナーとしての意志を決める意志決定部とハンド情報を解析するハンド評価部、およびそれらの情報をプレーヤに伝えるために文字情報に変換する対話生成部からなっている。

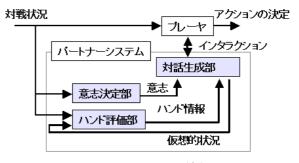


図 2 システムの流れ

# 3.2. 意志決定部

本システムでは、ファジィルール使って意志決定を行うシステム[4]を用いてパートナーとしての意志を決めている。意志決定は図3に示す流れで行う。

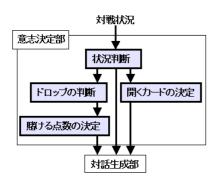


図 3 意志決定部の流れ

# 3.2.1. 状況判断

具体的なアクションの判断を行う前に現在の状況が どのようになっているのかを分析する。ハンドの相対的 な強さや対戦相手が賭けてきたポイント、対戦相手の傾 向などを基に現在、どちらが優勢なのかを推定する。こ の推定結果、および対戦相手の賭けたポイントに関して はプレーヤに補助的に提示する情報として対話生成部 にも出力する。

### 3.2.2. ドロップの判断

状況判断の結果、劣勢と判断した場合にはドロップするかどうかを考慮する。

ゲームの序盤、中盤、終盤という情報と、対戦相手の 賭ける点数に対する認識を状況判断の結果に加えてフ ァジィ推論し、ドロップする意図がどの程度なのかを推 定する。

ドロップするか、ゲームを続行するかの最終判断は、 推定されたドロップする意図の程度と発生させた乱数 を比較して行われる。しかし、このときハッタリが成功 する可能性が高ければドロップせずにゲームを続行す る意志を持つ。

# 3.2.3. 賭ける点数の決定

ゲーム続行の判断がされれば、状況の判断に応じた賭け点数を出力するが、ハッタリを行う場合はそのハンドに見合った強気の点数を出力する。

# 3.2.4. 開くカードの決定

状況判断の結果から、強く見えるように開くのか、弱く見えるように開くのかを決める。そして、ホールカードを一枚開くと対戦相手からどう見えるのかを全てのホールカードについて計算し、開くべきカードを決定する。

# 3.3. ハンド評価部

意志決定部で用いられているハンドの相対的な強さだけではプレーヤにハンドの状況が伝わりにくい。そこで、図4のような流れで具体的にハンドごとの状況を評価し、対話生成部に出力する。

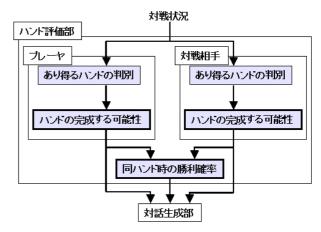


図 4 ハンド評価部の流れ

#### 3.3.1. あり得るハンドの判別

ハンドができているかどうかはそれぞれのハンドのパターンに適合するかどうかで判別する。また、あり得るハンドかどうかは対象のカードのうち、ハンドのパターンから欠けた部分が全てシステムから見えているかどうかで判断する。例えば、プレーヤと対戦相手に同じ数字のワンペアが見えている場合、そのワンペアがスリーカードになることはありえない、などと判断する。

#### 3.3.2. ハンドの完成する可能性

あり得るハンドの確率でそのハンドの可能性を計算 する。

#### 3.3.3. 同八ンド時の勝利確率

対戦相手も同じハンドになる可能性がある場合、その ハンドの完成形全てについてプレーヤのハンドと比べ て勝率を計算する。

### 3.4. 対話生成部

意志決定部、ハンド評価部で得られた情報を組み合わせ、言語情報に変換してプレーヤに提示する。提示する情報には問い合わせに対する応答と、状況の変化に応じて自発的に行うコメント、およびゲームの決着に対する発言を生成する。

# 3.4.1. 問い合わせに対する応答

アクションに関する応答の場合、システムがどのくら いそのアクションに対して乗り気なのかで表現が変わってくる。以下、提示する情報の種類と例を挙げる。

#### (a) ベットするかどうか

賭ける点数の決定で決定されたポイントの量に応じてベットに対する気乗りの程度を変更し、言語表現を出力する。

例:ここは当然賭けていきますよね 降りた方が良いと思います

# (b) 賭ける点数について

賭けられるポイントの範囲を5つの領域に分け、賭ける点数の決定で出力される値が当てはまる領域の言語表現を出力する。

例:ガンガン行きましょう 160 くらいが限度だと思います

#### (c) 開くカードについて

開くカードの決定を言語表現に変更する。どのカード を開いても相手のハンドより良く見えそうにないとき は、2番目の例に示すような後ろ向きな発言をする。

例:一番左が良いと思います

どれを開いてもあまり変わりがないと思います

アクションに関するもの以外では以下のような種類の 応答がある。

#### (d) 仮定的にホールカードを開く

図2における仮想的状況の矢印にあたる。プレーヤが示したホールカードを開いた状況をハンド評価部に送り、新しいハンド評価を取得する。状況判断の結果と合わせ、戦術としてどうなのかをコメントする。

例:そうすると見かけのハンドはツーペアです ハンドを弱く見せるには良いかもしれません

#### (e) 対戦相手のハンド

対戦相手のハンドのうち、注目するハンド、見えているハンド、ありうる最高のハンドに分け、それぞれの可能性についてコメントする

例:ワンペアが非常に怪しいと思います。

#### (f) プレーヤのハンド

プレーヤのハンドのうち、対戦相手が注目するであろうハンド、実際のハンド、あり得る最高のハンドの可能性についてコメントし、対戦相手にも同じハンドの可能性がある場合はどちらのハンドの方が強いか述べる。

例:実際はワンペアです

どちらもワンペアと考えると、少し有利だと思い ます。

#### (g) 相対的なハンドの強さ

状況の判断の結果をハンドの雰囲気という言葉を 用いて表現する。

例:ハンドの雰囲気は優勢です

#### (h) 対戦相手のベットポイント

状況の判断によって得られた評価を言語表現に直して表現する。

例:相手のベットは結構な量ですね

# 3.4.2. 自発的コメント

対戦状況に以下のような変化があった場合には問い合わせの有無と関係なく次のように発言する。

(a) ハンド状況が変化した

例:相手のフラッシュはなくなりましたね

(b) 対戦相手のベットポイントが不審なほど多い、 もしくは少ない

例:相手のベットポイントが少ない気がします。

# 3.4.3. ゲーム終了時

ひとつのゲームが終了し、結果が出た場合にその内容を振り返り、コメントする。どのようなコメントをする かは

- (1) 勝者はどちらか
- (2) 決着はドロップかショウダウンか

- (3) ドロップの場合、実際にハンドが強かった のはどちらか
- (4) パートナーが最後に述べた意志決定とプレーヤのアクションは同じか。
- (5) 対戦相手とのハンドの強さの差が大きいか

といった情報を元に判断する。たとえばパートナーがプレーヤのハンドの方が対戦相手よりもずっと強いと判断した場合、プレーヤがベットし、対戦相手のドロップで勝てば「うーん、逃げられたんでしょうか...」といった発言をする。

# 4. 評価実験

本パートナーシステムを評価するために、プレーヤが アクションの判断をする度にコメントする教師型シス テムと比較して実験を行う。

実験における対戦相手には[4]のシステムを用いる。また、被験者は5名の学生でポーカーは初心者である。パートナーシステム、教師型システムそれぞれ30ゲームずつを行うが、そのうち15ゲームはスートを変えただけの同じカードを用いている。以下これを共通するゲームと呼び主な解析の対象としていく。なお、被験者A,C,Eはパートナーシステムから、B,Dについては教師型システムから実験を行うこととする。

#### 4.1 利得の獲得

ゲームの目的であるポイントをどれだけ得るかという点について分析する。表1に共通するゲームにおいて 各被験者が獲得した利得を示す。

表 1 被験者ごとの利得合計

	教師	パートナー
Α	49231	8882
В	4604	14796
С	-6634	-48102
D	-32779	-36213
Е	-27443	95

パートナーシステムがあることで教師型システムに 比べ単純に利得が増加するということはないことがわ かる。同じカードを用いたゲームであってもプレーヤの 行動の変化だけでなく、対戦相手の行動の変化もあり、 単純に利得の多さだけでシステムの効果を比べること は出来ない。

次に各プレーヤの賭けたポイントを見てみる。表 2 に 各プレーヤが共通する 15 ゲームで賭けたポイントの 総額を示す。

表 2 被験者ごとの総ペットポイント

	教師	パートナー
Α	52767	21962
В	6788	17224
С	59584	71572
D	62115	100437
E	34967	46105

被験者A以外ではパートナーシステムを用いた場合の

方が多いことがわかる。表3に示すように、被験者Aについても勝負に出た6ゲーム目を除いた部分で言えばパートナーシステムの方がベットポイントの量が多い傾向にある。パートナーシステムを用いた場合の方がベットポイントが多くなるということは、自分のベットの判断に自信を持った結果と考えることができる。

表 3 被験者 A のベットポイント

ゲーム	教師	パートナー
1	75	1406
2	105	753
3	206	85
4	171	109
5	261	230
6	47920	9360
7	299	218
8	195	461
9	2517	4656
10	198	272
11	45	2956
12	337	280
13	68	195
14	66	274
15	304	707
計	52767	21962
*	4847	12602

\*は合計から6ゲーム目のポイントを引いたもの

# 4.2. 被験者の捉え方

実験後、被験者にどちらのシステムを用いてゲームをしたいか、もしくは一人でプレイしたいかを尋ねてみたところ、パートナーシステムでプレイしたいと答えた被験者が4名、一人でプレイしたいと答えた被験者が1名であった。パートナーシステムを選んだ理由としては

- パートナーとプレイしているときは「そんなことは 自分だけでも気づける」と思っていても、なくなる と意外とわからなくなった
- 一人だと判断に自信が持てないときに困るが、システム判断理由がわからないとかえって混乱する。

などが挙げられる。

また、一人でプレイしたいと答えた被験者は

・ 全てを自分で決めて結果も一人で受け止めたい

というように答えており、決断に際して他からの手助け を必要としないタイプと言える。

これらから一人でプレイしたいプレーヤでなければ 教師型システムよりはパートナーシステムに親しみを 感じ、利用したいと感じることが多いと推察され、シス テムの有用性が伺える。

また、システムの印象を尋ねてみたところ次のような 回答を得ている。

#### 教師型システムについて

- ・ 判断の理由がまるでわからない
- ・ 励ましたり誉めたりしてくれず、親しみにくい
- 自分がゲームをしているというよりはやらされているという感じがする。

#### パートナーシステムについて

- ・ 反応が人間的で親しみやすい
- 気づきにくい情報を得ることができる
- アドバイスの理由がわからないことがある

これらから、勝敗に関するコメントや人間らしい感情を表現することでシステムに対する親しみやすさが増していることが伺える。また、どちらのシステムにも判断の理由に疑問が残ることがあるようだがパートナーシステムの方がその頻度が少なく、インタラクションによって改善されていることが推察できる。

# 5. おわりに

不完全情報ゲームであるセブンカードスタッドゲームにおいて、プレーヤの相談相手となる対話型パートナーシステムを構築した。実験の結果、プレーヤが本システムを利用することでゲームに対する理解を深めることができること、および感情を交えた表現をすることで単純に戦術に指示を出す教師型システムよりもプレーヤの印象が良くなることを確認した。しかし、今回インタラクションのために用意した情報だけではパートナーシステムの意見に対してプレーヤが満足できるだけの情報を提示することができない部分があった。

今後、プレーヤの期待する情報を推測して発言することや、新たなパラメータの導入によって乱数による意志 決定を減らし、意志の説明の合理化を進めていく。

#### 参考文献

- [1] 飯田博之,松原仁:ゲーム情報学の動向,情報処理, Vol.44, No.9, pp.895-899, 2003
- [2] モートン·D·デービス:ゲームの理論入門,講談 社,1972
- [3] ディヴィット・パーレット: トランプゲーム大百科, 社会思想社, 1998
- [4] T.Onisawa , C.Takahashi : Bluff Strategy in Seven-card-Stud Poker Game , Proc. Of the 10th IFSA World Congress , pp406-499 , 2003

#### 連絡先:

矢野 智聡

〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1 筑波大学機能工学系鬼沢研究室

Phone: 0298-853-6188

E-mail: tomoaki@fhuman.esys.tsukuba.ac.jp

# ファジィランダム多目的線形計画問題に対する M- -パレート 最適性と確率 最大化モデルに基づく対話型満足化手法

An Interactive Satisficing Method Based on M- $\alpha$ -Pareto Optimality and the Probability Maximization Model for a Fuzzy Random Multiobjective Linear Programming Problem

片桐 英樹坂和 正敏加藤 浩介壇上 博紀Hideki KATAGIRIMasatoshi SAKAWAKosuke KATOHiroki DANJYO広島大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Hiroshima University

Abstract For decision making problems involving uncertainty, there exist two typical approaches: stochastic programming based on the probability theory and fuzzy programming based on the fuzzy set theory, and they have been developed in various ways. In this paper, we focus on multiobjective linear programming problems involving fuzzy random variable coefficients and try to derive a satisficing solution satisfying M- $\alpha$ -Pareto optimality through the interaction. After introducing fuzzy goals to consider the fuzziness of the decision maker's judgment for objective functions and formulating the problem based on the probability maximization model in stochastic programming, we propose an interactive satisficing method for a fuzzy random multiobjective linear programming problem.

#### 1. はじめに

これらのモデルにおいては,ランダム性とファジィ性が別々に扱われ,問題に含まれるパラメータがそれぞれ確率変数およびファジィ数として与えられてきたが,現実には,確率変数の実現値がはっきりわからない状況など,ランダム性とファジィ性が同時に含まれる状況もある.近年,そのようなランダム性とファジィ性を同時に含むパラメータを表す概念としてファジィランダム変数 [5] が注目され,数理計画問題への応用がさかんになりつつある [6, 7, 8].

本研究では,ファジィランダム変数係数を目的関数に含む場合に対して,ファジィ情報とランダム情報を有効に利用するための意思決定モデルとして,坂和ら [4] によって提案された  $M-\alpha-パレート最適性の概$ 

念と確率計画モデルにおける確率最大化モデルに基づく新たなモデルおよび解概念を提案し,対話型満足化手法の適用を通して,問題の現実性の度合いを考慮しながら意思決定者の満足解を対話的に導出する手法を与える.

# ファジィランダム多目的線形計画問題 定式化

次のような多目的線形計画問題を考える.

$$\min \quad \tilde{\bar{C}}_{i}x, \ i = 1, \dots, k$$
s. t.  $x \in X \stackrel{\triangle}{=} \{x \in R^{n} | Ax \leq b, \ x \geq 0\}$  (1)

ここで,x は n次元決定変数列ベクトル,A は  $m \times n$  係数行列,b は m 次元列ベクトルである.また, $\tilde{\bar{C}}_i$  =  $(\tilde{\bar{C}}_{i1},\dots,\tilde{\bar{C}}_{in}),\ i=1,\dots,k$  であり,任意の根元事象  $\omega$  に対して,次のメンバシップ関数で規定される L-R 型ファジィ数  $\tilde{\bar{C}}_{ij}(\omega)$  を実現値とするファジィランダム変数であるとする.

$$\mu_{\bar{C}_{ij}(\omega)}(t) = \begin{cases} L\left(\frac{\bar{\gamma}_{ij}(\omega) - \tau}{\beta_{ij}}\right) & (\tau \leq \bar{\gamma}_{ij}(\omega)) \\ R\left(\frac{\tau - \bar{\gamma}_{ij}(\omega)}{\delta_{ij}}\right) & (\tau \geq \bar{\gamma}_{ij}(\omega)), \\ i = 1, \dots, k, \ j = 1, \dots, n \end{cases}$$
(2)

ここで,L(t) は  $L(t) \stackrel{\triangle}{=} \max\{0,l(t)\}$  で定められる  $[0,\infty) \to [0,1]$  を満たす強意単調減少関数,l(t) は l(0)=1 を満たす強意単調減少関数とする.R につい

ても同様の条件を満たすものとする.また, $\bar{\gamma}_{ij}$ , $i=1,\dots,k,\ j=1,\dots,n$  は平均値  $m_i$ ,分散  $\sigma_i^2$  である確率変数  $\bar{t}_i$  と定数  $\gamma_{ij}^1$ , $\gamma_{ij}^2$  によって  $\bar{\gamma}_{ij}=\gamma_{ij}^1+\bar{t}_i\gamma_{ij}^2$  と表される確率変数とし, $\beta_{ij}$ , $\delta_{ij}$ , $i=1,\dots,k,\ j=1,\dots,n$  はそれぞれ左右の広がりを表すパラメータであり正数とする.目的関数の係数が L-R 型のファジィランダム変数であるため,任意の x に対して各目的関数は拡張原理から導かれる L-R ファジィ数の演算により,次のメンバシップ関数で規定されるファジィ数を実現値とするファジィランダム変数  $\tilde{Y}_i$ , $i=1,\dots,k$  となる.

$$\mu_{\bar{Y}_{i}(\omega)}(y) = \begin{cases} L\left(\frac{\bar{\gamma}_{i}(\omega)x - y}{\beta_{i}x}\right) & (y \leq \bar{\gamma}_{i}(\omega)x) \\ R\left(\frac{y - \bar{\gamma}_{i}(\omega)x}{\delta_{i}x}\right) & (y \geq \bar{\gamma}_{i}(\omega)x), \\ & i = 1, \dots, k \end{cases}$$
(3)

ここで,意思決定者が(1)の目的関数に含まれるファジィランダム変数ベクトルを特性付けるメンバシップ関数の帰属度が,すべてある値 $\alpha$ 以上であればよいと判断したとする.このとき,問題の現実性の度合いが $\alpha$ 以上である係数ベクトルの中で,特に意思決定者が最も望ましいようにその値を決定するという次の問題を導入する.

$$\min \quad \bar{\boldsymbol{c}}_{i}\boldsymbol{x}, \ i = 1, \dots, k 
\text{s. t.} \quad \bar{\boldsymbol{c}}_{i} \in \tilde{\boldsymbol{C}}_{i\alpha}, \ i = 1, \dots, k 
\boldsymbol{x} \in X$$
(4)

ただし, $ilde{C}_{ilpha}$  は  $ilde{C}_i$  のメンバシップ値が lpha 以上である集合を表す.

#### 2.2. ファジィ目標の導入

問題 (1) の各目的関数に対して,意思決定者の人間としての判断の曖昧性を考慮して次の線形メンバシップ関数に規定されるファジィ目標を導入する.

$$\mu_{i}(y) = \begin{cases} 0, & y > h_{i}^{0} \\ \frac{y - h_{i}^{0}}{h_{i}^{1} - h_{i}^{0}}, & h_{i}^{1} \leq y \leq h_{i}^{0} \\ 1, & y < h_{i}^{1}, & i = 1, \dots, k \end{cases}$$
 (5)

意思決定者はファジィ目標を決定する場合に  $h_i^0$  および  $h_i^1$  の値は任意に決定することができるが,ここでは各目的関数  $z_i(x)=m_ix$  の個別の最小化問題

$$\min z_i(\boldsymbol{x}), \ i = 1, \dots, k 
s. t. \ \boldsymbol{x} \in X$$
(6)

を解くことにより,個別の最小値を $h_i^0$  および $h_i^1$  の値を決める際の参考値として与えるものとする.この

とき,(4)は次の問題に書き換えられる.

$$\left. \begin{array}{ll}
 \text{max} & \mu_i(\bar{\boldsymbol{c}}_i \boldsymbol{x}), \ i = 1, \dots, k \\
 \text{s. t.} & \bar{\boldsymbol{c}}_i \in \tilde{\boldsymbol{C}}_{i\alpha}, \ i = 1, \dots, k \\
 & \boldsymbol{x} \in X
 \end{array} \right\}$$
(7)

ここで, $\tilde{C}_{i\alpha}$  は区間確率変数であり, $\bar{c}_i$  はファジィランダム変数のレベル集合に属する確率変数ベクトルである.したがって,(7) は区間確率変数を係数に含む多目的確率計画問題と見なすことができる.確率計画法における代表的なモデルとしては,期待値最適化モデル,分散最小化モデル,確率最大化モデルおよび満足基準最適化モデルが考えられているが,本研究では,確率最大化モデルに基づいて,ファジィ目標が満たされる満足度がある充足水準以上である確率を最大化するという次の問題を考える.

$$\max \quad p_{i}(\boldsymbol{x}) = \Pr(\mu_{i}(\bar{\boldsymbol{c}}_{i}\boldsymbol{x}) \geq h_{i}), \ i = 1, \dots, k \\
\text{s. t.} \quad \bar{\boldsymbol{c}}_{i} \in \tilde{\boldsymbol{C}}_{i\alpha}, \ i = 1, \dots, k \\
\boldsymbol{x} \in X$$
(8)

#### 3. 確率最大化モデルに基づく対話型満足化手法

# 3.1. 確率最大化モデルにおける $\mathbf{M}$ - $\alpha$ -パレート 最適解

問題 (8) には複数個の目的関数が存在するため,通常の単一目的の場合の最適解と同様に議論することはできない.そこで,坂和ら [4] によって導入されたM- $\alpha$ -パレート最適解の概念に基づいて,確率最大化モデルにおいて,ある目的関数値が満足水準よりも良い確率を改善するためには少なくとも他の一つの目的関数値に関する確率を改悪せざるを得ないような解の概念を定義する.

定義 1 (確率最大化モデルにおける  $\mathbf{M}$ - $\alpha$ -パレート最適解)

 $x^* \in X$  ,  $\bar{c}_i^* \in \tilde{C}_{i\alpha}$  ,  $i=1,\ldots,k$  に対して, $\Pr(\mu_i(\bar{c}_ix) \geq h_i) \geq \Pr(\mu_i(\bar{c}_i^*x^*) \geq h_i)$  ,  $i=1,\ldots,k$  でしかも,ある j について, $\Pr(\mu_j(\bar{c}_jx) \geq h_j) > \Pr(\mu_j(\bar{c}_j^*x^*) \geq h_j)$  となるような  $x \in X$  , $\bar{c}_i \in \tilde{C}_{i\alpha}$  ,  $i=1,\ldots,k$  が存在しないとき, $x^* \in X$  を満足水準  $h_i$  ,  $i=1,\ldots,k$  に対する確率最大化モデルにおける  $\mathrm{M}$ - $\alpha$ -パレート最適解, $\bar{c}_i^* \in \tilde{C}_{i\alpha}$  ,  $i=1,\ldots,k$  を対応する  $\alpha$ -レベル最適係数とよぶ.

# 3.2. 対話型満足化手法

問題 (8) はファジィ多目的意思決定問題であり,k 個の目的関数関数に対して,それらの集約する統合

関数

$$f(\boldsymbol{p}(\boldsymbol{x})) = f(p_1(\boldsymbol{x}), \dots, p_k(\boldsymbol{x}))$$

を導入すれば,問題(8)は

$$\left. \begin{array}{ll}
 \text{max} & f(\boldsymbol{p}(\boldsymbol{x})) \\
 \text{s. t.} & \bar{\boldsymbol{c}}_i \in \tilde{\boldsymbol{C}}_{i\alpha}, \ i = 1, \dots, k \\
 & \boldsymbol{x} \in X
 \end{array} \right\} \tag{9}$$

と書き換えられる.このような統合関数 f は k 個の 目的関数全体に対する意思決定者の満足度あるいは 選好を表していると考えられる.代表的な統合関数と しては、最小オペレータや積オペレータが挙げられる が、それらのオペレータは統合関数の一つの特別な場 合であり、一般の状況においては、k 個の目的関数の 統合法としては必ずしも満足できるものであるとは いえない.通常,意思決定者の複雑な選好を反映した 統合関数を大域的に陽に同定することは困難である と考えられるため,本論文では,意思決定者の陰に存 在する統合関数を大域的に陽に同定することなく,意 思決定者との対話により,局所的な選好情報を引き出 し,最終的に意思決定者の満足解を求めるという対話 型手法を導入する.具体的には,問題(8)において, 意思決定者は各目的関数に関する満足度がある満足 水準よりも良いという事象が生起する確率に対して、 自己の志望水準を反映する基準確率  $\bar{p}_i, i=1,\ldots,k$ を,対応するミニマックス問題

$$\min \left\{ \begin{array}{ll} \max_{i=1,\dots,k} \left\{ \bar{p}_i - p_i(\boldsymbol{x}) \right\} \\ \text{s. t.} \quad \bar{\boldsymbol{c}}_i \in \tilde{\boldsymbol{C}}_{i\alpha}, \ i = 1,\dots,k \\ \boldsymbol{x} \in X \end{array} \right\} \tag{10}$$

を解いて得られた結果を考慮して対話的に更新しながら,満足解を導出するという対話型満足化手法 [10] の適用を試みる.

ミニマックス問題 (10) は補助変数 v を用いて,等価的に

$$\begin{array}{ll}
\min & v \\
\text{s. t.} & \bar{p}_i - p_i(x) \leq v, \ i = 1, \dots, k \\
& \bar{c}_i \in \tilde{C}_{i\alpha}, \ i = 1, \dots, k \\
& x \in X
\end{array} \right\}$$
(11)

と変形することができる.この問題は,x だけでなく  $\bar{c}_i$  も決定すべき変数となっているため非凸非線形計 画問題であり,そのままでは大域的最適解を求めることはできない.したがって,以下では次のような集合 値関数

$$S_i(\bar{c}_i) = \{(x, v) \mid \bar{p}_i - p_i(x) \leq v\}, i = 1, \dots, k$$

を導入することにより、問題 (11) が従来の手法で解ける問題に変換できることを示す。

まず, $S_i(\cdot)$  に対して  $x \geq 0$  のとき,次の関係が成立する.

定理 1 (集合値関数の包含関係 ) 任意の  $\omega$  に対して  $ar c_i^1(\omega) \le ar c_i^2(\omega)$  であれば ,  $S_i(ar c_i^1) \supseteq S_i(ar c_i^2)$  が成立する . ファジィランダム変数のレベル集合  $ar C_{i\alpha}$  が閉区間  $[ar c_{i\alpha}^L(\omega), ar c_{i\alpha}^R(\omega)]$  と表せることに注意すると , 定理 1 より問題 (11) は

$$\max_{\mathbf{x}} v$$
s. t.  $\bar{p}_i - Pr\left(\mu_i(\bar{\mathbf{c}}_{i\alpha}^L \mathbf{x}) \ge h_i\right) \le v, i = 1, \dots, k$ 

$$\mathbf{x} \in X$$
(12)

と変換できる.ここで,

$$\alpha = L\left(\frac{\bar{\gamma}_{ij} - \bar{c}_{ij\alpha}^L}{\beta_{ij}}\right) = R\left(\frac{\bar{c}_{ij\alpha}^R - \bar{\gamma}_{ij}}{\delta_{ij}}\right),$$
$$i = 1, \dots, k, \quad j = 1, \dots, n$$

より, $L(\cdot)$ , $R(\cdot)$  の擬逆関数を  $L^*(\cdot)$ , $R^*(\cdot)$  とすると  $ar{c}_{ij\alpha}^L = (ar{\gamma}_{ij} - L^*(\alpha)\beta_{ij}), \ i=1,\ldots,k, \quad j=1,\ldots,n$   $ar{c}_{ij\alpha}^R = (ar{\gamma}_{ij} + R^*(\alpha)\delta_{ij}), \ i=1,\ldots,k, \quad j=1,\ldots,n$  となる.したがって, ${\gamma_i}^2 > 0$  と仮定すると,(12) は 次の問題に変形できることがわかる.

$$\min \quad v$$
s. t.  $\bar{p}_i - \Pr(\bar{t}_i \le z'_i(\boldsymbol{x})) \le v, \ i = 1, ..., k$ 

$$\boldsymbol{x} \in X$$
(13)

ただし,

$$z_i'(\boldsymbol{x}) = \frac{-\boldsymbol{\gamma}_i^1 \boldsymbol{x} + L^*(\alpha) \boldsymbol{\beta}_i \boldsymbol{x} + \boldsymbol{\mu}_i^*(\boldsymbol{h}_i)}{\boldsymbol{\gamma}_i^2 \boldsymbol{x}}$$

としている.  $\bar{t}_i$  の確率分布関数を  $T_i(\cdot)$  とすると

$$\min_{\mathbf{s. t.}} v$$

$$\mathbf{s. t.} T_i(z_i'(\mathbf{x})) \ge \bar{p}_i - v, \ i = 1, \dots, k$$

$$\mathbf{x} \in X$$

$$(14)$$

という等価な問題に置き換えられ, $T_i(\cdot)$  が単調連続増加であると仮定すると,

min 
$$v$$
  
s. t.  $z'_{i}(x) \ge T_{i}^{-1}(\bar{p}_{i} - v), i = 1,...,k$   $x \in X$  (15)

となる . このとき , 任意の基準確率  $\bar{p}_i,\ i=1,\dots,k$  に 対する問題 (15) の最適解は , 定義 1 で与えられた確 率最大化モデルにおける  $\mathbf{M}$ - $\alpha$ -パレート最適解になっ

ている.

次に (15) の解法について考える .(15) の制約式は非線形関数であり,線形計画法をそのまま適用することはできないが,v の値を固定することによって制約式は線形の関数となるため,2 段階シンプレックス法の第1段を適用することによって実行可能性を調べることができる.また, $\bar{p}_i,\ i=1,\dots,k$  の最大値を $\bar{p}_{max}$  とすると, $0 \le p_i(x) \le 1$  であるため,ミニマックス問題の最適解  $(v^*,x^*)$  に対して, $\bar{p}_{max}-1 \le v \le \bar{p}_{max}$ が成立する.そこで,v の値を 2 分法により離散的に変化させて制約式の実行可能解が存在する最小の v を求めればよい.したがって,意思決定者との対話によって満足解を得るアルゴリズムは次のようになる.

手順 1: 問題 (6) の各目的関数  $z_i(x)$  の個別の最小値  $z_{i,\min},\ i=1,\ldots,k$  を求める .

手順 2: 求められた個別の最小値  $z_{i,\min}$  に基づいて,意思決定者が主観的に問題 (6) の各目的関数に対するファジィ目標を特性付けるメンバシップ関数  $\mu_i,\ i=1,\dots,k$  を設定する.

手順 3: 初期の基準確率  $\bar{p}_i,\ i=1,\ldots,k$  を設定する (設定が困難な場合には理想点  $\bar{p}_i=1,\ i=1,\ldots,k$  に設定する).

手順 4: 設定された基準確率  $\bar{p}_i$  に対して,対応するミニマックス問題 (10) を解く.

手順 5: 得られた解と目的関数に対する確率を意思決定者に提示し,現在の解に満足なら終了.そうでなければ,意思決定者は現在の解と目的関数に対する確率を参考にして,主観的に基準確率  $\bar{p}_i$  を更新して手順 4 へ戻る.

#### 4. おわりに

本論文では,ファジィランダム多目的線形計画問題 に対して, 意思決定者の要求する問題の現実性の度 合いを考慮に入れるために , M- $\alpha$ -パレート最適性と 確率最大化モデルに基づく意思決定モデルを提案し、 対話型満足化手法の適用を通して,意思決定者が対話 を通じて自己の満足解導出するための手法を与えた. 本提案手法においては,対話過程の中で繰り返し解 く問題に対して従来の手法を適用することで大域的 最適解を得ることができるが,期待値最適化モデル や分散最小化モデルの場合には,対話において解く べき問題が非凸になることが予想され,一般に最適 解を得ることは困難になる.また,制約式にファジィ ランダム変数が含まれる場合には必ずしも本提案手 法をそのまま適用することはできない.したがって. 今後はヒューリスティックな手法を用いた解法の構築 や問題の制約式にファジィランダム変数が含まれる場 合の定式化について考察を行う予定である.

#### 参考文献

- [1] A. Charnes and W.W. Cooper, Deterministic equivalents for optimizing and satisficing under chance constraints, Operations Research, Vol.11, pp.18–39, 1963.
- [2] C.V. Negoita and M. Sularia, On fuzzy mathematical programming and tolerances in planning, Economical Computation and Economical Cybernetics Study Research, Vol. 1, pp. 3– 14, 1976.
- [3] M. Inuiguchi, and J. Ramik, Possibilistic linear programming: a brief review of fuzzy mathematical programming and a comparison with stochastic programming in portfolio selection problem, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 111, pp.3–28, 2000.
- [4] M. Sakawa, Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization, Plenum Press, New York, 1993.
- [5] M.L. Puri and D.A. Ralescu, Fuzzy random variables," Journal of Mathematical Analysis and Applications, Vol. 14, pp.409–422, 1986.
- [6] G.-Y. Wang and Z. Qiao, Linear programming with fuzzy random variable coefficients, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 57, pp.295–311, 1993.
- [7] M.K. Luhandjula and M.M. Gupta, On fuzzy stochastic optimization," Fuzzy Sets and Systems, vol. 81, pp.47–55, 1996.
- [8] H. Katagiri and H. Ishii, Linear programming problem with fuzzy random constraint, Mathematica Japonica, Vol. 52, pp.123–129, 2000.
- [9] H.-J. Zimmermann, Fuzzy programming and linear programming with several objective functions, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 1, pp. 45– 55, 1978.
- [10] A.P. Wierzbicki, The use of reference objectives in multiobjective optimization Theoretical implications and practical experiences, WP-79-66, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1979.

#### 問い合わせ先

**〒** 739-8527

広島県東広島市鏡山 1-4-1

広島大学大学院工学研究科複雑システム工学専攻 片桐 英樹

TEL: 0824-24-7701 FAX: 0824-24-7195

 $E ext{-mail: katagiri@msl.sys.hiroshima-u.ac.jp}$ 

## ファジィパラメータを含む多人数多目的計画問題に対 する対話型ファジィ意思決定

Interactive Fuzzy Decision Making for Multiple Decision Maker-Multiple Objective Programming Problems with Fuzzy Parameters

矢野均 (Hitoshi YANO)

名古屋市立大学人文社会学部 (School of Humanities and Social Sciences, Nagoya City University )

**Abstract**: This paper presents an interactive fuzzy decision making method for multiple decision makermultiple objective programming problems with fuzzy parameters to obtain their agreeable solution.

## 1 ファジィパラメータを含む多人数多目的計画問題の定式化

本稿では、p 人の意思決定者  $(\mathrm{DM}_i, i=1,\cdots,p)$  が、それぞれ、独自の選好構造に基づいて、互いに相競合する多目的関数  $f_j(\cdot), j=1,\cdots,k$  を最小化しようとする、ファジィパラメータを含む多人数多目的計画問題  $(\mathrm{MDMOP-FP})$  について考察する [2][1]。

[MDMOP-FP]

$$\mathrm{DM}_1: \quad \min \quad (f_1(\boldsymbol{x}, \tilde{\boldsymbol{a}}_1), \cdots, f_k(\boldsymbol{x}, \tilde{\boldsymbol{a}}_k))$$
 (1)

$$\mathrm{DM}_p: \quad \min \quad (f_1(\boldsymbol{x}, \tilde{\boldsymbol{a}}_1), \cdots, f_k(\boldsymbol{x}, \tilde{\boldsymbol{a}}_k))$$

subject to

$$\boldsymbol{x} \in X(\tilde{\boldsymbol{b}}) = \{ \boldsymbol{x} \in E^n \mid g_j(\boldsymbol{x}, \tilde{\boldsymbol{b}}_j) \le 0, \ j = 1, \cdots, m \}$$

 ${
m MDMOP-FP}$  に含まれるファジィパラメータに対して、lpha レベル集合の概念を導入する。

#### [定義 1]

 ${
m MDMOP-FP}$  のファジィパラメータのベクトル  $(\tilde{a}, \tilde{b})$  に対して、 $\alpha$  レベル集合を以下のように定義する。

$$L_{\alpha}(\tilde{\boldsymbol{a}}, \tilde{\boldsymbol{b}}) = \{(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}) \mid \mu_{\tilde{a}_{i\ell}}(a_{i\ell}) \geq \alpha, i = 1, \dots, k,$$

$$\ell = 1, \dots, r_i; \ \mu_{\tilde{b}_{j\ell}}(b_{j\ell}) \geq \alpha,$$

$$j = 1, \dots, m, \ell = 1, \dots, s_j\}$$

$$(2)$$

 $\alpha$  レベル集合  $L_{\alpha}(\tilde{\pmb{a}},\tilde{\pmb{b}})$  を用いれば、与えられた  $\alpha(0 \le \alpha \le 1)$  に対して、MDMOP-FP は、ファジィパラメータを含まない問題  $(\alpha{\rm -MDMOP})$  に変換することができる。

 $[\alpha - MDMOP]$ 

$$\mathrm{DM}_p$$
: min  $(f_1(\boldsymbol{x},\boldsymbol{a}_1),\cdots,f_k(\boldsymbol{x},\boldsymbol{a}_k))$ 

subject to

$$x \in X(b) = \{x \in E^n \mid g_i(x, b_i) \le 0, \ j = 1, \dots, m\}$$

$$(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}) \in L_{\alpha}(\tilde{\boldsymbol{a}}, \tilde{\boldsymbol{b}})$$

 $\alpha$ -MDMOP に対して、 $\alpha$  に依存した目的関数空間上のパレート最適解として、 $\alpha$ - パレート最適解を以下のように定義することができる。

#### [定義 2]

 $\alpha$ -MDMOP において、 $x*\in X(b*), (a*,b*)\in L_{\alpha}(\tilde{a},\tilde{b})$ が、(弱) $\alpha$ -パレート最適解および(弱) $\alpha$ レベル最適係数であるとは、

$$f_j(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}_j) \leq (<) f_j(\boldsymbol{x}^*, \boldsymbol{a}_j^*), j = 1, \cdots, k$$

なる  $m{x} \in X(m{b}), \ (m{a}, m{b}) \in L_{lpha}(\tilde{m{a}}, \tilde{m{b}})$  が存在しないことである。

以下では、すべての意思決定者は、 $\alpha$ - パレート最適解集合  $X_f^P(\alpha)$  の中から合意解を導出することに同意しているものと仮定する。また、各意思決定者は各目的関数に対してあいまいな目標を持ち、 $\mathrm{DM}_i$  の  $f_j(x,a_j)$  に対するファジィ目標は、メンバシップ関数

$$\mu_{ij}(\cdot) = \begin{cases} 1 & (f_j(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}_j) \leq \underline{f}_{ij} \text{ のとき}) \\ D_{ij}(\cdot) & (\underline{f}_{ij} \leq f_j(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}_j) \leq \bar{f}_{ij} \text{ のとき}) \\ 0 & (f_j(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}_j) \geq \bar{f}_{ij} \text{ のとき}) \end{cases}$$
(4)

により表されるものと仮定する。ここで、 $\underline{f}_{ij}, \bar{f}_{ij}, D_{ij}(\cdot)$ は、それぞれ、 $\mathrm{DM}_i$  の  $f_j(x,a_j)$  に対する十分満足な目的関数の最大値、受け入れることのできない目的関数の最小値、および、強意単調減少かつ連続な関数を表す。

このとき、 $\alpha-{
m MDMOP}$  は、各意思決定者が各自のメンバシップ関数を最大化する問題  $({
m F}\alpha-{
m MDMOP})$  に変換することができる。

 $[\mathbf{F}\alpha\mathbf{-MDMOP}]$ 

$$DM_1: \max (\mu_{11}(f_1(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}_1)), \cdots, \mu_{1k}(f_k(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}_k)))$$
 (5)

$$\mathrm{DM}_p: \max (\mu_{p1}(f_1(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}_1)), \cdots, \mu_{pk}(f_k(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}_k)))$$

subject to

$$x \in X(b), (a, b) \in L_{\alpha}(\tilde{a}, \tilde{b})$$

Fα-MDMOP に対しては、各意思決定者固有のメン バシップ関数空間上のパレート最適解として、(弱) $M\alpha$ -パレート最適解を以下のように定義することができる。 [定義 3]

が、i 番目の意思決定者  $\mathrm{DM}_i$  の(弱) $\mathrm{M} \alpha$ - パレート最 p 個の  $\mathrm{M} \alpha$ - パレート最適解(定理 1 より同時に  $\alpha$ - パ 適解および  $(弱) \alpha$  レベル最適係数であるとは、

$$\mu_{ij}(f_j(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}_j)) \le (<)\mu_{ij}(f_j(\boldsymbol{x}^*, \boldsymbol{a}_j^*)), j = 1, \cdots, k$$

なる  $x \in X(b), (a,b) \in L_{\alpha}(\tilde{a},\tilde{b})$  が存在しないことで ある。

 $F\alpha$ -MDMOP に対する  $DM_i, i = 1, \dots, p$  の (弱)  $M\alpha$ - パレート最適解集合  $X_i^P(\alpha)(X_i^{WP}(\alpha))$  と、  $\alpha$ -MDMOP に対する(弱) $\alpha$ - パレート最適解集合  $X_f^P(\alpha)(X_f^{WP}(\alpha))$  の間には、次の関係が成立する。 [定理1]

 $x^* \in X_i^P(\alpha)(X_i^{WP}(\alpha)), (a^*,b^*) \in L_{\alpha}(\tilde{a},\tilde{b})$  を対応 する (弱)  $\alpha$  レベル最適係数とする。このとき、もし、  $\underline{f}_{ij} \leq f_j(oldsymbol{x}*,oldsymbol{a}^*_j) \leq ar{f}_{ij}, j = 1,\cdots,k$  ならば、 $oldsymbol{x}* \in$  $X_f^P(\alpha)(X_f^{WP}(\alpha))$  で、 $(a*,b*) \in L_\alpha(\tilde{a},\tilde{b})$  は、対応す る(弱) $\alpha$ レベル最適係数となる。

各意思決定者の(弱) $M\alpha-$  パレート最適解の一つは、 次のマックスミニ問題1を解くことにより得られる。 [マックスミニ問題1]

$$\min_{\boldsymbol{x} \in X(\boldsymbol{b}), (\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}) \in L_{\alpha}(\tilde{\boldsymbol{a}}, \tilde{\boldsymbol{b}})} v \tag{6}$$

subject to

$$\mu_{ij}(f_j(\boldsymbol{x},\boldsymbol{a}_j)) \ge w_{ij}v, \ j=1,\cdots,k$$

ここで、 $w_{ij} \geq 0, j = 1, \dots, k$  は、 $DM_i$  の各メンバシッ プ関数間のバランスを表す重み係数で、本稿では、すべ ての意思決定者が対等である場合について考えるため、 以下のように正規化する。

$$\sum_{j=1}^{k} w_{ij} = 1, \ i = 1, \dots, p$$

マックスミニ問題 1 の最適解と  $\mathrm{DM}_i$  の  $\mathrm{M}\alpha$ - パレート 最適解の間には、次の関係が成立する。

#### [定理 2]

(1)  $({m x}*,{m a}*,{m b}*)$  が、ある重み係数  $w_{ij}\geq 0, j=1,\cdots,k$ に対するマックスミニ問題1の一意的な最適解ならば、 (x\*, a\*, b\*) は、 $\mathrm{DM}_i$  の  $\mathrm{M}\alpha-$  パレート最適解と対応す る  $\alpha$  レベル最適係数である。

(2) (x\*,a\*,b\*) が、 $DM_i$  の  $M\alpha-$  パレート最適解と 対応する  $\alpha$  レベル最適係数で、 $\mu_{ij}(f_j(\boldsymbol{x}*,\boldsymbol{a}_i^*)) > 0, j =$  $1, \dots, k$  ならば、(x\*, a\*, b\*) がマックスミニ問題 1 の 最適解となるような重み係数  $w_{ij} > 0, j = 1, \cdots, k$  が存 在する。

定理 2 より、すべての意思決定者  $DM_i$ ,  $i = 1, \dots, p$  が、 それぞれ、重み係数  $w_{ij} \geq 0, j = 1, \dots, k$  を主観的に設  $\mathrm{F}lpha-\mathrm{MDMOP}$  において、 $m{x}*\in X(m{b}*), (m{a}*,m{b}*)\in L_lpha( ilde{m{a}}, ilde{m{b}})$  定してマックスミニ問題 1 を解くことにより、対応する レート最適性を満たす)を求めることができる。しかし、  $\alpha-\mathrm{MDMOP}$  の最終目標は、 $\alpha-$  パレート最適性を満た しつつ、意思決定者  $\mathrm{DM}_i, i=1,\cdots,p$  が各メンバシップ 関数のバランスのみならず意思決定者間のバランスに配 慮した $\alpha$ レベル合意解を導出することである。各意思決 定者が主観的に設定した重み係数  $w_{ij} \geq 0, j=1,\cdots,k$ に配慮しつつ、すべての意思決定者を対等に取り扱う  $\alpha$ レベル合意解の候補集合を得る一つの手段として、以下 のマックスミニ問題2を解くことが考えられる。

[マックスミニ問題2]

$$\min_{\boldsymbol{x} \in X(\boldsymbol{b}), (\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}) \in L_{\alpha}(\tilde{\boldsymbol{a}}, \tilde{\boldsymbol{b}})} v \tag{7}$$

subject to

$$\mu_{\ell_j j}(f_j(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}_j)) \ge w_{\ell_j j} v, \ j = 1, \cdots, k$$

ここで、 $\ell_i \in \{1, 2, \dots, p\}, j = 1, \dots, k$  で、添え字集合

$$L = \{\ell_1, \ell_2, \cdots, \ell_k\}$$

(6) の組み合わせは、全部で  $p \times k$  個存在するので、 $p \times k$ 種類のマックスミニ問題2が考えられる。特に、添え字 集合 L が、それぞれ、

$$L_i = \{i, i, \dots, i\}, i = 1, \dots, k$$

のとき、マックスミニ問題 2 は、 $\mathrm{DM}_i$  の  $\mathrm{M}\alpha$ - パレート 最適解を求めるためのマックスミニ問題1と一致するこ とに注意しよう。 $p \times k$  個のマックスミニ問題 2 を解く ことは、k 個の目的関数に対する p 人の意思決定者のメ ンバシップ関数 ( $p \times k$  個)を対等に取り扱い、k 次元 メンバシップ関数空間上の  $p \times k$  種類の  $M\alpha-$  パレート 最適解を求めることに等しいと考えられる。

#### 2 対話型ファジィ意思決定手法

 $\alpha$ -MDMOP に対して、意思決定者  $DM_i$ ,  $i = 1, \dots, p$ が、それぞれ、各目的関数に対するファジィ目標をメ ンバシップ関数で規定した後、重み係数ベクトル  $oldsymbol{w}_i =$  $(w_{i1},\cdots,w_{ik}), i=1,\cdots,p$  を主観的に設定すると、対応

する  $p \times k$  個のマックスミニ問題 2 を解くことにより、 [Step 7] p imes k 個の合意解の候補が得られる。この際、p 人の意  $\alpha$   $\sim$  レベル不満足度ベクトルの値に考慮して、 $\alpha$   $\sim$  レベ ベル不満足度ベクトル  $u_{\alpha}(x,a,b)$  を以下のように定義  $t \leftarrow t+1$  として、次のステップに進む。 することができる。

$$u_{i\alpha}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}) = \left(\sum_{j=1}^{k} \left(1 - \mu_{ij}(f_j(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}_j))\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}, i = 1, \dots, p$$

$$\boldsymbol{u}_{\alpha}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}) = (u_{1\alpha}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}), \cdots, u_{k\alpha}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}))$$

 $\alpha$ - レベル不満足度  $u_{i\alpha}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{a},\boldsymbol{b}), i=1,\cdots,p$  は、 $\mathrm{DM}_i$  固 有のメンバシップ関数空間における合意解候補 (x,a,b)と理想点との距離を表しており、DMiの不満足度とし て解釈できる。以上より、MDMOP-FP に対して、(1)  $\alpha$  レベル値を更新することにより、問題に含まれるファ ジィパラメータの影響を考慮し、(2) 各意思決定者が それぞれ重み係数ベクトルを更新することにより、各メ ンバシップ関数間のバランスを考慮し、(3) マックス ミニ問題 2 を解くことにより、ある意味で公平な  $\alpha$  レ ベル合意解候補集合を生成し、(4) 各候補値に対して、  $\alpha$ - レベル不満足度ベクトルを計算することにより、合 意解かどうかの意思決定を支援する情報を提供するとい う、対話型アルゴリズムを以下のように構成することが できる。

[対話型アルゴリズム]

[Step 1]

意思決定者  $\mathrm{DM}_i$ ,  $i=1,\cdots,p$  が、それぞれ、各目的関 数  $f_i(\boldsymbol{x}, \tilde{\boldsymbol{a}}_i), j = 1, \dots, k$  に対するメンバシップ関数  $\mu_{ij}(f_i(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}_i))$  を設定する。

[Step 2]

初期  $\alpha$  レベル値を、 $\alpha = 1$  とする。

繰り返し係数  $t=1,\alpha-$  レベル合意解候補集合  $X_0(\alpha)=\phi$ とする。

[Step 4]

初期重み係数ベクトル  $(w_{i1},\cdots,w_{ik})=(\frac{1}{k},\cdots,\frac{1}{k}), i=$  $1, \dots, p$  とする。

[Step 5]

設定された重み係数ベクトルに対して、 $p \times k$  個のマッ クスミニ問題 2 を解き、対応する  $\alpha-$  レベル合意解候補 集合  $X_t(\alpha)$  を求め、その各要素  $(x, a, b) \in X_t(\alpha)$  に対 して、lpha レベル不満足度ベクトル  $oldsymbol{u}_{lpha}(oldsymbol{x},oldsymbol{a},oldsymbol{b})$  を計算 する。

[Step 6]

 $X_0(\alpha) \leftarrow X_0(\alpha) \cup X_t(\alpha)$  として、 $\alpha$ - レベル合意解候 補集合を追加・更新する。

思決定者が合意しうるかどうかの有効な情報の一つとし ル合意解候補集合  $X_0(lpha)$  の中から合意解が見つかり、か て、合意解候補 (x,a,b) に対する、意思決定者の  $\alpha$  -  $\nu$  つ、 $\alpha$  の値にも満足であれば終了する。そうでなければ、

#### [Step 8]

意思決定者  $\mathrm{DM}_i, i=1,\cdots,p$  は、次のどちらかを選択 する。(1) 各意思決定者がそれぞれ重み係数ベクトル  $w_i = (w_{i1}, \dots, w_{ik})$  を更新して、Step5へ戻る。 (2) 全 意思決定者が合意のうえ、 $\alpha(0 \le \alpha \le 1)$  の値を更新し て、Step3へ戻る。

#### 参考文献

- [1] P.Prodanovic and S.P.Simonovic, "Fuzzy Compromise Programming for Group Decision Making" IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A Vol.33, 2003, pp 358-365.
- [2] M.Sakawa, Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization, Plenum Press, 1993.

#### 連絡先:

〒 467-8501 名古屋市瑞穂区瑞穂町山の畑1 名古屋市立大学人文社会学部 矢野均

FAX: 052-872-1531

Email: yano@hum.nagoya-cu.ac.jp

### 感性評価モデルにおける自己組織化マップの有効性

Usefulness of Self-Organizing Maps to Kansei Evaluation Model

福岡 健輔 Kensuke Fukuoka 大藪 又茂 Matashige Oyabu

金沢工業大学 システム設計工学専攻

Kanazawa Institute of Technology, Systems Design Engineering

**Abstract:** In this study *Kansei* evaluation model was developed by Self-Organizing Maps. This model is numerical system to evaluate human feeling when people see goods like clothes. The procedure was described. The evaluation was improved when it was compared with the conventional one. The application was also shown here.

#### 1. はじめに

商品デザインと感性との関係を定量化することによ り、感性を予測する感性評価モデルの研究が盛んにな ってきている.一般に感性評価モデルの作成のために は,数量化理論 I 類が用いられることが多い[1].しか しながら , 数量化理論 I 類では質的データのみを扱う ため,特徴量の表現が制限される.例えば,大きさ(面 積)や色(色相)などの量的データで表される連続し た数値は,カテゴリー分割によっていくつかの項目に 分けられ,0と1の説明的なデータに換えられてしま う. そこで立命館大学の亀井, 小松らは数量化理論 類にメンバシップ関数を導入し,特徴の曖昧性を表現 することに成功し,ハンカチのデザインについての感 性評価モデルを構築した[2]. 我々は, 亀井らの研究に ヒントを得て,ハンカチデザインについて自己組織化 マップ(Self-Organizing Maps; SOM)を用いた感性評 価モデルを提案し、その有効性を示した[3,4].本研究 においては,まず自己組織化マップによる感性評価モ デル作成の一般論を述べ, つぎに実試料への適用をお こない, 従来法である数量化理論 I 類の結果と予測精 度を比較した.

#### 2. 自己組織化マップによるモデル作成

まず一般的な感性評価モデルの作成法について述べ る.ある商品(例えば洋服とかハンカチ)について, 顧客がどのような感性を持つか予測するモデルの作成 を例にとる.モデル作成のために,多数の洋服のデザ インについてのデータベースが必要である、そのデー タベースとは,複数の被験者からのアンケート調査に よる、それぞれの生地についての感性(例えば、派手 とか地味とか)のデータである.感性評価モデルとは, このデータベースに基づき、未知試料に対しての顧客 の感性を予測するためのモデルである .「派手」とか 「地味」とかいう感性は本来,量的には表現できない が、「派手」-「地味」といった反対の意味を持つ形容 詞対を導入することにより,量的な変数に変換する. また感性とは独立して,服そのものが持つ客観的なデ −タが存在する.例えば 、「明度 」 、「色相 」 、「柄 」 、「大 きさ」といった属性である.これらの属性は,量的な 変数であったり質的な変数であったりする.感性評価 モデルは , 多変量解析の立場で言えば , 客観的な説明 変数により目的変数 (感性)を予測する回帰分析の範

疇に属する.一般に,服の例で明らかなように,説明変数には量的変数と質的変数が混在する.そのため量的変数を質的変数に変換し,全ての変数を質的データに変換した後,数量化理論 I 類に適用する.数量化理論 I 類は,説明変数が全て量的変数である線形重回帰分析に相当している.数量化理論 I 類では,量的データ(アイテム)をある意味では犠牲にして,カテゴリー分割して 0 と 1 に変換しなければならないので,その過程で有用な情報が失われてしまう可能性も考えられる.亀井らがメンバシップ関数を導入したのはこのためである[2].一方 SOM を感性評価モデルに適用する最大の利点は,量的データとカテゴリー分割された質的データの両方を同じように扱えることである.

つぎに SOM による感性評価モデルの作成法について述べる . 基本的には「感性」と「客観的説明変数」の間の非線形な関係を SOM により表現する . 例として「暖かい」-「涼しい」という感性と色相との関係を模式的に図1に示す . 図1は SOM の形成を模式的に示すために描いたもので , 計算値でも実験値でもない . 大きな は SOM のノードを表している . この模式図では , 色相の値と観測された感性評価値がプロットされており , 試料毎の感性と色相の分布が , 一次元SOM の 9 個のノードにより表現されている . この場合の一次元 SOM は , 色相と感性評価値の二次元の入力データから形成されることになる . 未知試料の色相値が計算できれば , その値を SOM に入力し , ベストマッチノードから感性を予測できる . これが SOM による感性評価モデルの原理である .

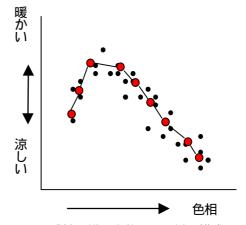


図1 感性と説明変数との関係(模式図)

SOM によるモデルと数量化理論 I 類によるモデルとを以下に比較する .

数量化理論 I 類は線形回帰モデルだが , SOM は 非線形モデルである .

数量化理論 I 類は , 入力データの最大 最小範囲から外れたデータに対しても感性値を線形的に予測できる .

SOM は,入力データの密度分布を表現するので,入力データ分布から外れたデータに対する感性値の予測精度が低下する.

SOM ではさらに以下の特徴を期待できる.

特徴の曖昧性を損なわない数値化 カテゴリー分割による恣意性の排除 感性評価モデルとしての使用範囲の拡大

SOM は、様々な分野で予測問題に適用されている.一般の予測問題と感性評価モデルの違いのひとつは,モデル作成のために使用した試料数に比べ,予測されるべき未知試料数がはるかに多い場合があり得ることである.例えば布地をコンピュータでデザインすれば,数万,数百万の画像を得ることができる.しかし,モデルの作成には被験者を使った感性評価実験が必要なため,試料数は限られる.すなわち,上記のの問題が生じる.この問題を避けるためには,評価実験に使用する試料の説明変数の分布をなるべく広くとっておく必要がある.また被予測未知試料が SOM 作成用の既知試料に比べて多数になるため,予測精度との兼ね合いもあるが,SOM のノード数を既知試料よりも多くとる必要がある.

説明変数(客観的データ)と実験で得られた感性評価値を用いて SOM を作成する訳であるが,すべての次元のデータが同じ程度の重要性を持っているわけではない.例えば,「暖かい」・「涼しい」の感性には,赤色の画素数が大きく影響している.それぞれの感性に対してのこれらの寄与を考慮した重み付けを各次元に対して行うと,精度の高いモデルを作成できる.数量化理論 I 類では,この重み付けを含めたモデルが自動的に形成されるが,SOM では前処理として別途考慮する必要がある.この重み付けの各次元への順序は,感性評価値(実験値)と各次元との相関をとれば明らかになる.我々は,以下のような重み付けの式を提案している[3,4].

$$w = \frac{|r|}{1 - |r|} \cdots (1)$$

ここでr は相関係数である.w の重み付けにより, 感性と各次元のデータとの定量的な対応関係が保たれ, 予測精度の高N SOM の形成に寄与するものと考えられる.

#### 3. 結果と考察

前報[3,4]で取り上げたハンカチデザインの感性評価 モデルについて,精度比較の結果を図2に示す.重み 付けなしSOMと数量化理論I類の比較では,検定の

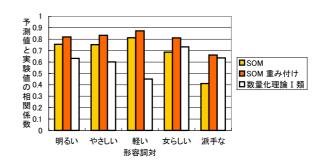


図2 予測精度の比較

結果差はみられなかったが, 重み付け SOM は有意な精度の向上が認められた. 重み付けの必要性と有効性が示されている.

予測精度の向上と SOM の状態には,密接な関係がある. SOM を用いたモデルの根本的な問題は,SOM 上での配置において,感性(目的変数)の配置(分布)と多次元数値データ(説明変数)群との配置が一致している必要があることである.各次元への重み付けは,そのためのステップであると考えている.精度の向上した SOM において,感性の配置(分布)が安定したクラスタリングを形成することを本研究では確認した.最後に,形容詞対の選択であるが,被験者間で意見の一致をみやすい項目でなければならないことは言うまでもない.我々は被験者総当たりの相関係数の平均値で0.5以上の形容詞対についてモデルを作成した.

#### 参考文献

- [1] 長沢伸也, "感性をめぐる商品開発 その方法と実際", 日本出版サービス, 2002.
- [2] 小松由香, 亀井且有, "感性工学にもとづくハンカチデザインの評価",

電学論 C, 117 巻 7 号, pp.934-939, 1997.

- [3] 福岡健輔, 大藪又茂, "自己組織化マップによる感性評価モデルの作成", 第 19 回ファジィシンポジウム講演論文集, pp.55-58, 2003.
- [4] Kensuke Fukuoka, Oyabu Matashige, "Kansei Evaluation Model Developed by Self-Organizing Map", Workshop on Self-Organizing Maps, Proceedings, pp.150-154, 2003.

#### 連絡先:

大藪 又茂

金沢工業大学

〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1 Phone 076-244-2389

E-mail ovabu@neptune.kanazawa-it.ac.jp

#### 地方自治における予算配分への自己組織化マップの応用

- 年齢階級別人口構成比による一考察 -

## An application of SOM to budget for the local government :a study of age-classified population ratio

坂井 優 Yu Sakai (psdc1003@ksc.kwansei.ac.jp) 関西学院大学総合政策研究科 曽山典子 Noriko Soyama (soyama@sta.tenri-u.ac.jp) 天理大学人間学部

#### 1.はじめに

地方分権のもと、都道府県や市町村による独自 予算の幅が広がり、市町村の特徴を考慮した予算 配分を行うことが可能になった。予算を立てる上 で地域住民の要望を判断材料とした場合、計画し た予算が妥当なものであるかを検討するため、他 の市町村との比較などを行うことが必要であると 考える。

本研究では、市町村レベルで予算案を考える際に、他との比較を行う 1 つの指標として年齢階級別人口構成比を用いる事にする。長期的な政策に対しては、将来人口を推計し、時系列的な分析を行う事が必要である。自己組織化マップを使って将来人口推計データを処理し、各市町村の人口構成を分析する。

#### 2. 研究背景

地方分権のもとで地方の行財政を地域の住民に ゆだね、住民の意思と責任で自主的に処理できる 地方自治の体制が整ってきた。これにともない都 道府県および市町村による独自予算の幅が広がり、 市町村の特徴を考慮した予算配分を行うことが可 能になった。例えば、年齢階級別人口構成比を各 市町村の特徴を示す一つの指標とした場合、高齢 者が多く住む市町村であれば、高齢者福祉予算の 請求に重点を置き、年少人口比率が高いならば、 学校教育関連の予算を多く見積もる必要がある。 このように高齢者福祉予算や教育予算などは人口 の年齢別構成が予算計画の判断材料となり得る。 また、福祉関係予算における高齢者介護保険事業 費など、単年度で計画を遂行できる費目であれば 単年度の分析結果を利用するだけでよいが、老人 ホームなどの公共施設を建設するような公共投資

には長期間にわたる償却を考慮する必要がある。 長期間の予算を立てる場合は、将来人口の構成な どを判断材料とし、計画を立てる必要がある。

各市町村単位で計画した予算配分が妥当なものであるかの評価見直しを行う時、属している都道府県レベルより、全国の市町村との比較検討を行う方が有効である。しかし、当市町村の人口構成が全国レベルでどのような市町村と類似しているのかなどを知るために、全市町村の人口構成のデータを手作業で処理することは多大な労力を必要することは否めない。

我々はこのような目的のためにデータを処理する際、自己組織化マップ(SOM)による分析が有効であると考える。本研究では、SOMを用いて、兵庫県の将来推計人口の年齢階級別人口構成比データをグルーピングし、長期間にわたる兵庫県内各市町の人口構成の特徴を調べる。

#### 3 . SOM による分析

#### 3 - 1 . データ

兵庫県内の各市町村の人口構成の特徴を調べるため、兵庫県統計書にまとめられた国勢調査(2000年)のデータ(年齢階級別人口)を使用する。人口規模を均一化させるため、データは各市町村の年齢階級別人口構成比とする。各市町村の将来人口は、『市町村の将来人口』などで推計されるコーホート変化率法」を用い、2005年から2030年までを推計したデータを使用する。

<sup>1</sup> 全ての市町村において、1995年から 2000年までの 5年間における男女年齢 5歳階級別死亡と人口の移動の動向及び、2000年における出生率の水準が将来も同様に持続すると仮定して推計を行う。

#### 3 - 2 . Standard Data

**2000** 年のデータが国勢調査による最新の実測値であるため、これを Standard data と決める。 Standard data を SOM で処理した結果を図 1 に示す。



図 1 Standard data (2000年)人口構成比によるマップ

図2は、各クラスタに属する市町村の年齢階級別人口構成比の平均値をグラフで示したものである。年齢階級別人口構成比の平均値からみた各クラスタの特徴は次の通りである(15歳未満の人口を「年少人口」、15~64歳までの人口を「生産者年齢人口」、65歳以上の人口を「高齢者人口」と呼ぶことにする)。

クラスタ 1 (C1): 生産者年齢人口 (特に 15~39 歳の人口) 比率が最も低く、高 齢者人口比率が最も高い。

クラスタ 2 (C2): クラスタ 1 に次いで高齢者人口 比率が高い。

クラスタ 3 (C3): 生産者年齢人口 (50~65 歳の 高齢者に最も近い年齢人口)比 率が最も高い。

クラスタ 4 (C4): 生産者年齢人口 (特に 40 歳未 満の人口) 比率が高い。

クラスタ 5 (C5): 生産者年齢人口(特に 20~40 歳の人口)比率が最も高く、高 齢者人口比率は低い。

クラスタ 6 (C6): 年少人口 (5~15歳) 比率、生産者年齢人口 (35~49歳) の 比率が最も高く、近い将来高齢者人口にシフトする年代55~ 80歳の比率が最も低い。

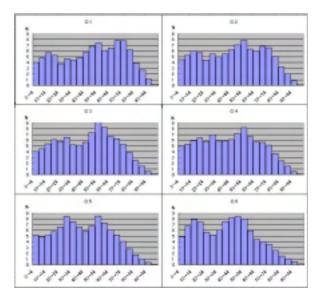


図 2 クラスタごとの年齢別人口構成比の平均値 (2000 年 Standard data)

#### 3-3.将来人口推計データによる分析

SOM で Standard Data (2000 年)を処理した 結果(図1)を基準とし、各市町村の将来推計人口 (2005 年から 2030 年)の各データがどのクラス 夕に属するかを調べる。

処理手順は次の通りである。

(1) Standard Data(2000年)を基にコーホート 変化率法を用いて、2005~2030年(5年間隔) の将来人口の年齢階級別構成比データを作成 する。

(2)推計された 2005 ~ 2030 年の 5 年毎の年齢 階級別人口構成比データを Standard data を SOM で処理した結果(図1)に挿入し、適合 するノードを探る。

表 1 は、各市町村の将来人口推計データ(2005 ~ 2030 年)と Standard data (2000 年) がどの クラスタに属しているかを示したものである。

2030年には全体の8割の市町がクラスタ1(C1)に属しており、クラスタ5(C5)、クラスタ6(C6)に属する市町はなくなる。この結果は、兵庫県の人口高齢化を示しており、中高年の人口が高齢化し、新生児の出生率が極めて低い事を意味する。福祉政策に重点をおいている現行の国家政策や、各都道府県の政策が概ね妥当である事がわかる。

兵庫県の市町村別に見たとき、吉川町と滝野町 のみ2030年においてもクラスタ4に位置している。

表 1 2000-2030 年クラスタ推移全パターン

	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2025年	2030年
大屋町 但東町 美方町	C1						
(津)一宮町 温泉町 佐用町 三日月町 山東町 上月町 生野町 村岡町 朝来町 波賀町 北淡町 養父町	C1						
城崎町 淡路町	C1						
西淡町 南淡町 南光町	C1						
関宮町	C2	C1	C1	C1	C1	C1	C1
(宍)一宮町 加美町 黒田庄町 三原町 市川町 洲本市 春日町 青垣町 大河内町 竹野町 津名町 東浦町 東条町 八鹿町 氷上町 浜坂町	C2	C1	C1	C1	C1	C1	C1
相生市	C3	C1	C1	C1	C1	C1	C1
御津町 上郡町	C3	C1	C1	C1	C1	C1	C1
五色町 千種町 中町 八千代町	C2	C2	C1	C1	C1	C1	C1
山南町 市島町 出石町 日高町	C2	C2	C1	C1	C1	C1	C1
香住町	C6	C2	C1	C1	C1	C1	C1
香寺町 三木市	C3	C3	C1	C1	C1	C1	C1
猪名川町 夢前町	C6	C3	C1	C1	C1	C1	C1
西脇市	C2	C2	C2	C1	C1	C1	C1
山崎町 篠山市 和田山町	C2	C2	C2	C1	C1	C1	C1
福崎町	C3	C2	C2	C1	C1	C1	C1
芦屋市	C5	C2	C2	C1	C1	C1	C1
安富町 神崎町	C6	C2	C2	C1	C1	C1	C1
豊岡市	C2	C2	C2	C2	C1	C1	C1
揖保川町	C3	C2	C2	C2	C1	C1	C1
加西市	C4	C2	C2	C2	C1	C1	C1
神戸市 尼崎市	C5	C2	C2	C2	C1	C1	C1
新宮町	C3	C3	C1	C2	C2	C1	C1
龍野市	C5	C2	C2	C2	C2	C1	C1
稲美町	C3	C3	C2	C2	C2	C1	C1
高砂市 播磨町	C6	C5	C2	C2	C2	C1	C1
宝塚市	C5	C5	C2	C6	C2	C1	C1
川西市	C5	C2	C2	C6	C6	C1	C1
伊丹市 明石市	C5	C5	C2	C6	C6	C1	C1
赤穂市	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C1
<u>社町</u>	C5	C5	C2	C2	C2	C2	C1
小野市	C5	C2	C2	C6	C6	C2	C1
姫路市	C5	C5	C2	C6	C6	C2	C1
太子町	C5	C5	C2	C6	C6	C2	C1
加古川市	C6	C5	C2	C6	C6	C2	C1
西宮市	C5	C5	C2	C6	C6	C6	C1
柏原町	C5	C2	C2	C2	C2	C2	C2
緑町	C2	C2	C2	C2	C6	C2	C2
家島町	C5	C5	C2	C2	C6	C6	C2
<b>滝野町</b>	C5	C5	C5	C6	C6	C6	C2
三田市	C6	C6	C6	C2	C2	C6	C6
吉川町	C6						

吉川町は2000年~2005年までクラスタ2に属しているが、2010~2025年まではクラスタ6に位置している。つまり、SOMの結果からは現在より、将来の方が人口の高齢化が見られないことになる。兵庫県および、吉川町が公表している情報(吉川町 HP)では、吉川町の高齢化率は、非常に高くなると予測している。SOMによる結果と異なる理由は将来人口の推計方法によると考える。今回、使用した将来人口推計方法では、2000年の時点での15歳~49歳の女性の人口と0~4歳の人口により出生率を定め、出産数を決定している。吉川町は総人口自体が少ないため、1人の比重が大都市に比べて高くなっており、このデータに依存するその以降の年度のデータも出生数の割合が高くなっている。

滝野町は、2005年に社町、東条町と合併し、加東市となる事が決まっている。社町と東条町は

SOM の結果からは高齢化が進む町となっている。 これら3つの町の2005年以降の人口を合計したも のを加東市の人口とし、SOMを使って同様に人口 推移を調べた結果が表2である。

表 2 2005-2030 年加東市のクラスタ推移

2005年	2010年	2015年	2020年	2025年	2030年
C5	C4	C2	C2	C2	C2

3つの町の中で最も高齢化が早く進む東条町は 合併することによって、急速な高齢化は若干緩和 されることがわかる。

#### 4 . 手計算による人口構成の分析

ここでは、各市町村の高齢化の特徴を手計算で

分析した結果を述べる。2000年に高齢者比率が最も高いとされる美方町の37.2%から、最も低いとされる三田市の11.7%の範囲を6等分し、これをグルーピングするための基準とする(各値は表3参照)。2005年以降のデータにおいては、高齢化比率が37.2%を上回ったものはグループ1、11.7%を下回ったものはグループ6とする。

表4は、高齢化比率による推移をグループで表している。2030年に向かって最も高齢化比率の高

いグループに位置する市町は全体の 45%を占める。 高齢化比率が低く若年齢層の比率が高いとされる 滝野町や吉川町についても、SOM による結果と同 様の結果が確認された。SOM の結果と顕著に異な ったのは西宮市で、高齢化比率が若干緩慢に進む グループに所属している。

グルーピングの基準を高齢化比率とし、手計算 した結果も概ね SOM と同じ結果となったが、より 詳細な人口構成の特徴を分析するには、手計算で

表 4 2000-2030 年 高齢化比率 6 区分によるグループ推移パターン

	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2025年	2030年
美方町 大屋町	G 1	G1	G1	G 1	G 1	G 1	G 1
但東町	G 2	G 1	G 1	G 1	G 1	G 1	G 1
村岡町	G 2	G 1	G 1	G 1	G 1	G 1	G 1
朝来町	G 2	G 1	G 1	G 1	G 1	G 1	G 1
三日月町 北淡町 (津)一宮町	G 2	G 2	G 1	G 1	G 1	G 1	G 1
波賀町	G 3	G 2	G 1	G 1	G 1	G 1	G 1
佐用町 上月町 温泉町 関宮町	G 2	G 2	G 2	G 1	G 1	G 1	G 1
南光町 城崎町 竹野町 八鹿町							
生野町 春日町 淡路町	G 3	G 2	G 2	G 1	G 1	G 1	G 1
大河内町	G 3	G 3	G 2	G 1	G 1	G 1	G 1
相生市	G 4	G 3	G 2	G 1	G 1	G 1	G 1
千種町	G 2	G 2	G 2	G 2	G 1	G 1	G 1
青垣町	G 3	G 3	G 2	G 2	G 1	G 1	G 1
(宍)一宮町 浜坂町 南淡町	G 3	G 3	G 2	G 2	G 1	G 1	G 1
東条町 西淡町	G 4	G 3	G 3	G 2	G 1	G 1	G 1
三原町	G 4	G 3	G 3	G 2	G 1	G 1	G 1
三木市 御津町	G 5	G 4	G 3	G 2	G 1	G 1	G 1
山南町	G 3	G 3	G 3	G 2	G 2	G 1	G 1
八千代町	G 4	G 3	G 3	G 2	G 2	G 1	G 1
夢前町	G 5	G 5	G 4	G 3	G 2	G 1	G 1
中町 香住町	G 4	G 3	G 3	G 2	G 2	G 2	G 1
黒田庄町 上郡町	G 4	G 4	G 3	G 2	G 2	G 2	G 1
市川町	G 4	G 4	G 3	G 3	G 2	G 2	G 1
養父町	G 2	G 2	G 2	G 2	G 2	G 2	G 2
山東町	G 3	G 2	G 2	G 2	G 2	G 2	G 2
日高町 市島町 津名町	G 3	G 3	G 3	G 2	G 2	G 2	G 2
加美町 氷上町	G 4	G 3	G 3	G 2	G 2	G 2	G 2
洲本市	G 4	G 4	G 3	G 2	G 2	G 2	G 2
東浦町	G 3	G 3	G 3	G 3	G 2	G 2	G 2
神 崎 町	G 4	G 3	G 3	G 3	G 2	G 2	G 2
西脇市	G 4	G 4	G 3	G 3	G 2	G 2	G 2
山 崎 町	G 4	G 4	G 4	G 3	G 2	G 2	G 2
安富町	G 5	G 4	G 4	G 3	G 2	G 2	G 2
尼崎市	G 5	G 5	G 4	G 3	G 2	G 2	G 2
猪 名 川 町 香 寺 町	G 6	G 5	G 4	G 3	G 2	G 2	G 2
豊 岡 市	G 4	G 4	G 4	G 3	G 3	G 2	G 2
福 崎 町	G 5	G 4	G 4	G 3	G 3	G 2	G 2
揖 保 川 町	G 5	G 5	G 4	G 3	G 3	G 2	G 2
加 西 市	G 5	G 4	G 4	G 3	G 3	G 3	G 2
芦屋市	G 5	G 4	G 4	G 3	G 3	G 3	G 2
五色町	G 3	G 3	G 3	G 3	G 3	G 3	G 3
篠山市 出石町	G 4	G 3	G 3	G 3	G 3	G 3	G 3
和田山町	G 4	G 4	G 4	G 3	G 3	G 3	G 3
赤穂市新宮町	G 5	G 4	G 4	G 3	G 3	G 3	G 3
龍野市	G 5	G 5	G 4	G 3	G 3	G 3	G 3
神戸市	G 5	G 5	G 4	G 3	G 3	G 3	G 3
高砂市 稲美町 播磨町	G 6	G 5	G 4	G 3	G 3	G 3	G 3
小野市	G 5	G 5	G 4	G 4	G 3	G 3	G 3
宝塚市	G 6	G 5	G 4	G 4	G 3	G 3	G 3
<u>太子町</u>	G 6	G 6	G 5	G 4	G 3	G 3	G 3
社町	G 5	G 5	G 5	G 4	G 4	G 3	G 3
伊丹市	G 6	G 5	G 5	G 4	G 4	G 3	G 3
明 石 市	G 6	G 5	G 5	G 4	G 4	G 4	G 3
川西市	G 5	G 5	G 4	G 3	G 3	G 4	G 4
緑町	G 4	G 4	G 4	G 4	G 4	G 4	G 4
姫路市	G 6	G 5	G 4	G 4	G 4	G 4	G 4
柏原町	G 5	G 5	G 5	G 4	G 4	G 4	G 4
家島町	G 6	G 5	G 5	G 4	G 4	G 4	G 4
<u> </u>	G 6	G 6	G 5	G 4	G 4	G 4	G 4
三田市	G 6	G 6	G 6	G 5	G 5	G 4	G 4
滝 野 町	G 5	G 5	G 5	G 5	G 5	G 5	G 5
西宮市	G 6	G 5	G 5	G 5	G 5	G 5	G 5
吉川 町	G 4	G 5	G 5	G 5	G 6	G 6	G 6

は扱うデータが多くなると扱いづらくなる。 長期間の 5 歳区分のすべての年齢階級を使って詳細な分析を行うような場合には、SOM による分析の方が適していると考える。

#### 表3 グループの最大値・最小値

高齢化比率(%)	最大値	最小値
グループ1 (G1)	37.2	33.0
グループ2 (G2)	32.9	28.8
グループ3 (G3)	28.7	24.5
グループ 4 (G4)	24.4	20.3
グループ 5 (G5)	20.2	16.0
グループ 6 (G6)	15.9	11.7

#### 5. おわりに

本研究では、SOM を用いて兵庫県内全市町の将来推計人口のデータを処理し、長期にわたる各市町村の人口構成の推移パターンとその特徴を考察した。また高齢化比率をグルーピングの基準とし、手計算による分析も試みた。その結果、概ね双方とも同じ結果となり、高齢化についての分析においては、SOM による分析結果は信頼できると判断する。また長期にわたる 5 歳区分のすべての年齢階級を使う詳細な分析を行う場合には、SOM の方が手計算より有効であると考える。

本研究で用いたモデルは人口データのみを利用したシンプルなものであり、全国の市町村データを用いた場合でも適用することが可能である。地方自治の上で独自の政策を立てる場合、各市町村が属する都道府県単位ではなく、全国レベルで当該市町村の特徴を把握する事は有効であると考える。今後は、さらに進展する市町村合併なども視野に入れ、財政データも分類に利用した分析方法を考えていきたい。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を賜り、大変 有益なコメントを頂いた、柴田愛子先生、村上芳 夫先生に感謝の意を表します。

本研究は、科学研究費(基盤研究(C) 13630117) の補助を受けた。

#### 参考文献

- [1]香西泰『21 世紀への経済政策』 日本経済新聞社 1995.
- [2]統計情報研究開発センター『市町村の将来人口』 日本統計協会 2002.
- [3]徳高平蔵他監修『自己組織化マップ応用事例集』 海文堂出版 2002.
- [4]原田尚彦『新版地方自治の法としくみ』 学陽書房 2003.
- [5]増井喜一郎編『図説日本の財政 各年度版』 東洋経済新報社
- [6]吉村弘『最適都市規模と市町村合併』 東洋経済新報社 1999.
- [7]兵庫県ホームページ

http://pref.hyogo.jp/ (2004年3月15日現在)

[8]吉川町ホームページ

http://www.town.yokawa.hyogo.jp/

兵庫県加東郡のホームページ

[9]滝野町ホームページ

http://www.town.takino.hyogo.jp/

[10]東条町ホームページ

http://www.town.tojo.hyogo.jp/

[11]社町ホームページ

http://www.town.yashiro.hyogo.jp/ (ホームページは全て 2004 年 3 月 15 日現在)

#### データ

兵庫県統計課『兵庫県統計書』各年度版

#### 連絡先

**〒669** 1337

兵庫県三田市学園2 1

関西学院大学 総合政策研究科

坂井 優

E-mail: psdc1003@ksc.kwansei.ac.jp

### Matlab 版球面自己組織化マップパッケージの提案とベータ版の試作

Program Package of Spherical Self-Organizing Maps on Matlab and its Beta Version

#### 增田 和広,中塚 大輔(\*),藤村 喜久郎,徳高 平蔵,大藪 又茂(\*),大北 正昭

Kazuhiro Masuda, Daisuke Nakatsuka, Kikuo Fujimura, Heizo Tokutaka,

Matashige Ohyabu and Masaaki Ohkita

#### 鳥取大学工学部 電気電子工学科

Department of Electrical and Electronic Engineering, Tottori University

#### (\*) 金沢工業大学 工学部 人間情報工学科

(\*) Kanazawa Institute of Technology

Abstract The preparation of the general-purpose package software of the spherical surface self-organization map was tried. Because three-dimensional graphic indication becomes necessary, it is developed with spherical surface self-organization map by the business software "Matlab" of the The Mathworks company which carries it in the standard.

#### 1 はじめに

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

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

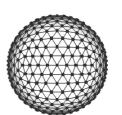
本論文では、一般にはあまり取り上げられることが少ない球面自己組織化マップを普及させるために汎用のパッケージソフトウェアの作成を試みた、球面自己組織化マップでは三次元のグラフィック表示が必要となるために標準でそれを搭載している The Mathworks 社の商用ソフトウェア「 Matlab 」上で開発する、またベータ版の試作品の実演と紹介を実施する。

#### 2 球面自己組織化マップ

球面自己組織化マップは自己組織化マップのユニットを従来の2次元の長方形に並べたものではなく球面上に並べたものである.球面にユニットを並べる場合,図1に示す2種類の位相近傍が考えられる.ここで用いる球面自己組織化マップは(b)のドーム型を用いる.球面自己組織化マップについての細部に関しては大藪らの論文を参照していただきたい.図2にマイクロソフトWindows



(a) 地球儀型



(b) 測地線ドーム型

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

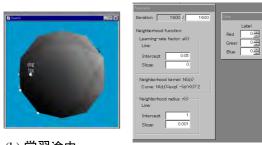
版球面自己組織化マップのソフトウェアを示す. 本ソフトウェアのマイクロソフト Windows 版は金沢工業大学で開発された.

#### 3 Matlab 版のベータ版の作成

球面 SOM のパッケージソフトウェアを作成するのに Matlab を用いた . その主な理由はそれが行列演算を得

De la company de

(a) 球面SOMのWindows版ソフトウェア



(b) 学習途中

(c) パラメータWindow

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

意とし、グラフィック表示も容易にできるからである.また多くの工業系大学で Matlab が広く普及している点とパソコンやワークステーションなどのプラットフォームを選ばないという点で完成品の利用拡大のために有利であると思われたからである.また,ソースコードは機械語で無く,Matlab の独自原語で書かれており,機能の追加などの際にコンパイル作業が発生しない点は非常に便利である.その結果,煩雑なプログラミング作業をおこなわなくても Matlab の言語を学べば,プログラムの専門家以外でも本来の機能拡張をおこなうことが可能である.

図3に開発中の球面自己組織化マップのツール「SSOM Toolbox」のパラメータ入力インターフェース部の画面イメージを示す.



図 3: 球面自己組織化マップの Matlab 版のインターフェース部.

#### 3.1 球面 SOM ツールの機能

「SSOM Toolbox」にはデータを球面で学習し、その学習結果である球面マップや要素ごとの球面マップを表示することができる.また学習のパラメータ設定にはトレーニング回数や学習率係数 の初期値,ノード数を設定でき、マップ表示では球面マップをマウスを動かすだけで自由に回転することもできる.またこれらの機能はユーザーが使いやすいようインターフェイス上で行えるようにした.図3にそのインターフェイス画面を示す.

#### 3.2 動物マップの作成例

本例では文献 [4] の第3章に掲載されている表3.4の13属性のデータをそのまま使用する.図4に学習結果のマップ表示の例を示す.同図は楕円に見えるが,これは球面をみる注視位置の設定が不適切であるために発生している.注視位置を変更すると球面に見える.この球面はマウスで回転させることにより,任意の位置を表側にもってくることが可能となる.図5には学習に用いたデータ集合の13個の各要素の大きさを視覚化したものを示す.白黒の図では分かりにくいが,赤が値が高値,青が低値を示す.

#### 4 おわりに

今回設計した球面 SOM のツールはインターネット上でフリーでダウンロードできるようにし,球面 SOM を広めることに貢献するつもりである.今後は要素マップのカラー表示を改良したり,学習したマップデータのクラスタリング機能の付加などのについての改良を進めたい.

開発期間の都合で,ソフトウェアの作成は金沢工業大学と鳥取大学のスタッフで開発をおこなった.今後は,興味を持っておられる方を中心にしたボランティアの開発チームのメンバーを集め日本発の球面自己組織化マップのパッケージ「SSOM Toolbox on matlab」(仮称)といった有用なフリーソフトウェアへと発展させていきたいと考えている.

#### 連絡先

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

〒 680-8552

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

#### 参考文献

- [1] H.Ritter: "KOHONEN MAPS", edited by E. Oja and S. Kaski, Elsevier Science, pp.97–110, 1999.
- [2] 中塚 大輔 , 漆畑 喜代裕 , 大藪 又茂: "球面SOMの学習過程に関する研究" , 第 3 回自己組織化マップ研究会 2002 講演論文集, pp.43-44, 2002.

- [3] 池田 佳弘,馬庭 義朗,宇佐美 真,徳高 平蔵,藤村 喜 久郎: "自己組織化マップによる健康診断システム",バイオメディカル・ファジィ・システム学会 第 15 回年次大会 講演論文集, pp.35-38, 2002.
- [4] T.Kohonen: "Self-Organizing Maps", Springer Series in Information Sciences, Volume 30, 1995 T. コホネン: "自己組織化マップ" 徳高平蔵, 岸田 悟, 藤村喜久郎 訳 (シュプリンガー・フェアラーク東京, 1996).

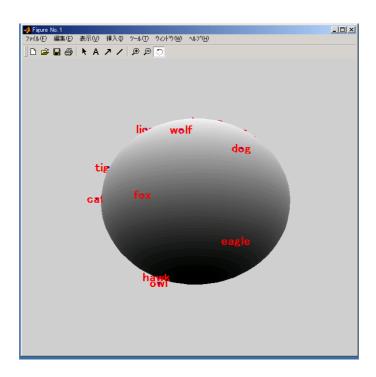


図 4: 球面自己組織化マップで得られた動物マップの例.

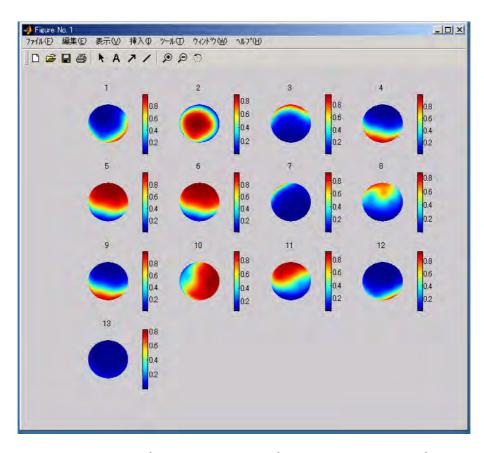


図 5: 球面自己組織化マップで得られた動物マップの 13 属性の各要素マップの表示例.

## 自己組織化マップによる低価格ワンチップマイコン型 脈波測定・解析装置の試作

## Proposal of Low Price Pulse Wave measurement and analysis system by Self-Organizing Map with One-chip Microcomputer

浦瀬新也<sup>1</sup>,太田成人<sup>1</sup>,馬庭芳朗<sup>2</sup>,藤村喜久郎<sup>1</sup>,徳高平蔵<sup>1</sup>,大北正昭<sup>1</sup> Shinya Urase <sup>1</sup> Naruto Ohta <sup>1</sup> Yoshio Maniwa <sup>2</sup> Kikuo Fujimura <sup>1</sup> Heizo Tokutaka <sup>1</sup> Okita Masaaki <sup>1</sup>

> 鳥取大学<sup>1</sup> 公 Tottori University<sup>1</sup> Oyach

公立おおや先端医学研究所<sup>2</sup> Oyacho Pioneering Medical Laboratory<sup>2</sup>

**Abstract:**So far, development of a product in the microcomputer level was difficult because the calculation ability which the analysis of the pulse wave has, and memory capacity for the comparative wave shape memory were necessary.

The device of the proposal makes the prototype which shows the possibility of the product of the low price which a microcomputer was used for by using self-organization map for the analysis of the wave shape.

#### 1. 研究背景

血管年齢測定に用いられていた指先光センサから脈波・加速度脈波情報を採取し、SOMを用いた健康度評価システムを構築する.これまで、我々は市販 PC 内で測定・解析処理をほぼ完了し、健康度評価に極めて有用であることを報告してきた.本研究では、測定から SOM 解析・健康度評価を一体化したシステムを構築し、市場性と汎用性を加味した製品化をめざす.現段階では、脈波のみによるデータマイニングであるが、今後、その他の生体信号も用いた総合的な測定・診断システムを構築することを目標とする。

#### 2. 自己組織化マップ (SOM) とは

自己組織化マップ (SOM:Self Organizing Map)は、Helsinki 工科大学のコホネンが考案した教師なしニューラルネットワークであり、高次元データを二次元に圧縮して表示する仕組みを、神経回路網をヒントにして実現したものである。

人間の脳は、複雑なデータ構造を内部で表現する時に、空間マッピングを使用しているという考え方がある。コホネンは、このアイデアをネットワークの長所として取り込んでいる。なぜなら、この考え方に従えば、ベクトル量子化の手法を用いて、入力ベクトルをデータ圧縮してネッデータに蓄えることが可能となるからである。データ圧縮とは、多次元データを低次元空間に変換することを意味する。さらに、学習データを有効に、ネッな関係を維持しながら学習データを有効に、ネッ

トワーク内に蓄積できる。

ここで、コホネンのネットワークの典型的な例を図1に示す。この図のネットワークは、一層二次元のネットワークである。ここで注意するべきことは、多層パーセプロトロンのように、複数の層状にユニットが並べられているのではなく、平面に格子状に並べられていることである。すべての入力はネットワーク内のすべてのノードに与えられる。フィードバックは、隣接したノードとの間に限定されている。また、独立した出力層は存在せず、平面内のすべてのノードは、それが出力ノードとなる。

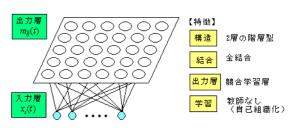


図1 SOM の特徴

#### 3. 脈波とは

脈波は中枢から末梢にいたる血管動態に関して 多くの情報を含んでいる。心臓から送り出された 血流が波動として末梢に伝達されると、心拍動、 血行動態、細動脈系の性状変化など生理的条件に よって修正され、波形のゆがみが生ずる。指先を センサに入れるだけで"今現在の動脈硬化の程 度"が数秒で判る。 しかし、そのままの脈波では基線が安定せず、また波形の起伏に乏しく、変曲点を評価する事が 困難であるといった問題があった。そこで波形を 微分する方法が提案された。近年では2次微分し た加速度脈波が提案され、その波形の評価法が発 表されている。図2に血管の容積変化による容積 脈波、1次微分した速度脈波、2次微分した加速 度脈波を示す。

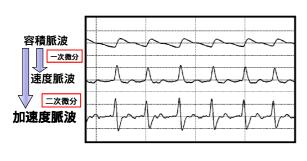


図2 脈波

#### 4. 脈波マップの作成

#### 4.1. 脈波データ

兵庫県の診療所で採取した279人分の加速度脈波のデータを用いた。これには医師により佐野式でA~Gの7つのグループでラベルがつけられている。佐野式の脈波分類は以下の図3のようになる。

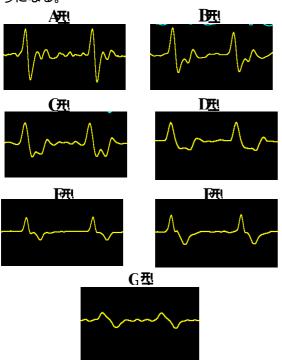
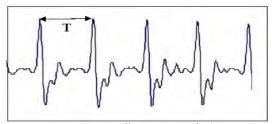


図3 佐野式脈波分類

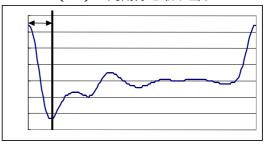
#### 4.2. 前処理

ここで、前処理の方法について述べる。まず(1)のように被験者の脈波を取り込み、1周期分を切り出す。(2)では切り出した加速度脈波の最大値を周期のはじめとして、最大値から最小値までの範囲を取り出す操作である。その後、10等分し、0から1に規格化する様子が(3)である。それに最大値と最小値までの間隔を加え、規格化した11点のデータ5周分(11×5=55)と、間隔の5次元の合計60次元でマップを作成した。

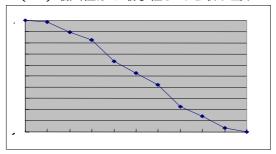
図4にその過程を示す。



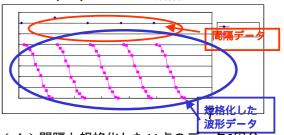
(1)1周期分を取り出す



(2)最大値から最小値までを取り出す



(3)1から0に規格化する



(4)間隔と規格化した11点のデータ5周分合計60次元のデータを用いてマップを作成

図4 前処理

#### 4.3. 脈波マップ

図 5 に結果を示す。左上にA-Bグループ、中央にB-C-Dグループ、右下にE-F グループが集まった。被験者のほとんどがB-C-DグループなのでB,C,Dグループを分類する必要がある。そこで 2 層目マップを作ってB-C-Dグループの分類を試みる。

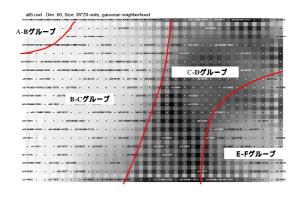


図5 脈波分類マップ

#### 4.4. 2層目脈波マップ

2 層目マップでは先ほどの 1 層目のマップで 使用しなかったデータである最小値から第 2 最 小値までのデータを使用してマップを作る。図 6 に 2 層目マップのイメージ図を示す。

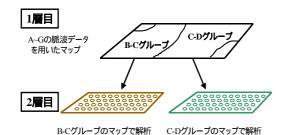


図6 2層目マップのイメージ図

1 層目の B - C グループの脈波をマップにかけると、図 7 のように B と C のグループに分類することができた。

B-Cの脈波マップ

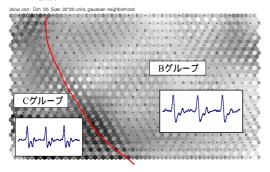


図7 B-C 脈波マップ

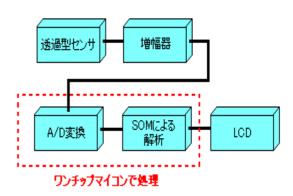
#### 5.システムの構成

#### 5.1. 脈波データ測定装置

脈波測定に使用した装置のブロック図を図8に示す。まず透過型センサには日本光電社開発の酸素飽和度測定用センサを用いた。血中へモグロビンは、ある波長帯の光に強い吸収スペクトルをもつ。この波長帯の光を照射したとき生体に対する透過光や反射光は血管の容量変動、すなわちへモグロビン量の変化に伴い変化する。この透過光の強度を電気信号に変えて脈波を検出する。

増幅器を通した後の処理である、「A/D 変換」「SOM による解析」をワンチップマイコンを用いることで実現する。今回、ワンチップマイコンには H8/3048F を用いることにした。

まず、あらかじめ作成された脈波マップによる SOM データは ROM に格納されている。透過型センサより得られた測定脈波を RAM に格納し、ROM に格納されているデータとの比較・判断をおこなう。また、その結果を LCD に表示させる。



凶 8 脈波測正装直ノロック凶

#### 5.2. インターフェース部

日々の測定を容易にし、健康の状態をより詳 しく知るためには、インターフェース部分の設 計は重要である。

- 1.操作スイッチの簡単化
- 2. 脈波・マップを LCD に表示 (視覚的な健康度の判断が可能)
- 3.過去のデータとの比較が容易におこなえる 以上のような点を考慮にいれる必要がある。 ここで、まだ実現できていないが図9に将来の 拡張機能を考えた測定機器の完成予想例を示す。

スクロールにより画面を切り替えることができ、健康度が一目でわかるようなシステムの構築を目指す。

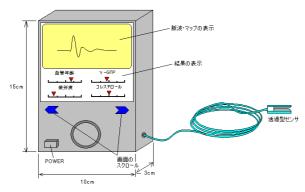


図9 測定機器の例

#### 5.3. 現段階での問題点

現在の測定システムでは光センサから容積脈波情報を採取している。問題点として外部からの光がノイズとなり、測定結果に影響してしまうことがある。現段階ではその対策として測定時に布をかぶせることで対応しているが、測定センサの形状・種類もしくは測定方法についても今後検討していく必要がある。

#### 6.おわりに

本研究では、自己組織化マップによる低価格ワンチップマイコン型脈波測定・解析装置を試作した。

これまでの生体信号測定,例えば,心拍数や血圧・体温などの数値的なバイタルサインでは、健康状態について予測することは困難であった。

医師の脳には経験に基づいたデータベースがあり、一人一人の患者の多次元情報が入力されることで、多くの病態の中からその入力情報にもっとも合致した診断が脳裏に写像(出力)される。この医師の「診断」部分が、あらかじめ作成しておいた SOM を用いることにより可能となる。

また、SOM を用いた簡易型測定システムの開発は、これまでの高価で個人では手に入らなかった測定器をより身近なものとし、日々の健康状態のチェックを可能とする。特にこれからの高齢化社会において重要であると考える。

今後の課題は、図8に示した各機能をそれぞれ完成させていくことである。

#### 参考文献

- [1] Teuvo Kohonen 著, 中谷和夫 監訳: "自己組織化 と連想記憶", シュプリンガーフェアラーク東京, 1993年2月.
- [2] Teuvo Kohonen 著,徳高平蔵,岸田悟,藤村喜久郎訳: "自己組織化マップ",シュプリンガーフェアラーク東京,1996年6月.
- [3] 徳高平蔵, 岸田悟, 藤村喜久郎: "自己組織化マップの応用-多次元情報の2次元可視化-", 海文堂, 1999年2月.

- [4] 徳高平蔵, 藤村喜久郎, 山川烈 監修: "自己組 織化マップ応用事例集", 海文堂, 2002 年 10 月.
- [5] 高田晴子、鷲野嘉映, "加速度脈波と血管年齢", 教育医学第43巻第4号pp.353-359,1998年6月
- [6] 吉竹啓成, "自己組織化マップ(SOM)による脈波(P 波,A 波)の分類,"鳥取大学工学部電気電子工学科平 成13年度卒業論文,2002年
- [7] 青柳健"自己組織化マップ(SOM)を用いた脈波 判定システムの構築"鳥取大学工学部電気電子工学 科平成15年度修士学位論文、2004年

#### [連絡先]

**〒**680-0945

鳥取県鳥取市湖山町南4丁目101番地 鳥取大学工学部電気電子工学科

浦瀬新也

TEL (0857) 31-5243 FAX (0857) 31-0880 E-mail b01t3005@maxwell.ele.tottori-u.ac.jp

## ユニット削除機能を有する kMER による 構造化等確率位相マップの形成

A Realization of the Structured Topographic Map by Using kMER with Pruning Function

内野 英治 末竹 規哲 石垣 忠平
Eiji Uchino Noriaki Suetake Chuhei Ishigaki
山口大学
Yamaguchi University

**Abstract:** A kernel-based topographic map formation, kMER, was proposed by Van Hulle, and some effective learning rules have been proposed so far with many applications. However, no guide is indicated concerning the determination of the number of units in kMER. This paper describes a units deletion rule, which enables to construct automatically an appropriate-sized map to acquire the global topographic features underlying the input data. The effectiveness of the present rule has been confirmed by some preliminary computer simulations.

#### 1 はじめに

自己組織化マップ (SOM)[1][2] のもつ入力データ密度推定性能やノイズ耐性, さらには生物学的な知見からの正当性を改善するものとしてカーネルベース位相マップは,図1に示すように、例えばガウス関数のような局所的なカーネル関数をもつユニットから構成される. その学習則としては、カーネルベース最大エントロピー学習(kMER)[3][4] がよく知られている. kMERは、入力データに対して全てのユニットを等確率で活性化し、その結果として等確率位相マップを形成するという特長をもつ. しかし、kMERには、入力データに対して、あらかじめいくつのユニットを準備すべきかの明確な指針がなく、場合によっては位相マップを効率的に形成できないといった問題点がある.

本報告では、入力データのもつ大域的な位相関係をより少ないユニットで効率的に表現することを目的として、kMERにおけるユニット削除ルールを提案する. さらに、コンピュータシミュレーションを行い、提案ルールの妥当性を検証する.

### 2 カーネルベース最大エントロピー 学習規則: kMER

カーネルベース位相マップでは、各ユニットiは 参照ベクトル $w_i$ に加えて、 $w_i$ を中心とする局所 RF(Receptive Field, 受容野) 領域カーネル  $K(v-w_i,\sigma_i)$  をもつ。例えば, $K(v-w_i,\sigma_i)$  の形状が,図 2 に示すように,その中心周りで放射状の対称性をもつガウス関数であるとすると,カーネル  $K(v-w_i,\sigma_i)$  のあるしきい値  $\tau_i$  での断面は,入力空間 V における半径  $\sigma_i$  の円 (一般には超球) となる.この場合,ユニット i は,半径  $\sigma_i$  の円領域  $S_i$  を RF 領域としてもつという.kMER では,参照ベクトル  $w_i$  と, $S_i$  の半径  $\sigma_i$  を入力 v に応じて更新することで,等確率位相マップを形成する.

#### 2.1 参照ベクトルの更新

kMER では、Kohonen のものとは異なった学習則が 用いられる。kMER では、まず、次のようなファジィ コードメンバーシップ値を計算する。

$$\Xi_i(\boldsymbol{v}) = \xi_i(\boldsymbol{v}) / \sum_{k \in A} \xi_i(\boldsymbol{v}), \tag{1}$$

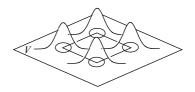


図 1: カーネルベース位相マップ.

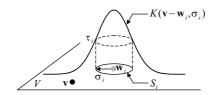


図 2: RF 領域カーネル  $K(\boldsymbol{v}-\boldsymbol{w}_i,\sigma_i)$ .

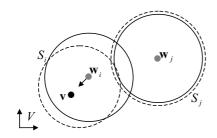


図 3: RF 領域の更新.

$$\xi_i(\boldsymbol{v}) = \begin{cases} 1, & if \ \boldsymbol{v} \in S_i, \\ 0, & if \ \boldsymbol{v} \notin S_i. \end{cases}$$
 (2)

ここで、 $\xi_i(v)$  は、ユニットi が入力v によって活性化されたか否かを表し、 $\Xi_i(v)$  は、活性化されたすべてのユニットの中でのユニットi の帰属度を表す。N 個のユニット,M 個の入力データの場合に、一括修正方式における参照ベクトルの更新量 $\Delta w_i$  は、帰属度を用いて以下のように計算される。

$$\Delta \boldsymbol{w}_{i} = \eta \sum_{\boldsymbol{v}^{\mu} \in M} \sum_{j \in N} \Lambda(i, j, \sigma_{\Lambda}(t)) \Xi_{i}(\boldsymbol{v}_{\mu}) \operatorname{Sgn}(\boldsymbol{v}^{\mu} - \boldsymbol{w}_{i}).$$
(3)

 $\eta$  は学習率, $\Lambda(i,j,\sigma_{\Lambda}(t))$  は時間とともに減少する近傍関数, $\mathrm{Sgn}(\cdot)$  は要素ごとに適用される符号関数である.更新の様子を図 3 に示す.

#### 2.2 RF 半径の更新

kMER では参照ベクトル  $w_i$  だけでなく,RF 領域の半径  $\sigma_i$  も更新される.その更新は,位相マップが収束した時点での各ユニットの活性化確率が,適当な係数  $\rho$  を用いて

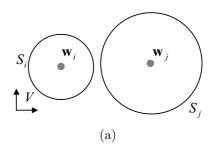
$$P(\xi_i(\boldsymbol{v}) \neq 0) = \frac{\rho}{N},\tag{4}$$

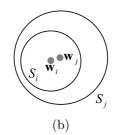
となるように行われる. ここで,  $\rho$  の決定に関しては, 経験的に以下の式が用いられる [3].

$$\rho = \max\left(1, \frac{30N}{M}\right). \tag{5}$$

一括修正方式において、具体的な $\sigma_i$ の更新式は、

$$\Delta \sigma_i = \eta \sum_{\boldsymbol{v}_{\mu} \in M} \{ \rho_r / N(1 - \xi_i(\boldsymbol{v})) - \xi_i(\boldsymbol{v}) \}, \qquad (6)$$





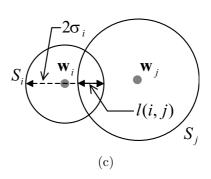


図 4: RF 領域の重なり度合い. (a)  $m_i(j)=0$ . (b)  $m_i(j)=1$ . (c)  $m_i(j)=l(i,j)/2\sigma_i$ .

となる. ここで,  $\rho_r \doteq \rho N/(N-\rho)$  である. 収束の証明や, より数学的な詳細は参考文献 [3],[4] に譲る.

#### 3 ユニットの削除ルール

本研究では、入力データのもつ大域的な位相関係を、より少ないユニットで効率的に表現するために、kMERに対してユニット削除ルールを導入する. ユニット削除ルールでは、まず、着目するユニットとその他のユニットのもつRF領域の重なり度合いを計算し、その重なり度合いがしきい値よりも大きい場合に着目ユニットを削除する. その後、削除されたユニットのもつ競合層上での隣接関係を残りのユニットに引き継ぎ、位相保持を行う.

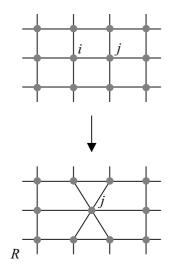


図 5: 位相保持.

## 3.1 RF領域の重なり度合いの評価とユニットの削除

本研究では、着目ユニットiの RF 領域と、ユニットjの RF 領域の重なり度合い $m_i(j)$  を以下のように定義する.

$$m_i(j) = \begin{cases} 0, & l(i,j) > 2\sigma_i, \\ 1, & l(i,j) < 0, \\ l(i,j)/2\sigma_i, & otherwise, \end{cases}$$
 (7)

$$l(i,j) = \sigma_i + \sigma_j - ||\boldsymbol{w}_i - \boldsymbol{w}_j||. \tag{8}$$

図 4 に、式 (7) の 3 つの場合における RF 領域の重なりの様子を示す。  $m_i(j)$  がしきい値  $\theta$  以上のとき、ユニット i を位相マップ上から削除する。ここで、しきい値  $\theta$  として、

$$\theta = \left(\frac{\rho}{N}\right)^2,\tag{9}$$

を用いる. 収束時におけるユニットの活性化確率が  $\rho/N$  となることから, これは 2 つのユニットが同時に活性化される確率を意味し,本研究では,この同時確率の値を重なり度合いの上限として用いる.

#### 3.2 ユニット削除時の位相保持

ここでは、削除されるユニットiの競合層上での隣接関係を、ユニットiの RF 領域と大きく重なっている RF 領域をもつユニットjに引き継ぐことにより、位相保持を行う。具体的には、ユニットjのもつ隣接ユニットの集合 $C_j$ に、ユニットiのもつj以外の隣接ユニットkを加え、

$$C_i \leftarrow k, \{k | k \in C_i, k \neq j\},\tag{10}$$

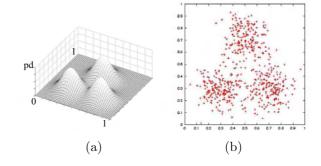


図 6: テストデータ. (a) 確率密度. (b) データ分布.

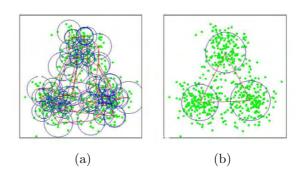


図 7: 形成された位相マップ. (a) 従来の kMER. (b) 提案ルールを導入した kMER.

とする. さらに、図5に示すように、競合層上でのユニットiの位置 $\mathbf{r}_i$ と、ユニットjの位置 $\mathbf{r}_i$ を用いて、

$$r_j \leftarrow \frac{r_i + r_j}{2},$$
 (11)

とする

### 4 シミュレーション実験

本研究では、位相マップ形成のシミュレーション実験を行い、提案ルールの妥当性を検証する.

実験では、図 6(a) に示す確率密度をもつテストデータを用いて位相マップ形成を行う. テストデータは、 $[0,1]^2$  の範囲における 600 個の 2 次元ベクトルからなる. 図 6(b) にテストデータの分布を示す.

図 7 に、従来の kMER とユニット削除ルールを導入した kMER を用いた場合における位相マップ形成の様子を示す。 どちらの方法においても、近傍関数  $\Lambda(i,j,\sigma_{\Lambda}(t))$  は、

$$\Lambda(i, j, \sigma_{\Lambda}(t)) = \exp\left(-\frac{||\boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_j||^2}{2\sigma_{\Lambda}(t)}\right), \quad (12)$$

$$\sigma_{\Lambda}(t) = \sigma_{\Lambda 0} \exp\left(-2\sigma_{\Lambda 0} \frac{t}{t_{max}}\right),$$
 (13)

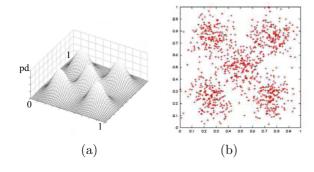


図 8: テストデータ. (a) 確率密度. (b) データ分布.

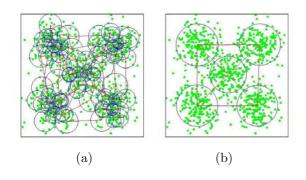


図 9: 形成された位相マップ. (a) 従来の kMER. (b) 提案ルールを導入した kMER.

とした. また, 初期ユニット数は  $N=100(10\times10)$ , 学習率は  $\eta=0.0005$ , 初期近傍範囲は  $\sigma_{\Lambda0}=5$ , 最大学習回数は  $t_{max}=30000$  とした. また, 提案のユニット削除ルールは, 学習ステップ 3000 回につき 1 回の割合で適用した. 図 7 より, 提案ルールを導入した kMER では, 従来の kMER に比べて, より少ないユニットで大域的な位相関係をよく捉えており, 効率的に位相マップを形成していることがわかる.

次に、図 8(a) に示す確率密度をもつテストデータを用いて位相マップ形成を行う. テストデータは、 $[0,1]^2$  の範囲における 1000 個の 2 次元ベクトルからなる. 図 8(b) にそのテストデータの分布を示す.

図9に形成された位相マップを示す. 図9より, 前述の実験と同様に提案ルールを導入した kMER の有効性が確認される.

### 5 おわりに

本報告では、入力データのもつ大域的な位相関係を、より少ないユニットで効率的に表現することを目的として、kMERにおけるユニット削除のルールを提案した。

提案ルールでは、まず、ユニット間のRF領域の重なり度合いが判定され、その重なり度合いが大きい場合に、着目ユニットが削除される。また、削除されたユニットのもつ競合層上での隣接関係を残りのユニットに引き継ぐことで、位相保持が行われる。

提案ルールを導入した kMER を用いたコンピュータシミュレーションを行い、提案ルールの有効性、並びに妥当性を検証した.

今後の研究課題は、提案ルールにおけるしきい値と 形成される位相マップの関係をより深く解析すること と、データの密度推定やクラスタリングといった実問 題への応用である.

#### 参考文献

- Kohonen T. "Self-organized Formation of Topologically Correct Feature Maps," Biol. Cybern., Vol. 43, pp. 59-63, 1982.
- [2] Kohonen T. Self-organizing maps, Heidelberg, Springer, 1995.
- [3] Van Hulle M. M., Faithful Representations and Topographic Maps: From Distortion- to Information-based Self-organization, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [4] Van Hulle M. M., "Kernel-based Equiprobabilistic Topographic Map Formation," Neural Computation, Vol.10, pp.1847-1871, 1998.

#### 問い合わせ先

₹ 753-8512

山口県山口市吉田 1677-1 山口大学理学部自然情報科学科 内野 英治 (うちの えいじ) TEL (083) 933-5699

TEE (000) 555 5055

FAX (083) 933-5273

E-mail uchino@sci.yamaguchi-u.ac.jp

## カーネル法を適用した高次元特徴空間上での 適応部分空間自己組織化マップ

Adaptive-Subspace Self-Organizing Map on the High-dimensional Feature Space by

Applying Kernel Method

河野 英昭 山川 烈 堀尾 恵一 Hideaki Kawano Takeshi Yamakawa Keiichi Horio 九州工業大学

Kyushu Institute of Technology

Abstract: Adaptive-Subspace Self-Organizing Map (ASSOM) is a variant of Self-Organizing Map, where each computation unit defines a linear subspace. These subspaces are represented by a set of basis vectors. After the training, each unit results in a set of subspace detector. In numerous cases, however, a great number of bases are necessary for constructing the subspace enough to recognize correctly. In this paper, the ASSOM on the high-dimensional feature space with kernel method is proposed in order to achieve the recognition with a small number of bases. By using the kernel method, the linear subspaces in the ASSOM are extended to the non-linear subspace. This leads to increase the ability of representation as a subspace. The effectiveness of the proposed method is verified by applying it to a simple pattern recognition problem.

#### 1 はじめに

自己組織化マップ (Self-Organizing Map: SOM) を拡張した適応部分空間自己組織化マップ (Adaptive Subspace SOM: ASSOM) は,各ユニットが線形部分空間で表現されている [1]. ASSOM は,同一クラスに属するデータ集合を1つの線形部分空間として割り当てることで,パターン分類器として用いられる. Kohonen は,ASSOM が生成する線形部分空間によってパターンの不変特徴,すなわち並進,回転,スケーリングなどに対して頑健な特徴を抽出可能であることを示している. Kohonen の実験で用いられた音声のような周期的かつ定常な信号に対しては,ASSOM で定義される線形部分空間によって妥当な特徴を抽出することが可能である.しかしながら,画像や動画のような非周期かつ非定常な信号に対しては線形部分空間の表現能力では十分とはいえない.

本研究では,ASSOM における線形部分空間をカーネル法を用いて非線形部分空間に拡張したカーネル ASSOM を提案する.カーネル法は,入力空間から高次元特徴空間へのデータの変換を行い,高次元空間上での線形処理を行うことで,元の入力空間における非線形な処理を実現する手法である.近年,サポートベクターマシン (SVM)[2], [3] の中で導入されたことに

よって,注目を集め,多くの応用がなされている [4] . 提案するカーネル ASSOM を,人工的に生成したパターンの分類問題に適用し,その有効性を示す.

# 2 カーネル適応部分空間自己組織化マップ (KASSOM)

#### 2.1 高次元空間への写像

カーネル法 [5] は,データの内積の形式で表現された線形手法をカーネルトリックを用いることで容易に非線形な手法に拡張することができる.以下では,カーネルトリックを用いたカーネル ASSOM のデータの前処理方法,すなわちデータを高次元空間へ写像する方法を述べる.カーネル ASSOM では,SVM と同様に,無限次元空間を含む高次元特徴空間を利用する.この高次元特徴空間を H とし,もとの空間  $R^n$  を入力空間と呼ぶ.H は Hilbert 空間である.写像  $\Phi:R^n\to H$  を利用し,データ x を特徴空間に移した  $\Phi(x)$  を考える.このとき, $\Phi(x)$  を明示的に利用するのではなく,内積  $\Phi(x)^T\Phi(y)$  を表すカーネル関数だけを用いて表現することができる.すなわち,写像  $\Phi$  の具体的な形が分からなくても,カーネル関数を使うことで高次元

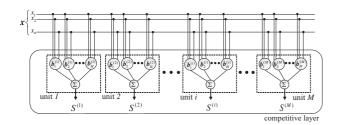


図 1: ネットワークの構成

空間における内積の計算を行うことが可能となる.一般に,高次元空間における内積の計算は,計算コストの点で容易ではないが,カーネル関数を用いることで,入力空間の次元での処理となり実現可能となる.カーネルトリックが"トリック"と呼ばれる所以はここにある.

一般的に,用いられるカーネル関数としては

$$K(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) = (\boldsymbol{x}^T \boldsymbol{y})^d \tag{1}$$

$$K(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) = (\boldsymbol{x}^T \boldsymbol{y} + 1)^d \tag{2}$$

$$K(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) = \exp\left(-\frac{||\boldsymbol{x} - \boldsymbol{y}||^2}{2\sigma^2}\right)$$
 (3)

のような,斉次型多項式カーネル,非斉次型多項式カーネルやガウス型カーネルなどがある.式 (1),(2) において,d は正の整数であり,式 (3) において, $\sigma$  は正の実数である.また,式 (1) において,d=1 としたとき,カーネル関数は入力空間における内積  $x^Ty$  を表しており,このときの特徴空間における処理は入力空間における処理と等価となる.

以降の説明では,特に断らない限り,取り扱うベクトルは高次元空間へ写像されているものとして考える.

#### 2.2 ネットワークの構成

図 1 に 1 次元トポロジーの競合層をもつカーネル ASSOM におけるネットワーク全体の構成を示す.ネットワーク構成は従来の ASSOM と同じく,入力層と競合層から構成され,入力層はn 次元入力ベクトルの各要素を入力として受ける.競合層はユニットがM 個配列されている.ここで,ユニットi はH 個の基底ベクトル  $\{\Phi(b_1^{(i)}),\Phi(b_1^{(i)}),\cdots,\Phi(b_H^{(i)})\}$  によって構成される.各ニューロンは,P 個の基底ベクトルによって張られる部分空間を表現している.図 2 は,2 個の基底ベクトルによって張られる部分空間の図式的説明である.

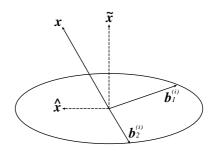


図 2: ニューロンが表現する部分空間

#### 2.3 学習アルゴリズム

ここでは,カーネル ASSOM の学習アルゴリズムを示す.カーネル ASSOM の学習アルゴリズムは,従来の ASSOM の学習における処理をすべて入力データの内積の形で表現し,それをカーネル関数に置き換えることで表現される.そのために,まず,従来の ASSOM における基底ベクトルは次式のように,全学習データの線形結合として表現する.学習データ総数を N とすると,ニューロン i における j 番目の基底ベクトルをは次式で表される.

$$\Phi(\boldsymbol{b}_{j}^{(i)}) = \sum_{k=1}^{N} \alpha_{jk}^{(i)} \Phi(\boldsymbol{x}_{k})$$

$$\tag{4}$$

以下では , カーネル ASSOM の学習の流れを説明 する .

step0:ニューロンの初期化

すべてのユニットにおけるすべての基底ベクトルのパラメータ  $a_{ik}^{(i)}$  を乱数で初期化する .

step1:基底ベクトルの正規直交化

各ユニットの基底ベクトルをグラム・シュミット の直交化を用いて直交化し,基底ベクトルのノル ムを1に正規化する.

#### step2: エピソード提示

ASSOM をクラスリングに用いる際のエピソードは,同一クラスに属するデータ集合から E 個選択した部分集合として定義される.クラス q に属するデータ集合  $\Omega_q$  から選択した部分集合  $\chi_q$  の要素数を E とすると,エピソードは次式で表現できる.

$$\chi_q = \{\Phi(\boldsymbol{x}_1), \Phi(\boldsymbol{x}_2), \cdots, \Phi(\boldsymbol{x}_E)\}, \quad \chi_q \subseteq \Omega_q$$
(5)

step3: 各ニューロンの応答の計算

競合層上の各ニューロンにおける応答  $S_i$  を計算する. 各ニューロンの応答は, 入力ベクトルから

基底ベクトルへの直交射影の長さをすべての基底 ベクトルに対して総和し,これをエピソードの中 のデータ全てに対して総和したものである.

$$S_{i} = \sum_{e=1}^{E} \left( \sum_{j=1}^{H} \left( \Phi(\boldsymbol{x}_{e})^{T} \Phi(\boldsymbol{b}_{j}^{(i)}) \right)^{2} \right)$$

$$= \sum_{e=1}^{E} \left( \sum_{j=1}^{H} \sum_{k=1}^{N} \left( \alpha_{jk}^{(i)} K(\boldsymbol{x}_{e}, \boldsymbol{x}_{k}) \right)^{2} \right)$$
(6)

#### step4: 代表勝者の決定

エピソード入力による勝者を代表勝者という.代表勝者の決定は,各ニューロンからの出力に基づいて,次の基準で行われる.

$$c = \arg\max_{i} \{S_i\}, \quad i \in M$$
 (7)

#### step5: 基底ベクトルの更新

通常の ASSOM の更新式を入力データの内積の形式で表現し,その内積の部分をカーネル関数で置き換えると,次式を得る.

$$\begin{split} &\Phi(\boldsymbol{b}_{j}^{(i)}(t+1)) \\ &= \Phi(\boldsymbol{b}_{j}^{(i)}(t)) \\ &+ \lambda(t)h_{c}^{(i)}(t)\sum_{e=1}^{E} \left[\Phi(\boldsymbol{x}_{e})\Phi^{T}(\boldsymbol{x}_{e})\right]\Phi(\boldsymbol{b}_{j}^{(i)}(t)) \\ &= \sum_{k=1}^{N} \alpha_{jk}^{(i)}(t)\Phi(\boldsymbol{x}_{k}) \\ &+ \lambda(t)h_{c}^{(i)}(t)\sum_{e=1}^{E} \sum_{k=1}^{N} \alpha_{jk}^{(i)}(t)K(\boldsymbol{x}_{e},\boldsymbol{x}_{k})\Phi(\boldsymbol{x}_{e}) \end{split}$$

ここで, $\lambda(t)$  と  $h_c^{(i)}(t)$  は学習回数 t における学習係数と近傍範囲で,それぞれ時間とともに減少する.カーネル ASSOM において,基底ベクトルを更新することはパラメータ  $\alpha_{jk}^{(i)}$  を更新することと等価である.基底ベクトルのパラメータの更新則は,式 (8) を考慮すると,次式で定義される.

$$\Delta \alpha_{jk}^{(i)} = \sum_{e=1}^{E} \alpha_{jk}^{(i)}(t) \lambda(t) h_c^{(i)}(t) K(\boldsymbol{x}_e, \boldsymbol{x}_k)$$
, for  $\{k | \boldsymbol{x}_k \in \chi_q\}$  (9)

step6: 基底ベクトルの正規直交化step1 と同様である.

step7: エピソード提示終了判定 すべてのクラスをネットワークに一通り提示して

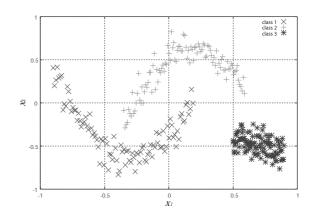


図 3: 実験に用いた人工データの分布

いれば , step7 へ , そうでなければ , step2 へも どる .

#### step8: 学習終了判定

規定学習回数に達していれば,終了.そうでなければ,step2へもどる.

#### 3 シミュレーション

提案手法の有効性を確認するために,人工データ によるクラスタリング実験を行う.ここでは,通常の ASSOM と提案するカーネル ASSOM によるクラスタ リングの性能を比較するために,2次元入力空間におけ る1次元部分空間を抽出する最も簡略化した問題を考 える.図3に実験に用いたデータの分布を示す.データ は  $x_2 = p(x_1 - q)^2 + r + \xi$  によって生成した人工データ で,パラメータp,q,rを適当に決定した.また, $\xi$ は 分散 0.1 の正規分布に従う乱数である . class1 と class2 は、線形分離不可能なデータ集合であり、class3 は線 形分離可能なデータ集合である. それぞれのクラスに 属するデータ数は 100 とした . カーネル ASSOM にお けるカーネル関数は式 (3) を用い,  $\sigma = 0.05$  とした. ユニット数は5である. 学習の結果, 従来の ASSOM では,クラスタリングすることができなかった.カー ネル ASSOM では, ユニット1にclass3, ユニット3 に class2, ユニット5に class1 がそれぞれ割り当てら れた . カーネル ASSOM におけるユニット 1 , 3 , 5 の 応答特性を図 4-6 にそれぞれ示す.また,図 7-9 は,図 4-6 の等高線表示を示している.

#### 4 おわりに

本稿では, ASSOM にカーネル法を適用したカーネル ASSOM を提案した. 提案したカーネル ASSOM を

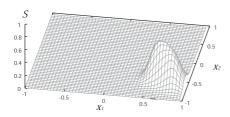


図 4: ニューロン1の応答特性

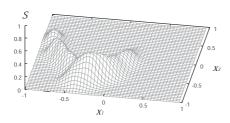


図 5: ニューロン 3 の応答特性

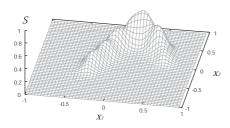


図 6: ニューロン5の応答特性

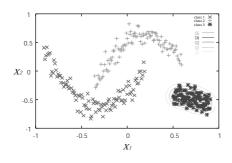


図 7: ニューロン1の応答特性の等高線表示

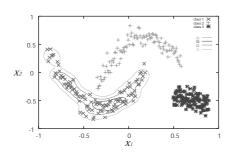


図 8: ニューロン 3 の応答特性の等高線表示

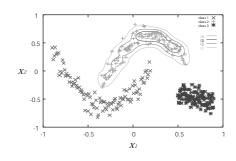


図 9: ニューロン5 の応答特性の等高線表示

人工データを用いた簡単なクラスタリング問題に適用 し,カーネル ASSOM が非線形な部分空間を抽出できることを確認した.今後は,画像データや動画データなどのクラスタリング問題への応用を考えている.

#### 参考文献

- [1] T Kohonen, "Emergence of Invariant-Feature Detectors in the Adaptive-Subspace Self-Organizing Map", Biol.Cybern,75,1996,pp.281-291.
- [2] C.Cortes and V.Vapnik, "Support Vector Networks", Machine Learning, 20, 1995, pp. 273-297.
- [3] V.N.Vapnik, "The Nature of Statistical Learning Theory, Second Edition", Spring-Verlag New York Berlin Heidelberg,1995.
- [4] B.Schölkopf, A.J.Smola and K.R.Müler, "Nonlinear Component Analysis as a Kernel Eigenvalue Problem,", Technical Report 44, Max-Planck-Institut fur biologische Kybernetik, 1996.
- [5] B.Schölkopf and A.J.Smola, "Learning with Kernels", The MIT Press, 2002.

#### 連絡先:

河野 英昭

九州工業大学大学院生命体工学研究科

〒 808-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-4

Phone: (093) 695-6123 Fax: (093) 695-6133

 $\hbox{E-mail: } kawano-hideaki@edu.brain.kyutech.ac.jp$ 

## 多価関数を近似する自己組織関係ネットワーク とその逆問題への応用

## Self-Organizing Relationship Network Approximating Many-Valued Functions and Its Application to Inverse Problem

山川 烈
Takeshi YAMAKAWA

堀尾 恵一 Keiichi HORIO 園尾 聡 Satoshi SONOO

九州工業大学

Kyushu Institute of Technology

**Abstract:** Inverse problems of nonlinear systems such as inverse kinematics are sometimes multi-valued functions. Self-Organizing Relationship (SOR) Network can approximate arbitrary nonlinear systems. It is impossible to apply the SOR network to multi-valued functions. This paper proposes a new method in which many-valued functions are approximated using modified SOR Network. The effectiveness of the proposed method is verified by applying it to robot manipulator control.

#### 1 はじめに

非線形システムの逆問題は,多価関数になる場合がある.例えば,冗長性のあるロボットマニピュレータの手 先位置を指定して,各関節角度を求める逆問題は解が複 数存在し,一意には定まらない.

学習によって非線形な写像関係を獲得する手法とし て,階層型ニューラルネットが知られているが,入力か ら出力の写像が 1 対 1 であることを前提としているの で,写像関係が多価関数の場合には学習を行うことがで きない. 多価関数を学習するために特化した構造や学習 手法が提案[1][2]されているが,多価度が既知である 必要があり,実際のシステムには適用することはできな い.また,入出力の対を用いて競合学習を行い,非線形 な写像関係を獲得できる自己組織化関係ネットワーク (Self-Organazing Relationship Network) が山川らにより 提案されている[3]. 自己組織化関係ネットワークは,入 出力間の写像関係を抽出する学習モードと,学習後,任 意の入力から出力を生成する実行モードから成る.学習 モードでは,入力が同じでも出力が異なれば,別々の関 係として学習される、そのため、写像関係が多価関数と なる場合でも学習を行うことができる.しかしながら, 実行モードでは,重み付き平均によって出力を一意に定 めるので,多価関数に適用することはできない.

本研究では,自己組織関係ネットワークの結合重みベクトルが個別に入出力関係を表現していることに注目

し,多価関数を近似する自己組織化関係ネットワークを 提案する.提案手法をロボットマニピュレータの手先位 置制御に応用し,その有用性を示す.

#### 2 自己組織化関係ネットワーク

自己組織化関係ネットワークの構成を図 1 に示す.自己組織化関係ネットワークはn 個、N 個、m 個のユニットを持つ入力層、競合層および出力層から構成される.競合層上のj 番目のユニットは,結合重みベクトル

$$\mathbf{v}_i = (\mathbf{w}_i, \mathbf{u}_i) \tag{1}$$

を介して入力層および出力層ユニットと結合している . ここで ,

$$\mathbf{w}_{i} = (w_{i1}, \cdots, w_{ii}, \cdots, w_{in}) \tag{2}$$

は競合層と入力層の結合重みベクトルであり、

$$\boldsymbol{u}_{i} = (u_{i1}, \cdots, u_{ii}, \cdots, u_{in}) \tag{3}$$

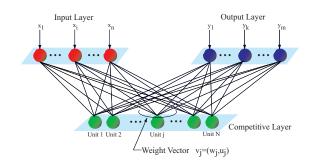


図1 自己組織化関係ネットワークの構造.

は競合層と出力層の結合重みベクトルである.自己組織化関係ネットワークの処理は,学習モードと実行モードの 2 つから成る.学習モードでは,以下のアルゴリズムに従い,L 個の入出力ベクトル対とその評価値 $\{x_l,y_l;E_l\mid l=1,\cdots,L\}$  から望ましい写像関係を抽出する.

- Step 0
   競合層ユニットの結合重みベクトルの初期化を

   乱数を用いて行う。
- Step 1 入出力ベクトル対集合の中から 1 つのベクトル 対  $I=(x_l,y_l)$  を選択し, $x_l,y_l$  を入力層と出力層に 提示する.
- Step 2 入出力ベクトル対とのユークリッド距離が最小になる結合重みベクトル $v_c$  を持つ競合層ユニット c を決定し,勝者ユニットとする.

$$c = \arg\min_{j} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (w_{ji} - x_{i})^{2} + \sum_{k=1}^{m} (u_{jk} - y_{k})^{2}}$$
 (4)

競合層上で,勝者ユニットの近傍に位置するユニットを近傍ユニットとする.

Step 3 勝者ユニットおよび近傍ユニットの結合重みべ クトルを次式により更新する.

$$\mathbf{v}_{j}(t+1) = \begin{cases} \mathbf{v}_{j}(t) + \alpha(t)E(\mathbf{I} - \mathbf{v}_{j}(t)), & (for \ E \ge 0) \\ \mathbf{v}_{j}(t) + \\ \beta(t)E \exp(-\parallel \mathbf{I} - \mathbf{v}_{j}(t) \parallel) \operatorname{sgn}(\mathbf{I} - \mathbf{v}_{j}(t)), \\ & (for \ E < 0) \end{cases}$$
(5)

ここで, $\alpha(t)$  と  $\beta(t)$  は学習係数であり,近傍ユニットを提示する範囲は  $N_c(t)$  で表される.

Step 4 入出力ベクトル対集合内のすべてのベクトルに対して Step 1 から Step 3 を行うことを 1 回の学習とし,規定回数繰り返す.繰り返す過程で,学習係数  $\alpha(t)$ , $\beta(t)$ ,および近傍を定義する範囲 $N_c(t)$  を小さくしていく.

実行モードでは,次式によって,学習後の結合重みベクトルから任意の与えられた入力ベクトルxに対する望ましい出力ベクトルyを生成する.

$$y_k = \frac{\sum_{j=1}^{N} z_j u_{jk}}{\sum_{j=1}^{N} z_j}, \quad k = 1, \dots, m$$
 (6)

ここで, $z_j$  は入力ベクトルx と結合重みベクトル $w_j$  の類似度であり,次式によって求められる.

$$z_{j} = \exp(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{w}_{j}\|^{2}}{2\gamma_{i}^{2}})$$
 (7)

自己組織化関係ネットワークの実行モードでは,式(6)によって出力ベクトルを一意に決定するので,入出力関係が多価関数の際には適用できない.

#### 3 多価実行モード

本研究では, Fuzzy c-Means[4] を用いて, 出力ベクト ル集合のクラスタリングを行い,入力ベクトルに対す る複数の出力ベクトルを生成する自己組織化関係ネッ トワークの多価実行モードを提案する. 多価実行モード は,入力ベクトルと結合重みベクトルの類似度から出力 ベクトル集合を生成する.この集合は,すべての結合重 みベクトルにおける和集合から成るので,類似度の分布 によって複数の出力ベクトルを表現することができる. 提案手法では,類似度をベクトル集合の密度とみなし, 出力ベクトルのクラスタリングを行う.図2に類似度に 応じた密度のベクトル集合を作成する例を示す.なお, わかりやすく表現するために,  $u_i$  を中心に分散が 0.03の正規分布に従い,データを分布させた(図 2(a)).類 似度が高い程, データが密に配置されるベクトル集合 を用いることで,任意の入力ベクトルに対する出力ベク トルのクラスタリングを行うことができる.しかし,対 象となる多価関数が未知のシステムであれば,任意の入 力に対して幾つの出力が存在するかはわからない.提案 手法では,ベクトル集合の密度から最適なクラスタ数を Cluster Estimation 法 [5] を用いて推定することによって 未知のシステムにも適用することができる.

多価実行モードは,以下のアルゴリズムに従って学習後の結合重みベクトルから複数の出力ベクトルを生成する.

Step 1 入力ベクトルx が与えられた際,入力ベクトルと結合重みベクトル $w_j$  との類似度 $z_j$  を式 (7) により求める.

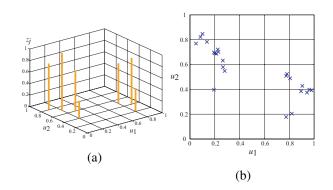


図 2 類似度をベクトル集合の密度に変換する例. (a) 入力ベクトルx と結合重みベクトル $u_j$ の類似度  $z_j$ . (b) $\alpha_{dist}=5$  とした際のベクトル集合Y.

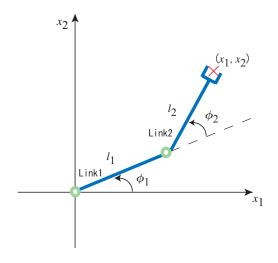


図3 2軸ロボットマニピュレータ系.

表1 二軸ロボットマニピュレータのパラメータ

$l_1$ :	Link1 の長さ	0.7 [m]
$l_2$ :	Link2 の長さ	0.3 [m]
$\phi_1$ :	第1関節角度	$-\frac{\pi}{2} \le \phi_1 \le \frac{\pi}{2} \text{ [rad]}$
$\phi_2$ :	第2関節角度	$-\frac{\pi}{2} \le \phi_1 \le \frac{\pi}{2} \text{ [rad]}$

**Step 2** 類似度に比例して,密度が高くなるベクトル集合 Y を定義し, Cluster Estimation 法によってベクトル集合 Y の最適クラスタ数 S を決定する.

$$Y = \{U_1, \cdots, U_i, \cdots, U_N\}$$
 (8)

$$U_j = \{ u_{jp} | p = 1, \cdots, P_j \}$$
 (9)

ただし, $P_j$  は,類似度に応じたデータの個数で,

$$P_j = \left| \alpha_{dist} z_j \right| \tag{10}$$

で表される正の整数である.ここで  $lpha_{dist}$  は,類似度をデータの個数に変換するためのパラメータである.

- **Step 3** Fuzzy c-Means を用いて,ベクトル集合 Y を S 個にクラスタリングする.
- Step 4 クラスタ s に属する結合重みベクトルおよび類似度をそれぞれ, $u_j^s$ , $z_j^s$  とし,出力ベクトル  $y^s$  を次式より算出する.この操作をすべてのクラスタに対して行う.

$$y_k^s = \frac{\sum_{j \in s} z_j^s u_{jk}^s}{\sum_{i \in s} z_j^s}, \quad k = 1, \dots, m, s = 1, \dots, S \quad (11)$$

#### 4 逆問題への応用

提案手法をロボットマニピュレータの逆問題へ応用する. ロボットマニピュレータの逆運動学は, 手先位置を

指定して、その時の各関節角度を求める問題である・システムに冗長性が存在する場合は解が複数存在し、入出力関係は多価関数となる・二次元平面を動く二軸ロボットマニピュレータを図3に示す・また各パラメータを表1に示す・このロボットマニピュレータの手先位置を入力ベクトル、その時の各関節角度を出力ベクトルとし自己組織化関係ネットワークで学習を行った・図4に示す1000個の入出力ベクトル対とその評価値を用いて入出力間の写像関係を獲得した・図4の入出力ベクトル対は、理想的な入出力関係に±20%のノイズを加えて作成し、その評価値は以下の式に従って決定した・

$$E = 1 - 3d \tag{12}$$

ここで,d は理想的な入出力関係との絶対差である.競合層ユニットは, $400(20\times20)$  個で二次元に配置し,学習係数および近傍範囲の初期値をそれぞれ  $\alpha=0.3$ , $\beta=0.02$ , $N_c=20\sqrt{2}$  とし,いずれも学習終了時に 0 となるように線形に減少させた.1000 回の学習を行った後の結合重みベクトル $v_j$  を図 5 に示す.線で結ばれた結合重みベクトルは,それぞれの競合層ユニットが持つ結合重みベクトルである.w 空間で近い結合重みベクトルが,u 空間で異なる場所に配置されており,1 対多の多価関数の関係を獲得できていることがわかる.

学習後,多価実行モードによる手先位置制御を行った. テスト用入力ベクトル  $x_1 = (0.6, 0.7)$ ,  $x_2 = (0.4, 0.8)$ ,

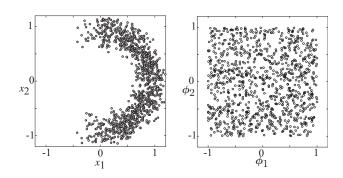


図4 学習に用いた入出力ベクトル対.

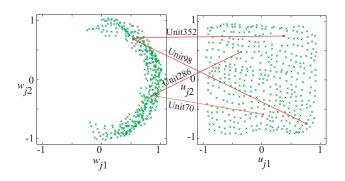


図 5 学習後の結合重みベクトル $w_i, u_i$ の分布.

 $x_3 = (0.9, -0.3)$  ,  $x_4 = (0.8, 0.6)$  を入力した.一例として,入力ベクトル  $x_1$  と結合重みベクトル w との類似度を図 6(a) に示す.この出力ベクトル集合から,最適なクラスタ数を 2 と推定し,Fuzzy c-Means を行った結果を図 6(b) に示す.それぞれの入力ベクトルに対する多価実行モードの出力ベクトルが示すロボットマニピュレータの姿勢を図 7 に示す.図 7(a)(b)(c) では,ロボットマニピュレータがとり得る各関節角度(出力ベクトル)は 2 つ存在する.同図 (d) では,冗長性の存在しない範囲を指定しているので,出力ベクトルはただ 1 つに決まる.多価実行モードでは,未知なシステムに対して入力ベク

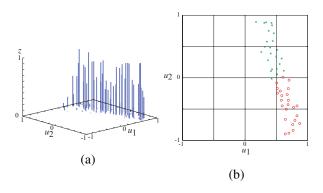


図 6 (a) 入力ベクトル  $x_1$  と結合重みベクトル  $u_j$  の類似度 . (b) 出力ベクトル集合のクラスタリング .

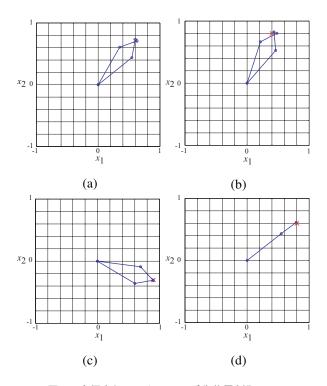


図 7 多価実行モードによる手先位置制御. (a) 入力ベクトル  $x_1=(0.6,0.7)$  の時. (b) 入力ベクトル  $x_2=(0.4,0.8)$  の時. (c) 入力ベクトル  $x_3=(0.9,-0.3)$  の時. (d) 入力ベクトル  $x_4=(0.8,0.6)$  の時.

トルの類似度によって最適な解の個数を推定し,複数の出力ベクトルを生成することができる.図 7 の絶対平均誤差は  $1.7 \times 10^{-2} [m]$  であった.入出力関係が多価関数となるシステムにおいて,自己組織化関係ネットワークの多価実行モードが有用であると言える.

#### 5 まとめ

本研究では,多価関数を近似する自己組織化関係ネットワークの多価実行モードを提案した.提案手法では,入力ベクトルの類似度から出力ベクトル集合のクラスタリングを行い,複数の出力ベクトルを生成することができる.提案手法をロボットマニピュレータの逆問題へ適用し,その有用性を示した.

#### 参考文献

- [1] Masahiko SHIZAWA, "Multi-Valued Regularization Network -A Theory of Multi-Layer Networks for Learning Many-to-h Mappings-", *IEICE Transaction*, Vol.J78-A, No.3, pp.427-439, 1995.
- [2] Masakazu SHINKI and Kiyotaka SHIMIZU, "Approximation of Inverse System (Many-Valued Function) by Neural Network", *IEICE Transaction*, Vol.J82-A, No.7, pp.1029-1037, 1999.
- [3] Takeshi YAMAKAWA and Keiichi HORIO, "Self-Organizing Relationship (SOR) Network", *IEICE Transaction*, Vol.E82-A, No.8, pp.1674-1677, 1999.
- [4] James C. Bezdek, "Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms", Plenum, New York, 1981.
- [5] Stephen L. Chiu, "Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation", *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, Vol. 2, pp.267-278, 1994.

#### [問い合わせ先]

〒808-0196 北九州市若松区ひびきの2番4号 九州工業大学 生命体工学研究科 脳情報専攻 山川 烈

Phone:093-695-6123

Fax:093-693-6133

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

### 自己組織化マップを用いた財務分析ツール

#### The Financial-Analysis tool using the Self-Organizing Map

篠原 博史 山川 烈 堀尾 恵一 Hiroshi Shinohara Takeshi Yamakawa Keiichi Horio

> 九州工業大学 Kyusyu Institute of Technology

Abstract: A financial statement is a financial report that companies submit to the Ministry of Finance. An industrial classification which is one of financial analyses is very important to judge companies. It is, however, very difficult for a user without knowledge to adopt indexes for a good analysis because financial statement includes many indexes. Furthermore, such user may not understand an analysis result. In this paper, we develop a financial-analysis tool in which indexes are automatically adopted and analysis result is represented visually using self-organizing map (SOM) and genetic algorithm (GA). The proposed method is applied to industrial classification, and its effectiveness is discussed.

#### 1 はじめに

経営者や投資家は、企業の経営状態を把握するために財務分析(注)を行う.財務分析の1つに企業の業種分類がある.業種は、法人税の決定基準や投資の判断基準となる重要な要素となるので、財務諸表(年次決算報告書)から、経営者や投資家は業種を客観的に決定する必要がある.現在、企業の業種分類は、専門的知識をもったエキスパートが行っている.しかしながら、エキスパートによって経営指標の判断基準が異なるので、一貫性に欠けることが指摘されている.また、多くの企業は複合的な業務を行っており、一義的に業種を決定することは妥当とはいえない.

近年,経営分析や財務分析の分野への,自己組織化マップ(Self-Organizing Map: SOM)<sup>2]</sup>を用いた研究が盛んにされている<sup>[3]</sup>. SOMは,データの隣接関係を視覚的に表現することに優れたパターン分類ツールであり,分析結果をマップ(地図)として,ユーザにわかりやすく提供することができる.

本研究では、SOM を業種分類へ応用することを考える。SOM の適用によって、財務諸表からの客観的な業種分類が可能となり、複合業種と判断されるべき企業を含む様々な企業の業種分類結果をマップ上の位置によって、視覚的にわかりやすい表現方法で提供することが可能になる。SOM を業種分類へ適用する際の問題点として、データを構成する各要素(経営指標)を同等に評価するので、妥当な分類結果を得られない場合がある。

この問題を解決するために,SOMの距離計算において,データの各要素への重要度を考慮した,重み付きSOM<sup>[4]</sup>を堀尾らが提案している. 重要度は,意図した分類結果になるように,遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm:GA)<sup>[5]</sup>により決定される.

本稿は、データの各要素への重要度を考慮した重み付き SOM を企業の業種分類問題に適用し、財務分析ツールとしての優位性を示す.

#### 2 財務諸表

財務諸表は、企業が年に1回または2回,大蔵省(現在,財務省)に報告する有価証券報告書に記載されている指標から成る.指標は,財務諸表の損益計算書,貸借対照表,および利益処分計算書からなっている.損益計算書は,収益と費用の2つの要素から企業の1年間の経常利益や当期純利益等を分析することに使用される.貸借対照表は,企業に投資された資産,資本について借方,貸方の2つの側面で表される.利益処分計算書は,企業が獲得した利益の最終的処分状況を表す.

国内では,主に3つの財務諸表,「わが国企業の経営分析(通商産業省政策局)」「「」,「企業経営の分析(三菱研究所)」,及び「日経経営指標(日本経済新聞社)」が用いられている.上記に示す財務諸表は,取り扱われている指標の数や,種類が異なる.

本研究では,無料で得ることができ,信頼性 が最も高い「わが国企業の経営分析 - 企業別統 計編 - (通商産業省政策局)」を用いる.各企業の特徴ベクトルは,財務諸表の売上高や経常利益,当期純利益など70指標を使用する.これを入力データとして用いる.

#### 3 自己組織化マップ

図 1 に,Kohonenにより提案されたSOMの構成を示す.SOMは,入力層と競合層の 2 層から構成され,それぞれの層はn 個,N 個のユニットを有する.競合層上のj 番目のユニットは,結合重みベクトルを $w_j=(w_{j1}\cdots,w_{ji}\cdots,w_{jn})$ 介して入力層上の全てのユニットと結合している.

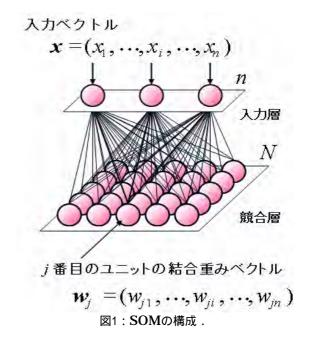
SOM の学習は,以下のアルゴリズムに従って結合重みベクトルを更新することにより実現される.入力ベクトル $x=(x_1,\cdots x_i,\cdots x_n)$ が入力層に与えられたとする(図 1).このとき,競合層ユニットの中で入力ベクトルと最も距離の近い結合重みベクトル $w_c$ をもつc番目のユニットが勝者ユニットに選ばれる.距離尺度としては,一般的に,式(1)で表わせれるユークリッド距離を用いる.

$$||x - w_j|| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - w_{ji})^2}$$
 (1)

勝者ユニットと競合層上でその近傍に位置する ユニット(近傍ユニット)の結合重みベクトルを 次式により更新する.

$$w_j^{new} = w_j^{old} + \alpha(t)(x - w_j^{old})$$
 (2)

ここで, $w_{j}^{\textit{new}},w_{j}^{\textit{old}}$  はそれぞれ更新後と更新前 の結合重みベクトルであり , (t)は学習係数で ある、以上の操作が繰り返し行われる、また学 習係数と近傍の範囲は,学習が進むにつれ初期 値から単調減少するようにする.これにより学 習が収束する.学習後の入力ベクトルを与える と、距離が近い入力ベクトルSOMの競合層上の 近いユニットを勝者ユニットとする. つまり, 入力ベクトルは,それぞれの間の距離に関する 情報を保持したまま、競合層に写像されること になる.これは,トポロジカルマッピングと呼 ばれ,多次元入力ベクトルの類似性を,1次元ま 用して,パターン分類問題等への応用が盛んに 研究されている.一般的なSOMでは,入力ベク トルと重みベクトル間の距離を表す尺度として、 ユークリッド距離を用いる.しかしながら,ユ



ークリッド距離では,双方のベクトルを構成する各要素が平等に取り扱われるので,効果的な分類が行えない場合がある.

SOM におけるユークリッド距離演算の問題点を解決するために、データを構成する要素のそれぞれに対して「重要度」と呼ばれるパラメータを定義し、意図した分類結果を得られるように GA を用いて重要度を決定し、SOM において重み付き距離演算を施す.

重み付きSOMでは,式(3)に示す重み付き距離 尺度を用いる.

$$||x - w_j|| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \beta_i (x_i - w_{ji})^2}$$
 (3)

式(3)は,入力ベクトルの各要素  $x_i$ と j 番目のユニットの重みベクトル  $w_{ij}$  の重要性を考慮したユークリッド距離を意味する. $\beta_i$  は, $x_i$ , $w_{ij}$  の重要度を0から1の値で表し,1に近いほど  $x_i$ , $w_{ij}$ が重要な要素であることを意味し,0に近いほど  $x_i$ , $w_{ij}$ が不要な要素であることを意味する.

#### 4 適用したアルゴリズム

本節では,GAの概要および業種分類に適用した重み付きSOMの構成について述べる.

#### 4.1 遺伝的アルゴリズム

GA は ,生物の進化過程を工学的に実現したアルゴリズムであり , 最適化問題に多く適用されている . GA の特徴は , (1)問題の解を個体とし

て表し,その集合を保持する.(2)選択/淘汰, 複製,組み換え,突然変異などの遺伝演算子を 適用して個体群を進化させること,(3)各個体に は,環境に対する適合度が与えられること,(4) 選択/淘汰/複製によって,より高い適合度を持 つ個体が多く残され,一方,組み換えや突然変 異により,個体に摂動を加えて多様な個体を生 み出すこと,である.図2にGAのフローチャ ートを示す . GA では , 問題の解を個体 ( 通常は 2値の数値列)として表現する.各個体は乱数で 初期化される.この個体の集合を個体群と呼ぶ. 次に問題の解に対する各個体の適合度を算出す ることで、各個体の評価を行う、その評価値に 基づいて個体の再生を行う.つまり,適合度の 高い個体は高い確率で生き残り、適合度の低い 個体は淘汰されやすくなる.次に,任意の2つ の個体を選択し数値列の一部を入れ替える操作 を行う.この操作は,交叉と呼ばれる.その後, 突然変異を行う. 具体的には, ランダムに選択 された個体のある数値を反転させる(数値が 1 の場合は 0 に , 0 の数値の場合は 1 に置き換え る .). 図 4 に交叉と突然変異の概念図を示す. 以上の操作後、個体群の評価を行い、終了条件 を満たせば処理を終了し,満たない場合には, 再生,交叉,突然変異を再度行う.これにより, 問題の解に対して高い適合度をもつ個体が次世 代へ残される.

#### 4.2 適応した重み付きSOM

重み付きSOMの処理は以下の手順で行われる.SOMの重みベクトルの初期化を行う.重要度  $\beta_1$  ~  $\beta_n$ を1つの個体として,個体群の初期化を行う.式(3)を採用したSOMで規定回数学習し,ラベル付けと分類を行う.適合度は,各個体で表現された重みを用いたSOMの分類結果から算出する.具体的には,任意の2つの業種クラスの入力ベクトル群からがマップ上で線形分離可能であるかどうかに基いて算出する.この操作を全ての業種クラスの組合せに対して行い,適合度e の計算を式(4)によって算出する.

$$e = \frac{\text{分類成功数}}{\text{分類成功数 + 分類失敗}}$$
 (4)

適合度の値を用いて,遺伝的操作を行う.以上の操作を規定回数繰り返す.重み付きSOMの処理のフローチャートを図4に示す.この処理により,分類に適した重要度を自動的に決定し,適切な分類を実現することが可能となる.

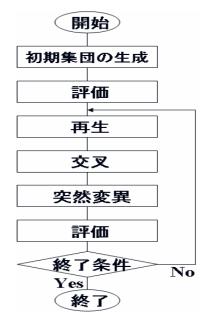


図2:GAのフローチャート.

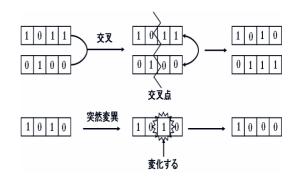


図 3:交叉と突然変異.

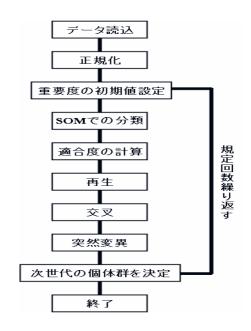


図4:適用した重み付き SOM の手順.

#### 5 シミュレーションと分析結果

財務諸表から得た経営指標を使用して、重み 付きSOMで業種分類を行う.経営指標は,44社 の企業から ,企業ごとに70個用意した .つまり , SOMへの入力ベクトルは,70次元で44個となる. この44社を6個のクラスに業種分類を行う(表: 1). SOMの競合層ユニットは100個用意し,2次 元に配置した.学習回数は1000回,学習係数の 初期値は0.2,近傍の初期値は10である.また, GAでは,個体群に含まれる個体数は50,繰り返 し数(世代数)200とする .各 $\beta$ , を4bitで表現する と, GAにおける各個体は, 280(70×4)個の数値 列として表現される.また,0 $\beta$ ,1であるの で,数値列0000が $eta_i$ =0に,数値列1111が $eta_i$ =1 に対応する.再生方法としては,ルーレット選 択を採用した.交叉の発生確率は0.1で,突然変 異の発生確率は0.05である.

200世代目の中で最高の適合度を持つ個体を , 入力ベクトルの各要素への重要度として , この重要度に基づいた重み付き SOM による分類結果を図 5 に示す . また , 適用した重み付き SOM の比較対象として ,従来の SOM で分類を行った結果を図 6 に示す .適用した重み付き SOM においても , クラス 4 とクラス 5 のデータに関して若干分類されてない部分が見られる . しかしながら , クラス 1 , 2 , 3 , 6 においては , 重み付き SOM と従来の SOM を比較して格段に分類されていることがわかる . これらのことから , 重み付き SOM は , SOM と比較して良好な分類ができていると言える .

#### 6 結び

本研究では,重み付き距離演算を行う重み付き SOM を用いた財務分析ツールを考えた.重み付き SOM を,業種分析に適用し,従来手法のSOM と比較して,良好な結果を得ることができた.今後の課題として,評価方法の改善が挙げられる.さらに精度を改善することで,ユーザにとって理解しやすい分析システムを構築するこが可能となる.

表 1:業種分類表.

class	色	業種										
ì		炭軍	1	2	3	4	5	6				
2		運送業	7	8	9.	10	11	12	13	14	15	16
3		化学	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
4		食品	26	27	28	29	30	31	32			
5	MIN	建設	33	34	35	36	37	38				
в		サービス	39	40	41	42	43	44				

#### 参考文献

- [1]西田俊夫,田畑吉雄,「経済・経営の統計学」,培風 館,1991.
- [2] Teuvo Kohonen, "Self-organized formation on of topologically correct feature maps", *Biological Cybernetics*, vol. 43, pp. 59-69, 1982.
- [3]G.ザブック, T.コホネン,「金融・経済問題における可視化情報探索 自己組織化マップの応用」,シュプリンガー・フェアラーク東京,1999.

[4]堀尾恵一,升井一郎,山川烈,"SOM を応用した軟組織側貌分類に基づく顎変形症診断",バイオメディカル・ファジィ・システム学会第 14 回年次大会講演予稿集,pp.38-41,2001.

- [5] 坂和 正敏,田中 正博,日本ファジィ学会編「ソフトコンピューティングシリーズ 1」遺伝的アルゴリズム,朝倉出版,1995.
- [7]通商産業省産業政策局,わが国企業の経営分析,大蔵 印刷局,1988-1998

#### [連絡先]

〒808-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-4 九州工業大学大学院生命体工学研究科

篠原 博史

TEL : 093-695-6123 (山川教官室) FAX : 093-695-6133 (山川教官室)

E-mail: shinohara-hiroshi@edu.brain.kyutech.ac.jp

38	16		15			7		12
				8				
37	31		19			14		13
27		24			11			
36	28							9
		21				6		
44	32	25		23				2
41		22				3		
42 43							4	
39	18		20		5			1

図 5:重み付き SOM での分類結果.

7		15			12		2		4
8			9						
21		13		10		5			3
14		19			11	24			6
			25	22					
16		31				17		18	20
			27				23		
29	37								
		35				30			
38		34	36	44		32		43	42

図 6: 従来 SOM での分類結果.

## 尺度の異なるデータを扱う自己組織化マップ

Self-Organizing Map Based on Data Represented in Various Measures

山川 烈 Takeshi Yamakawa 堀尾 恵一 Keiichi Horio

原 潤 Jun Hara

九州工業大学 Kyushu Institute of Technology

Abstract: In this paper we discuss how to treat data that is represented in different scale on a self-organizing map. It is difficult to evaluate capability of a person directly and it needs to evaluate the capability indirectly by some tests. The score obtained by the test represents the order of capability and it is considered to be a topographic relation. Kohonen's Self-Organizing Map (SOM) algorithm can map high-dimensional topology to 1 or 2 dimensional space. It is expected that the SOM serve as the different new evaluation method from the conventional test with a 1-dimensional score. However, since the results obtained by the tests whose difficulties differ have different scales, it is necessary to take the relation of scales into consideration. The relation of scales is expressed on a self-organizing map by giving data with the same characteristic to a self-organizing map simultaneously. This method makes it possible to visualize the data of a different scale and to store the difficulty of each test.

#### 1. はじめに

我が国においては、テストの結果に対する統 計的な処理は、偏差値程度しか知られておらず、 しかもあまり有効活用されていない. テストそ のものが有害視されることもある. しかし欧米 では、人間の能力をはかる手段として新たな理 論が提案され、TOEFL などの大規模な試験でも 取り入れられている. それは「項目反応理論」 (item response theory) と呼ばれ、従来の正答数 に応じた古典的なテスト理論と比較して様々な 利点を待つ[4][5][6]. しかし得られる評価は 1 次元 の点数であるため, 多面的な特徴を持つ人間の 能力の把握には限界がある. 多次元空間に広が る情報を低次元空間に写像する手法として Teuvo Kohonen によって提案された自己組織化 マップ(Self-Organizing Map: SOM)は、複雑な関 係をもつデータを教師無し学習によって分類し, 多くの情報を抽出することができるモデルとし てよく知られている[1][2][3]. テストで得られる各 項目の情報を自己組織化マップで分類すること ができれば、1次元の点数とは違った新たな評 価方法となることが期待できる.

複数の人に対し英語のテストを実施した場合,同じテストを同じ状態で受けさせることは難しい.また,各人に課すテストの問題は,それぞれの能力に合ったものであることが望ましい.各人の英語能力を自己組織化マップで可視化する場合,異なる尺度で表現された得点を扱うことはできないので,各問題の難易度同士の関係を獲得する必要がある.

本研究では、同一の能力を異なる問題で測定したとき、自己組織化マップにそれらの得点を同時に与えることにより、各問題の関係が自己組織化マップ上に獲得される手法を提案する.

#### 2. テスト理論

古典的なテスト理論では、能力を測定しよう とするとき、いくつかの項目からなるテストを 実施し, 各項目の正答か誤答かなどの反応を加 算して尺度を求める. このような方法にはいく つか問題がある.一般的な学力テストを例とし て考える. 各項目が難しいか易しいかという困 難度は正答率によって決定されるが, それはテ ストを受けた標本集団によって変わる. 絶対的 な困難度を数値で表すことは不可能であり, 困 難度の設定には被験者集団の仮定が必要になる. しかもその困難度を知っても, 別の被験者集団 にとって難しいか易しいかは、実際にテストを 実施しなければわからない. 測りたい能力が高 いか低いかは、テストの点数によって決定され るが、点数はテストの困難度によって変わる. そのため点数が高いからといって絶対的な能力 が高いとは言えず,能力の尺度はテストに依存 している. テストの点数についても, 0 点だか らといって能力が0ということではなく、満点 だからといって、完全な能力を持つと言うこと ではない. また, 40 点と 50 点の差が, 90 点 と 100 点の差と等しいとは言えない. また, 最 低得点者から最高得点者までの差が小さかった 場合,被験者集団の能力に差がなかったのか,

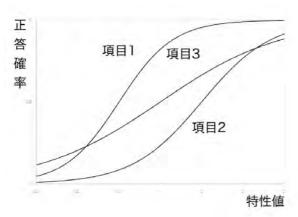


図1 項目特性曲線

差がつきにくいテストだったのかは判別できない。よって異なる被験者集団に対して異なるテストを行った場合、その結果を比較することは不可能である。実際には、テストの難易度や判別力、テスト結果からの能力の推定を勘や経験から導くことが行われている。しかし古典的テスト理論ではそれらを数値化する数学モデルがない。

項目反応理論では、測定したい潜在的な能力 を特性値と呼ぶ. また, 項目の反応というもの を考える。項目の反応とは、その項目ごとの点 数のことである. 正答か誤答の 2 値の項目なら 1か0で考える.ある特定の特性値の集団でも 項目の反応にはばらつきがあるので、その集団 の平均値を特定の特性値に対する項目の反応と する. 2 値の項目なら正答確率と等しくなる. テストの各項目の反応はそれぞれ独立に特性値 と関係を持っていると仮定する. その関係を図 1 に示す. 2 値の項目の場合で考える. 縦軸が 正答確率, 横軸が特性値である. この曲線を項 目特性曲線と呼ぶ. このような項目特性曲線が 項目ごとにわかっていれば、被験者がどの項目 にどう反応したかを表す項目反応パターンから 特性値を推定できる. このような項目特性曲線 は、項目反応モデルと呼ばれる適当な数学モデ ルを立てて, 最尤推定によりパラメータを決定 することにより求めている.

しかし、すべての項目の項目特性曲線がある項目反応モデルと同じ形であり、一つか二つのパラメータの決定によって近似できる、というのは非常に強い仮定であり、パラメータの決定に使用する最尤推定は、データのばらつきがガウス分布に従うという仮定が必要である.

また、項目と特性は独立した関係を持つと仮定されている. 英語の特性を考えたとき、その特性は1次元であり、文法や読解といった要素を考えない. そのため「文法だけが強い」といった状況は想定しない. 文法を問う難易度の

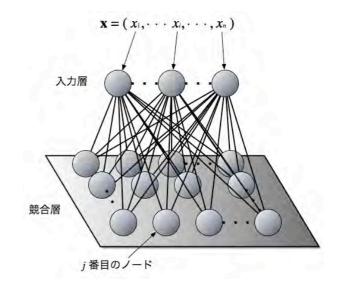


図 2:SOMの構成.

高い問題を解けるのならば、それだけ特性が高く、読解を問う問題を解く確率も高いと判断される。もしそうでなければ、その読解問題は特性の高い人と低い人で差がつきにくい項目特性曲線を持つとされる。項目反応理論では多次元の特性を評価することはできない。

### 3. 自己組織化マップ

図2に、Kohonenにより提案されたSOMの構成を示す。SOMは、入力層と競合層の2層から構成され、それぞれの層はn個、N 個のユニットを有する。競合層上のj 番目のユニットは、結合重みベクトル $\mathbf{w}_j = (\mathbf{w}_{j1} \cdots \mathbf{w}_{ji} \cdots \mathbf{w}_{jn})$ を介して入力層上の全てのユニットと結合している。SOMの学習は、以下のアルゴリズムに従って結合重みベクトルを更新することにより実現される。入力ベクトル $\mathbf{x} = (x_1, \cdots x_i, \cdots x_n)$ が入力層に与えられたとする(図2)。このとき、競合層ユニットの中で入力ベクトルと最も距離の近い結合重みベクトル $\mathbf{w}_c$ をもつ $\mathbf{c}$  番目のユニットが勝者ユニットに選ばれる。距離尺度としては、一般的に、式(1)で表わされるユークリッド距離を用いる。

$$\|\mathbf{x} - \mathbf{w}_j\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - w_{ji})^2}$$
 (1)

勝者ユニットと競合層上でその近傍に位置する ユニット(近傍ユニット)の結合重みベクトルを 次式により更新する.

$$\mathbf{w}_{i}^{new} = \mathbf{w}_{i}^{old} + \alpha(t)(\mathbf{x} - \mathbf{w}_{i}^{old})$$
 (2)

ここで、 $\mathbf{w}_{j}^{new}$ , $\mathbf{w}_{j}^{old}$  はそれぞれ更新後と更新前の結合重みベクトルであり、 $\alpha(t)$ は学習係数である.以上の操作が繰り返し行われる.また学習係数と近傍の範囲は、学習が進むにつれ初期値から単調減少するようにする.これにより学習が収束する.近傍も更新することで、学習時の入力ベクトルの周りにばらついた入力に対する近傍領域が重なっている場合、重なった領域のノードの重みは複数の入力ベクトルの平均値に収束する.その結果、連続的なでもった領域のアウーに対する.その結果、連続的な学問時に与えられなかったデータについても、競合層への写像からその特徴を知ることができる.

## 4. 提案アルゴリズム

提案する補正マップは異なる尺度を同一尺度に補正するための情報を学習し、学習後与えられた異なる尺度のデータを入力したとき、同一の勝者が得られる機能を持つ. その構造を図3に示す.

補正マップは通常の自己組織化マップの入力 次元をテスト項目の数だけ並べた構造になって いる. 入力 x が与えられたとき、その入力が測 定されたテスト項目に対応する入力ベクトルを 用いて競合層上の重みベクトルと比べる.

補正マップの学習アルゴリズムは基本的に通常の自己組織化マップの学習アルゴリズムトルの一部の情報が欠落していたとしても、残りの要素による距離演算により、競合層上の写像を求めることができるということが知られている。それは、欠落した要素以外の勝者決定、更新なら、完全な情報を持つベクトルと欠落情報を持つベクトルとが同じ勝者ユニットを持つずを高めることができるためである。 補正マップは最終的に、特性値をどのテスト項目で評価しても、同じ評価結果が得られるようになら

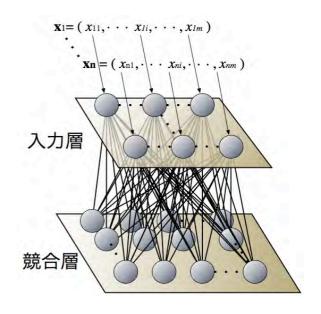


図3 補正マップ

なければならない、そのためには、ある特性値 をいくつかのテストで評価したとき、補正マッ プ上の同一のユニットが勝者となるよう学習す る必要がある. ある特性値を複数のテスト項 目で評価し、その反応データを得たとき、各項 目に対応する重みベクトルとの比較で勝者を決 定すると、学習初期は異なる勝者が得られる. そこで各勝者および近傍について、その勝者の 決定に使用しなかった他のテスト項目のデータ も含めて,重みを更新する.複数の近傍が重な った領域の競合層ユニットは, 同じ入力に対し て複数回重みが更新される. そのため同じデー タを与えたときに、近傍が重なった領域の競合 層ユニットが勝者となる可能性が高くなる. こ の操作によって,同じ特性値から得られた反応 であれば、競合層上の近い座標に写像されるよ うになる.

#### 5. シミュレーション

表 1 に示す 5 次元の特徴量を持つ動物の分類についてシミュレーションを行った. 一つの動物のデータにつき 6 個の適当な関数によってデータをばらつかせ、それを異なる尺度を通し動物から 6 個のデータが得られるが、そのうち 4 つを使って補正 SOM の学習を行った. つまり、ある 5 次元の入力データによって決定する勝者と近傍は 20 次元のベクトルについて更新することとなる. ばらつかせたデータをそのままSOM で学習した結果を図 4 に、補正 SOM で学習した結果を図 4 に、補正 SOM で学習した結果を図 5 に示す. 括弧の付いたデータは学習を行った後、各データについて勝者を求めた結果を図 5 に示す. 括弧の付いたデータは学習時には与えられなかったデータである. 異なる尺度を通して得られたデータをそのまま SOM

で学習した場合は同じ動物でも別々の位置に写像されており、各動物の関係を知ることは困難である. 補正マップによる結果では同じ動物から得たデータはほぼ同じところに写像されているため、動物の分類を行えるようになっている. また、学習時に与えられなかったデータも同じ動物ならば近くに写像されており、このことから項目特性曲線に当たる多次元写像関係が SOMによって学習されていることが分かる.

#### 6. おわりに

本研究では、直接測定できない特性を評価する 手段として自己組織化マップを適用し、異なる 尺度を同一尺度に写像した. その結果、ごく簡 単なアルゴリズムによって、学習時に提示され なかったデータにも対応できるシステムを確立 し、異なる尺度でその特徴の値を変換された動 物の分類を可能にした. 今後の課題として、自 己組織化マップに学習された多次元写像関係の 情報をとり出し、分析することを検討している.

## 参考文献

- [1] T. コホネン 徳高平蔵/岸田悟/藤村喜久郎 訳 「自己組織化マップ」 (シュプリン ガー・フ ェアラーク東京,1996)
- [2] R. ビール T. ジャクソン 八名和夫 監訳 「ニューラルコンピューティング入門」 (海文堂,1993)
- [3] 徳高平蔵 岸田悟 藤村喜久郎 「自己組織化マップの応用」(海文堂,1999)
- [4] 芝祐順 「項目反応理論 基礎と応用」(東京大 学出版会,1991)
- [5] 豊田秀樹 「項目反応理論 入門編」(朝倉書店,2002)
- [6] 大友賢二 「項目応答理論入門」(大修館書店,1996)

#### 連絡先:

原潤

九州工業大学大学院生命体工学研究科

〒808-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-4

Phone: 093-695-6123 (山川教官室) Fax: 093-695-6133 (山川教官室) E-mail: <u>hara-jun@edu.brain.kyutech.ac.jp</u>

	大きさ	素早さ	強さ	毛深さ	かわいさ
ハト	0.2	2.2	0.3	2	0.5
アヒル	0.3	1	0.3	2	0.8
フクロウ	0.3	2.5	1	2.6	1.5
タカ	0.4	3	1.2	2.3	0.9
キツネ	0.5	1.6	0.9	1.7	1.5
ウサギ	0.3	2	0.2	1.6	3
イヌ	0.6	1.6	0.6	1.5	2
オオカミ	0.8	1.7	1.5	1.8	1.5
ネコ	0.3	1.3	0.5	1.8	2.5
トラ	1.2	1.3	2	2	1.8
ライオン	1.3	1.5	2	2.9	1.8
ウマ	2	2	1.5	1	2
ゾウ	3	1	2.5	0.7	1.9
クマ	1.6	1	2.2	2.5	2

表1 動物の特性

ライオン 6,1,2 クマ8,4		トラ4,5 ゾウ(5) クマ6	トラ6,1 クマ2 ライオン (4)		<b>*</b> 38	イヌ (5),(6) 本コ(2)	<del>9948,</del> 3		9941,2 <b>*34,5</b>
	٥٩١	<b>ク</b> マ5	1-5 (2),(3)		<del>494</del> 2		<b>ウサギ(5)</b>	<b>*</b> 31	
							434 994(4)		
<b>ライオン6</b> 人名ぐと			オオカミ3	アヒル(8) オオカミ (1)		173	4745		イヌ1,2 ネコ6 キツネ(4)
ゾウ2					キツネ(B)				
ולע				キツネ1,6 オオカミ4	フクロウ	アヒルセム		アヒル(1)	
オオカミ5 ウマ6	<b>97(4)</b>			オオカミ(6)	)		アヒル8		사 기 기 기 기 기 기 기
19¢				<b>タカ(3)</b>	フクロウ 8,(1)				
<b>978</b>			タカ1			フクロウム	3	ΛН	ハト(5)
<b>9</b> 72		9:04		オオカミ2		フクロウ6 タカ(2)		<b>/\}2</b>	ハト3,(6) 3,3なを

図4 異なる尺度による動物の分類

ハト5,6 アヒル4 タカ1 ウサイ2,3	八卜1 本二8	772 <b>24,</b> 6	ハト8 3,1ルナマ ライオン2		+978 51724	79098 9941,5	アとある タカ8 ネコ1 ソウ2 クマ4
9:56 *:32,4	<b>タカ6</b> イヌ2			アヒル8 キツネ5			
フクロウ8		4941,4 478	4942 436		タカ2 トラ4	ネコ5 ライオン6	<b>1</b> 页1 クマ2
フクロウ1		オオカミ5			<del>4743</del>		オオカミ
70002 434 978							
<b>⊅₹6</b>		アヒル2 タカ4 オオカミ1			オオカモ2 トラ1 ウマ5 クマ6		135 1-96 971
ゾウ6		<b>1-76</b>				<b>►78</b>	<b>-72</b>
<u> ラリポイ</u> ライオン1		<b>本二6</b>	<b>⊅</b> ₹8				<b>ライオン</b> ソウ4
ハト2 ウサイ8 ゾウ8 クマ5		사년 9 <b>막</b> 1			フクロウ4 ライオン6 ウマ2		<b>ספל</b> אולע

図5 補正マップによる分類

## 自己組織化マップ(SOM)による企業分析・評価手法の提案

A business analysis and evaluation method using SOM

井面 仁志\* Hitoshi Inomo 白木 渡\* WaIctaru Shiraki \*香川大学

Kagawa University

藤川 裕\* Yutaka Fujikawa \*\*(有)シー・エー・イー CAE Corporation 伊藤 則夫\*\* Norio Itou

**Abstract**: In order to know management conditions of business, the business analysis is performed. But it is necessary for technical knowledges of analysis and evaluation. In this study, a business analysis and evaluation method are using SOM(Self-Organizing-Map). By using this method, multi-dimensional data on business are put in position two dimensional map, so that it is easy to analyze and evaluate compared with traditional

#### 1. **はじめに**

methods.

今日、日本経済の低迷が長期化し不況が長引き、企業の倒産が相次ぐ中で、企業の業績の将来予測等の企業分析を的確に行い、効果的な対策を早期に実施することが求められている。従来の企業分析においては、経営者や経済の専門家の視点が優先され、投資家や従業員など専門的知識がない人々の視点が考慮されていない。

そこで、本研究では、自己組織化マップ(Self-Organizing-Map)[1]を使用し、企業の分析・評価を行うことで、専門的知識がなくても評価する側の立場や業種に応じた視点で企業の分析・評価を行うことが可能な手法を提案する.

#### 2. 従来の企業分析・評価法

従来の企業分析は主に以下の 2 つの方法で分析が行われている[2]。

1)趨勢分析:前期と当期の売上高を比較し、そ の変化による分析

2)比率分析:自己資本比率等、経営に関する項 目間の比率により企業の経営状 態を分析

企業の総合評価法としては、主に指数法とレーダーチャートによる評価がある[2][3]。

指数法は、ウォールが考案した評価法である。 指数法は、自己資本比率等の複数の主要比率を 各自の基準によりウェイトを付けて相対評価を 行い、各ウェイトの合計値が 100 となるように 調整した後、選択した各比率につき、業種の平 均比率等を各自の基準で基準比率を決めた上で、 それに対する評価対象企業の実際比率の割合と なる相関比率を算出し、各比率のウェイトと相 関比率を掛け合わせて評点とし、その合計値と ウェイトの合計値を比べて評価する方法である。 指数法による評価の例を表 1 に示す。

レーダーチャートによる評価法は、自己資本 比率等の指標において各自の評価基準により決 定した基準比率に対する実際比率の倍率を求め、 レーダーチャートを作成することにより、基準 に対する比較を行う方法である。レーダーチャ ートによる評価例を図1に示す。

ただし、指数法に関してはウェイトを各自の判断基準で決定する必要があるため、専門的知識が必要となる点や、ウェイトの合計を 100 点とする必要があるため、比率の数を多くし過ぎるとウェイトが小さくなる等の問題点がある。また、レーダーチャートも指数法と同様に基準比率の決定において専門的知識が必要となる。さらに、基準に対して大きな差が無い場合、差が明確に現れず、変化を見落としてしまう可能性がある等という問題点が存在する。

### 3. SOM による企業分析・評価

本研究では、企業の財務データをもとに SOM を用いて分析を行い、従来の分析方法とは異なった視点から経営者・株主・労働者の立場において、業種別、時系列別、業種の総合的な企業分析に適応可能な分析方法を提案する。

分析対象としては、数種の業種(スーパー、 百貨店、コンビニエンス・ストア、電力、電子 機器)の中から数社を選択し、業種別および時 系列別に 2001 年から 2003 年の各期末における

表1 指数法の評価例

比率	ウェイト	基準比率	実際比率	相関比率	評点
総資本経常利益率	40	10%	15%	150%	60
売上高営業利益率	30	30%	20%	66%	13
流動比率	20	200%	150%	75%	23
自己資本比率	10	25%	30%	120%	12
	100				108

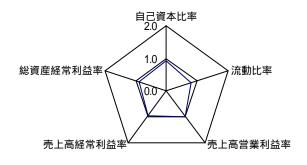


図1 レーダーチャートによる評価例

クラスター分析--ウォード法

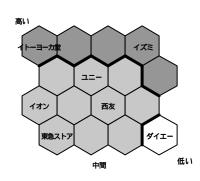


図 2 2002 年の総合評価 売上高営業利益率・・星み

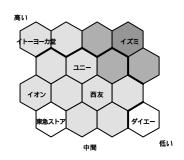


図 4 2002年の売上高営業利益率の重み

企業の財務分析を行うこととする。

入力データとして、自己資本比率、流動比率、 固定長期適合率、負債比率、有利子負債依存度、 売上高営業利益率、売上高経常利益率、売上高 増減率、総資産経常利益率、総資産回転率、売 上高原価率、売上高販管費率の経営指標を用い、 ROE、ROA、1株益、1株配当、配当性向、従業員 増減率、平均年収およびクラスター分析のウォード法による総合評価をラベリングに用いる。 なお、企業の財務データは、主として東洋経済 新報社の会社四季報を参考にして抜き出し、そ の中にある経営指標のいくつかを SOM による解 析データとして使用する。

紙面の都合上、以下に 2002 年と 2003 年のスーパー業界の分析結果を示す。図 2 に 2002 年のスーパー業界の総合評価を示す。図 2 より、イトーヨーカ堂、イズミが高く、ダイエーが低く評価されていることが分かる。

この評価と各入力データの重みマップと比較した場合、図3より、自己資本比率の低いダイエーに重みが小さいニューロンが集まっており、自己資本比率が低い企業は評価が低いことが分かる。さらに、図4より、売上高営業利益率の

自己資本比率--重み

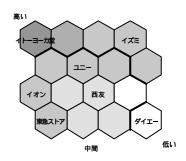


図3 2002年の自己資本比率の重み

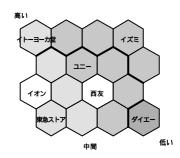


図 5 2002 年の売上高原価率の重み

低いダイエーに重みが小さいニューロンが集まっていることより、利益が低いと経営が危ないことが分かる。図 5 より、売上高原価率の重みはイトーヨーカ堂が小さく、イズミが中間、ダイエーが大きくなっている。

図 6 に 2003 年のスーパー業界の総合評価、図 7 から図 9 に、それぞれ自己資本比率、売上高営業利益率、売上高原価率の重みを示す。図 2 と図 6 を比較すると、2002 年にはイトーヨーカ堂とイズミが高く、ダイエーだけが低く評価されているが、2003 年ではイズミと西友の評価が低下し、イトーヨーカ堂のみが高く、ダイエー、西友が低く評価されていることが分かる。

次に、総合評価の変化の原因を調べるため、 各入力データの 2002 年と 2003 年の重みマップ を時系列別で比較を行う。図 3 では、西友はダ イエーより自己資本比率の重みが大きいが、図 7 では、西友の自己資本比率の重みが小さくなっ ていることが分かる。図 4 と図 8 を比較した場 合、2003 年の西友の売上高営業利益率の重みが 小さくなっていることが分かる。また、2002 年 に比べて、イトーヨーカ堂の売上高営業利益率

クラスター分析--ウォード法

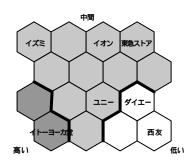


図 6 2003 年の総合評価 売上高賞業利益率・重み

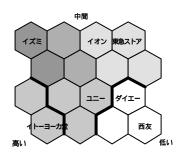


図8 2003年の売上高営業利益率の重み

の重みが大きくなっていることが分かる。図5と図9を比較した場合、西友の売上高原価率の重みが大きくなっていることが分かる。また、イズミの売上高原価率の重みも大きくなっていることが分かる。以上のことから、時系列で分析を行うと、西友は自己資本比率、売上高営業利益率が低下したことにより、総合評価が低くなったことが分かる。また、イズミの総合評価の低下の原因は、イトーヨーカ堂の売上高営業利益率が上昇し、イズミの売上高原価率が上昇したことにより、イトーヨーカ堂とイズミの間に格差が生じたことが原因と考えられる。

#### 4. 従来の分析・評価法との比較

SOM による分析結果と指数法による結果との比較を行う。比較の対象としては 2003 年のダイエーの評価に注目する。今回の基準比率は 2003 年のスーパー業界の比率の平均値(ただし、本研究で選んだ数社のみ)とする。指数法による 2003 年のダイエーの分析結果を表 2 に示す。

表 2 より、ウェイトの合計値と比べて指数法 によるダイエーの評点の合計値が低いことが分

自己資本比率--重み

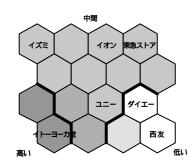


図7 2003年の自己資本比率の重み

売上高原価率--重み

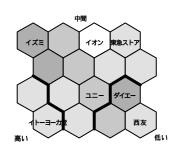


図 9 2003年の売上高原価率の重み

かる。さらに、各ウェイトと各評点を比較しても ダイエーの各評点の方が低いことが分かる。ま た、図7、図8より、ダイエーはイオン等のグル ープよりも自己資本比率や売上高営業利益率の 重みが小さいことが分かる。このことから、SOM は指数法と同様の分析が可能である。その他、以 下に示す指数法の欠点を補うことができる。指 数法は、ウェイトの合計値を 100 点とする必要 があるため、主要比率の数が多すぎるとウェイ トが小さくなるが、SOM では、そのような制約が 無いため多種多様な比率を用いた分析・評価が 可能である。また、指数法では、売上高原価率 のように数値が高いほど評価が低くなる比率は、 比率毎にウェイトと評点を比較することは可能 であるが、そのような比率を含んだ総合評価を 行うことはできない。しかし、SOM では重みで評 価を表現するため、売上高原価率のような特性 を持つ比率を含めた総合評価が可能となる等の 利点がある。

次に、レーダーチャートによる評価と比較を行う。指数法と同様に 2003 年のダイエーを比較の対象とする。また、基準比率も指数法と同様に 2003 年のスーパー業界の比率の平均値(本研究で選んだ数社のみ)とする。レーダーチャートによるダイエーの分析結果を図 10 に示す。図 10より、ダイエーはスーパー業界の平均と比べて

表 2 指数法によるダイエーの評価結果

比率	ウェイト	基準比率	実際比率	相関比率	評点
自己資本比率	20	28.00%	6.30%	23%	4.6
流動比率	20	74.77%	66.24%	89%	17.8
売上高営業利益率	20	2.04%	1.00%	49%	9.8
売上高経常利益率	20	1.95%	0.93%	48%	9.6
総資産経常利益率	20	2.99%	1.12%	37%	7.4
	100				49.2

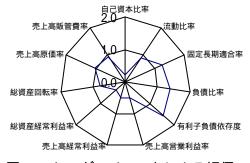


図 10 レーダーチャートによる評価

自己資本比率等が低く、負債比率等が高いことが分かる。また、図7、図8、図9より、ダイエーはイオン等のグループよりも自己資本比率や売上高営業利益率の重みが小さく、売上高原価率の重みが大きいこと等から、SOM はレーダーチャートと同様の分析ができることが言える。レーダーチャートは各項目を一度に見ることができて便利であるが、微妙な数値の違いが見えにくいという欠点がある。これに対して、SOM では重みによって違いをはっきり表現できており、微妙な違いを視覚的に表現することが可能であるという利点がある。

#### 5. **おわりに**

本研究では、SOM による企業分析・評価を行い、 企業の経営状況や経営における姿勢を把握する ことができた。さらに、従来の企業分析・評価 法と同様に、企業の特徴を捉えることができる だけでなく、可視化により理解しやすくなるこ とを示した。

しかし、より詳細に企業の特徴について把握するためには、企業分析・評価の専門家の意見を取り入れたデータの選別の必要性がある。

#### 参考文献

- [1]伊藤則夫:「ニューラルネットアシスタント 第 2 編 理論解説書」、有限会社 CAE.
- [2]山口孝・山口不二夫・山口由二:「企業分析[増補版]事例による資料の見方から評価・解釈まで」、白桃書房、2001.
- [3] 嶌村剛雄:「経営分析の基礎<三訂版> 」、中央経済社、1989.

#### 連絡先

〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20 香川大学工学部 井面 仁志

電話: 087-864-2245 FAX: 087-864-2245

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

## 自己組織化マップを用いたベイジアン・ネットワークの評価方法

A proposal of test method for Bayesian Network by using Self-Organizing Maps

多田薫弘 Kunihiro Tada マインドウエア **Mindware** 

Abstract: In this paper we propose the test method for Bayesian Network by using Self-Organizing Maps (SOM). In order to emulate Bayesian Network by using SOM, the generalization capability of SOM was improved by adding pseud-cases to original training data set, so that SOM can inference new cases which ware not included in the original training data set. Further, in order to estimate the potential structure of training data set, the potential factor's values were estimated from associated map and they ware merged original data set. A local regression map from the data set helps to estimate causal relation between observed attributes and potential factors.

#### 1.背景と目的

自己組織化マップ(SOM: Self-Organizing Maps)中の活用法の1つとして,ベイジアン・ネットワーク(BN: Bayesian Network)と同様に条件つき確率を推論することが可能である.たとえば,学習データの変数(特性)がカテゴリ変数で,1(真)または0(偽)の値を取るとして,今,ある特性が真であるという1つの状態(ステート)がある場合,SOM表現上でその特性に対応する要素が1の値を持つ領域を選択すれば,選択されたマップ領域内における各特性値の平均が,その特性が真であることの確率を近似していると解釈できる.

もし特性が3つ以上の状態値を取る場合は, 各状態を名義変数として取り扱うことによって, あらゆる状態を SOM で表現することができる. 複数の特性に関する状態値を組み合わせて表現 するには,各特性の状態値によるマップ領域を AND 演算する.こうすることにより,SOM を 用いて学習データに関する条件つき確率を近似 することができる.

SOM は元データの圧縮版であるので,大規模なデータ容量を縮小できるが,それでもデータの非線形な特徴を捉えた高品位なマップを得るには数 MB の容量となるのが通常である.言い換えると,SOM はデータについての多くの情報を効率的に保持するが,「大まかな判断結果だけが必要であり,詳細な情報は必要でない」という実際的応用ではあまり経済的でないこともある.一方,BN は判断に必要な条件つき確率表(CPT: Conditional Probability Table)さえあればよいので,モデルを格納するのに必要なメモリ容量は SOM よりはるかに小さい.

しかしながら, BN の場合, CPT を作成する 前段階として, ネットワーク構造を決定しなけ ればならない. ネットワーク構造は, 変数間の 従属・非従属関係を有向グラフにすることで決定するのだが,実際にはこの段階で矢印の方向(原因・結果)を決定するのはユーザの知見によらなければならないことが多い.一方,SOMの場合は,データについての事前知識がまったくない状態からでも一気にマップを作成できるので素早く容易に推論の基盤を構築できる利点がある.

したがって、組み込み用 BN の開発には、学習時に SOM を用いて、最終的な推論(判断)モデルは SOM から切り離して、BN として構築して機器に組み込むというのが理想的であろう、また手続き的・階層的判断が可能な場合は、BNの代わりに決定木(Decision Tree)を用いることも1つの選択であろう、

そこで本研究では,SOM でBNの動作をエミュレートして,BNの設計段階を支援する方法を検討する.

本研究の要点は,次の3点である.

- (1) 擬似ケースの混入により, SOM の未学習ケースの問題を回避する.(汎化性の向上)
- (2) 連想マップにより潜在因子の分布を推定して,混沌としたデータの潜在的構造を明確にする.
- (3) (2)の SOM により階層化の方略を得て ,階層 化され ,かつ潜在因子を導入した BN を構築 する .

#### 2.ベイジアン・ネットワーク

実験では,SOM の代表的ツールとしてEudaptics software gmbh 社の Viscovery® Profiler[2]及び Predictor[3]を,BN の代表的ツールとしてHugin Expert 社のHugin (GUI)[4]を用いて,Hugin に事例として添付されているAsia.net についての検討を行う.図 1 が,Asia.net の有向グラフである.

このネットワークは,

A: アジアに行ったか?

S:タバコを吸うか?

T: 結核にかかっているか?

L:肺がんにかかっているか?

B: 気管支炎にかかっているか?

E: 結核もしくは肺がんにかかっているか?

X:レントゲン診断が陽性か?

#### の条件から、

#### D: 呼吸困難になるかどうか?

の確率を推論することができる .BN の特筆すべき特長は,必ずしもすべての条件についての確定情報がなくても,それなりに推論が成立するという柔軟性にある.

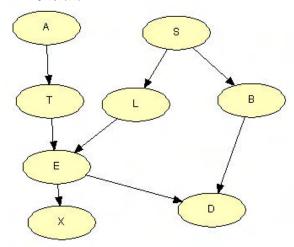


図 1 BN の有向グラフ (Asia.net)

Hugin には Asia.dat というデータが添付されており、上記の 8 個の特性について、それぞれyes, no, N/A(不明)の 3 つの状態値を取る10,000 件のケースからなっている。このデータを Hugin に内蔵された NPC(Necessary Path Condition)アルゴリズムを用いて Structural Learning(構造学習)すると、上記の有向グラフが得られる。実際には変数間の従属・非従属から矢印の示唆情報が与えられて、ユーザが事前知識を加味して、有向グラフを完成させる。

そして EM 学習で CPT のパラメータを決定することによって,実際に推論を実行できるようになる.構築されたネットワークを使って,さらにケース生成機能でシミュレーション・ケースを生成できる.

構築された BN が正しい動作をしているかどうかをテストすることが必要になる .BN の目的は不確定性の高い現象についての的確な判断を行おうということなので正解率を見ることは本質的ではなく ,BN が推定した条件つき確率と元データから厳密に計算した条件つき確率を比較するべきである .しかし ,これにも問題がある .BN の汎化能力によって ,元データにはないケースについても推論できるが , これをどのように

評価するべきかの基準を作る必要がある.そこで,SOM を使えばより簡単でもあり,またさらに深い知見を得ることができる.「構築されたBN がはたして正しい動作をしているのか?」を素早く知る 1 つの手がかり(比較対象)としてSOM を活用する.

### 3.未学習ケースへの対応

ただし、SOM を用いても、通常の方法では元データにないケースには対応できない。SOM は学習データの空間を要約するので、新しいケースが学習したデータ空間の中にある場合は、新しいケースを判断することができるが、新しいケースが学習データ空間からまったく外れているような場合は、マップ領域の AND 演算の結果、対応するマップ領域がゼロとなるので推論が成立しない。実用上、未学習ケースが生起する確率が極めて低いと判断されるなら、SOM が提供する推論結果は BN よりも正確なものと予想される。本研究では、BN の動作を確認するのが場はなって、学習データに含まれない極端なケースについても実験を行うために、確定値の状態を直交表に割り付けて実験を行う.

そこで SOM が未学習ケースにも対応できるように擬似ケースを混入したデータを用意して,これについても SOM で学習を行う. もちろん,擬似ケースは元の学習データの分布を著しく変えてしまうほどであってはならない. 実験では10,000件のケースを持つ学習データ Asia.datに 64 件の擬似ケースを混入した. A, S, T, L, B, Xの 6 つの特性について,確定値のない不明の状態を無視すれば,それぞれ yes, no の 2 状態があるので 64 通り( $2^6$ )ですべての状態を表現できる. ちなみに擬似データの E と D は欠損値(不確定)にしておく. E は,L または T のいずれかが yes の場合に yes となるので完全に従属(決定論的)であり,D は推論しようとしている目的の変数である.

さらにより正確な条件つき確率の推定のために,条件つき確率は,選択されたマップ領域における際整合ノードでの得点の総和を度数で除したものでなければならない.

推論結果のテストは, A, S, T, L, B, Xの6つの特性を yes, no 及び不確定(N/A)の3水準として,L27直交表に状態を割り付けて27回の実験を行った.

実験結果は、擬似ケースなしの SOM(SOM1)、 擬似ケースありの SOM(SOM2)、SOM1の未 学習ケースのみに SOM2の値を使用した SOM3、 及び BN について、データベースのソーティン グによる条件つき確率を基準とした分散(平均2 乗誤差の平方根)を比較する.

表 1 各モデルの分散比較

SOM1	SOM2	SOM3	BN
9.446254	20.47332	20.23521	20.41434
ま 1 がその	D	SOM 1 H	<b>キ</b> っとも

表1がその結果である.SOM1は,もっともデータベースからの条件つき確率(DB)をよく近似しているが,未学習ケースの問題が存在するので,SOM3をより理想的な推論結果と考える.結果的にSOM3とBNの結果はよく適合している.

することはできないが,条件つき確率を計算してモデルに組み込むことはできる.

図 3 は,特性Dを順序づけに寄与させないマップのオリジナル・データの場合と潜在変数 V を導入した場合の比較である.潜在因子を導入したマップは D の値が 1 の領域と 0 の領域がよりきれいに整理されたマップとなっていることがわかる. Visovery® Predictor の SOM ローカル回帰モデルによる残差の比較は以下のとおりである.

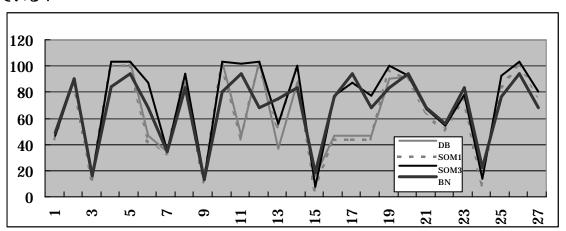


図 2 各モデルの推論結果比較グラフ

SOM3 と BN(従属変数)の結果の線形回帰分析の結果は次のとおりである.

線形回帰モデル:

 $BN = 11.12 + 0.76 \times SOM3$ 

修正済み R2:0.868 F値:171.878

P値:<0.0001

#### 4. 潜在因子の抽出

結果的に上記の BN モデルは,ほとんど修正の必要がないことがわかるが,SOM を用いることにより,データの潜在的構造が見えるので,さらに高度なモデルの可能性を探ってみる.

呼吸困難の直接的原因として考えられるのは、肺がん・結核・気管支炎などの病気と考えられる.これらの病気にかかっていても、必ずしも呼吸困難にはならないというのは不確定性として一応解釈できるが、SOM のマップを観察するとこれらの要素 ( L, T, B ) がすべて no となっている場合でも、D (呼吸困難)が yes となっている場合がある.これらのケースは、観測されていない未知の要因によって呼吸困難が引き起こされると考えられる.そこで、SOM 上での領域とれると考えられる.そこで、SOM 上での領域とい変数を作成する.この変数は観測されていないので、BN を実行する際に確定値として入力

潜在因子を導入しない場合の残差:

線形モデルで説明された分散: 45.4% 非線形モデルで説明された分散: 7.8% 残差: 46.8%

潜在因子を導入した場合の残差:

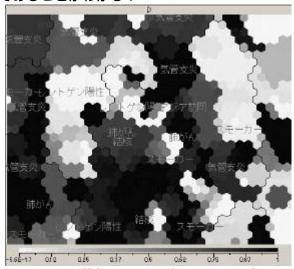
線形モデルで説明された分散: 64.7% 非線形モデルで説明された分散: 28.3% 残差: 7.0%

潜在因子の導入により残差が劇的に減少するが,潜在因子が観測されていないので,これは予測モデルとしての性能を表すものではない.減少した残差の分だけ,潜在因子によって分散の理由づけをしたという意味である.この場合の潜在因子の目的は,データの構造を明確にすることである.

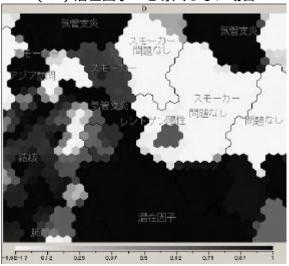
一般論的には、さらにこの潜在因子を目的変数として、線形重回帰モデル及び SOM ローカル回帰モデルを作成することにより、より深く潜在変数を解釈する助けとなるはずである.ただし、潜在因子 V に関する線形重回帰の結果は、ほとんど有意な関係が認められなかったので省略する.

図 3(b)のマップの左側の「アジア訪問」「結核」「肺がん」の 3 つの領域には,全体の 9.5%のケースが対応する.つまり,全体の 90.5%は,「アジア訪問」、「結核」、「肺がん」には該当せず(当

然の結果ではあるが)気管支炎または潜在因子がなければ,呼吸困難にはならない.「潜在因子が何であるか?」ということは,このデータからはわからない.それは全体の7.9%であるので,潜在因子によって判断を間違える危険率は7.9%であることがわかる.



(a)潜在因子Vを導入しない場合



(b)潜在因子 V を導入した場合図 3 特性 D を順序づけに寄与させないマップ

#### 5.階層化モデルの作成

したがって全体の 90.5%は,図 4 のような決定木によって,BN よりも正確な確率を判断できる.A,T,L が no で B が no の場合,正確な確率は 12.1%であるが,BN では 10%となった.同様に B が yes の場合は,75.4%に対して BN では 80%となった.

一方,「アジア訪問」「結核」「肺がん」の領域は,明らかに前述の領域とは異なっているので,この領域に対応するデータのみを抽出してより詳細なモデルを作成する.

図5は,そのマップである.D(呼吸困難)は (マップの左端の部分を除いて)全体的に,E(結 核または肺がん)と B (気管支炎)と相関があることが視覚的には判断できる. そして左端の部分は,潜在因子 V (観測されていない)と一致している.

したがって,気管支炎でなく(B<0.5),呼吸困難(D 0.5)の領域の分散が説明できれば,マップの構造がより整理されるはずである.再びWという潜在因子を仮定する.図6がそのマップである.潜在因子Wが観測されないことによる誤判断の危険率は約21%である.

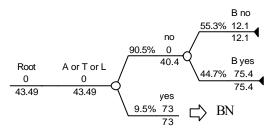


図 4 全体の決定木

#### 図5のマップの残差:

線形モデルで説明された分散: 32.6% 非線形モデルで説明された分散: 6.2% 残差: 61.2%

#### 図6のマップの残差:

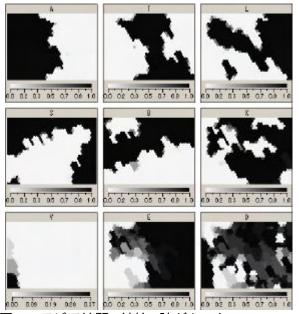
線形モデルで説明された分散: 62.6% 非線形モデルで説明された分散: 23.0% 残差: 14.4%

図 7 の(a),(b)は ,それぞれ図 5 及び図 6 のマップにおける F 値の有意水準である . マップの暗い領域が有意なモデル及び高度に有意なモデルの部分である

ただし、この SOM ローカル回帰モデルは、Dの状態値を予測するためではなく、データの構造を解釈するためである。W を目的変数とした線形重回帰分析の結果は、修正済み決定係数0.476 であり、各変数の回帰係数は以下のとおりである、十分ではないが幾分は解釈の助けとなる。

T: 0.18276012 B: 0.30620848 L: 0.11317900 X: 0.05806980 S: -0.08879527 V: -0.66618502 A: -0.19579882 切片: 0.38213270

SOM ローカル回帰モデルでは ,さらに 15.8% の分散が説明できて , 残差が 36.6%となった .



アジア訪問・結核・肺がんのケースのマッ

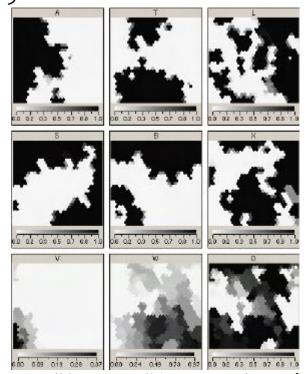


図 6 潜在因子W を導入したDの回帰マップ

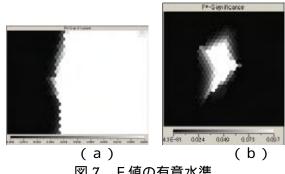


図7 F値の有意水準

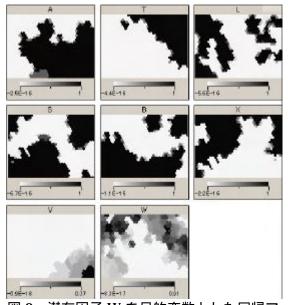


図8 潜在因子Wを目的変数とした回帰マッ

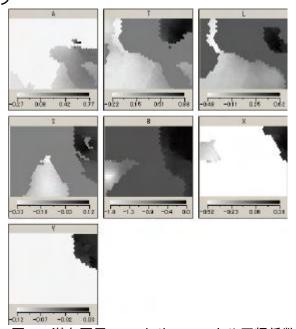


図 9 潜在因子 W のためのローカル回帰係数

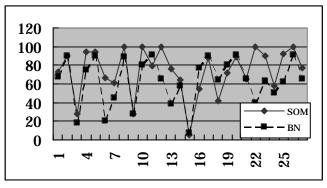


図 11 アジア訪問・結核・肺がんのケースにお ける SOM と BN の比較グラフ

上記の結果を踏まえて,「アジア訪問」「結核」 「肺がん」の領域の部分 BN モデルを作成する. 図 10 が,その有向グラフである.

線形回帰モデル:

 $BN = 12.20 + 0.69 \times SOM$ 

修正済み R2:0.468 F値:23.864

P 値: < 0.0001

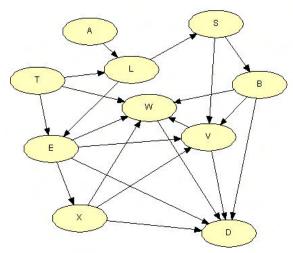


図 10 アジア訪問・結核・肺がんのケースにおける BN モデルの有向グラフの例

#### 6.考察

SOM の汎化能力を向上させるために擬似ケースを混入する方法がよく役立つことがわかった.これは BN のエミュレートに限らず,広く応用できると考えられるので,今後も引き続き検討を重ねて行きたい.

SOM の上では従来の統計的な潜在変数とは違った意味での潜在している変数を発見できる.つまり,それは潜在する概念的要素の発見であり,推論の基盤に SOM のようなパターン認識あるいは連想が存在するということを示唆していると考えられる.今後,潜在変数を用いる他の統計手法と SOM の併用についても検討して行きたい.

## 参考文献

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

[2] Eudaptics softwer gmbh, "Viscovery® Profiler version1.2 User's manual", 2001, Vienna.

[3] Eudaptics softwer gmbh, "Viscovery® Predictor version1.1 User's manual", 2002, Vienna.

[4] Hugin Expert A/S, "Hugin GUI Help",2003, Aalborg,

#### 連絡先:

多田薫弘

合資会社マインドウエア

〒703-8243 岡山県岡山市清水 2 丁目 3-10

TEL./FAX. 086-901-0860

E-mail <u>tada@mindware-jp.com</u>
WWW http://www.mindware-jp.com/

very® 2002,

## ジャンケンに見られるヒトの意思決定様式のSOM 解析

## 

# SOM-Based Analysis of Human Decision-Making Style in Janken Game

— Part-II An Interpretation of Acquired Feature Maps —

和久屋 寛 Hiroshi Wakuya 谷川昌弘

Masahiro Tanigawa

佐賀大学理工学部電気電子工学科 Faculty of Science and Engineering, Saga University

**Abstract**: According to the game theory, the mixed strategy is the best way to play a *Janken* game. But when we play it, some tendencies depending on our own decision-making style are contained in the actual recorded sequences. Then, in this article, a SOM-based analysis is performed to investigate its property. As a result, it is clear that acquired feature maps reflect subject's personalities successfully, and the further considerations are carried out especially for understanding their configurations.

#### 1. はじめに

自己組織化マップ(Self-Organizing Map: SOM)とは、高次元空間から2次元平面への隣接関係を保持した座標変換機であり、その入出力関係を特徴マップとして可視化できるという性質がある $^{(1)}$ 。そのため、これまでに多方面で様々な用途に利用されているが、我々の身のまわりに満ち溢れている時間とともに変化する情報(時系列情報)を本質的に扱えないという欠点を有していた。そこで、この問題を克服するため、これまでに様々な検討が試みられている $^{(2)-(4)}$ 。

ところで、我々がある行動の選択に迫られた場合、概して、自分自身の過去の経験と照合して決断することが多い。このように考えると、ヒトの意思決定も過去の履歴情報を基に為される一種の時系列信号処理とみなすことができよう。ここでは、この意思決定に関わるものの一例として、ごく単純であり、かつよく知られたゲームでもあるジャンケンについて検討する。

ジャンケンとは、グー、チョキ、パーの3種類の手を出して勝敗を競うものである。ゲーム理論よれば、ランダムに各手を出す混合戦略を採用することで、大きく勝ち越す可能性は減るものの、大きく負け越す危険性も抑えることができる<sup>(5)</sup>。しかし、我々がジャンケンを行う場合は、そこに各人の個性や癖などが反映されているはずであり、また相手に勝つことを強く意識すれば、そこには勝つための戦略が含まれてくるはずである。

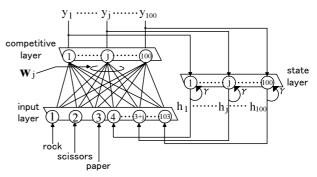


図 1. フィードバック SOM (ジャンケンの対戦データ解析用に一部改変)

そこで本稿では、このようにして得られた一連の対 戦経過にSOM解析を行うことで、ヒトの意思決定様式 の解明を試みる。以下では、まず2.でSOMの構造に ついて概観し、3.でジャンケンの対戦データ取得のた めの心理物理実験、4.でSOM解析に関わる計算機シ ミュレーションの結果について言及する。また、5.で は本解析手法の現状における問題点などについて考察 し、最後に6.で結論を述べる。

#### 2. フィードバック SOM

後述のジャンケンの対戦データの解析には、図1に示すフィードバック $SOM^{(3)}$ を用いた。これは、通常のSOMの競合層まわりに過去の履歴情報を参照できるようにフィードバック結合を付加した構造であり、入力層 x、競合層 y、状態層 h の3層から成る。より具体的には、先に提案したElman型フィードバック $SOM^{(4)}$ 

から出力層を除去し、解析に必要な部分のみを残した 構成である。このとき、時刻tにおける状態遷移則は以 下のとおりである。なお、xと  $\beta h$ を並べた正味の入 力信号  $I = (x, \beta h)$  は事前に規格化しておく。

$$u_{j}(t) = \sum_{i=1}^{L} w_{ji} x_{i}(t) + \sum_{i=1}^{M} w_{j,L+i} \beta h_{i}(t)$$

$$= \sum_{i=1}^{L+M} w_{ji} I_{i}(t)$$
(1)

$$j^* = \arg\max_j u_j(t) \tag{2}$$

$$y_j(t) = \begin{cases} 1, & j = j^* \\ 0, & j \neq j^* \end{cases}$$
 (3)

$$h_j(t) = (1 - \gamma)y_j(t) + \gamma h_j(t - 1)$$
 (4)

ここで、 $j^*$ は競合層の勝者ニューロンの番号、 $\beta$  は入力層において過去の履歴情報を参照する比率、 $\gamma$  は状態層において過去の情報を保持する比率(1次遅れ特性の時定数に相当)である。

## 3. 心理物理実験: ジャンケンの対戦データの 取得

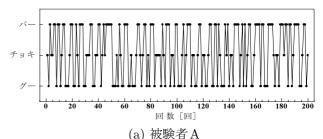
ここでは成年男子13名を被験者として採用し、これを1人(被験者 X)と12人(被験者 A、B、C、...、L)の2グループに分けて、ジャンケンの対戦をさせた。したがって、対戦総数は全部で12回である。これは、被験者 X の特性が実験期間中を通して一定であると仮定し、以後の解析では相手方の被験者 A  $\sim$  L の対戦データのみを用いるためである。なお対戦の際には、研究内容を事前に説明して十分に理解してもらい、特に"勝つこと"を意識して連続 200 回の勝負に臨むように依頼した。

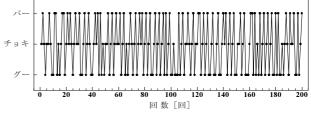
このようにして得られた対戦データを図2に示す。ただし、紙面の制約で代表的な4名(被験者A~D)のみとする(以下同様)。また、各手の出した割合を調べた結果が表1である。これらを一瞥すると、各手をランダムに出そうとした者、同じ手を頻繁に繰り返した者など、様々な傾向が観察された。

## 4. 計算機シミュレーション: ジャンケンの対 戦データの解析

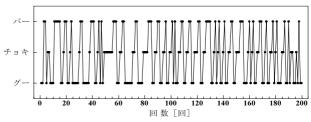
#### 4.1 方 法

ここでは、3.で取得したジャンケンの対戦データの解析を、図1に示すフィードバック5OMを用いて試みる。入力層、競合層、状態層のニューロン数は、それぞれ103個(=3個+100個)、100個(=100個×100個)、1000個である。このうち、入力層の最初の30のニューロンは、それぞれ新規の入力情報(グー、チョキ、パー)を与えるものである。入力データには、12人のグループ





(b) 被験者B



(c) 被験者 C

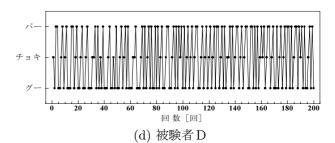


図 2. ジャンケンの対戦データ

表 1. 各被験者が出した手およびその割合

	グー チ	ョキ パー	合計
被験者A		49 84 1.5%) (42.0%)	200 (100%)
被験者B	. –	68 61 4.0%) (30.5%)	200 (100%)
被験者C	~-	58 60 0.0%) (30.0%)	200 (100%)
被験者D		43 73 1.5%) (36.5%)	200 (100%)

の各被験者  $A\sim L$  の対戦データのうち、 $31\sim 130$  番目の合計 100 個を取り出して、それぞれ異なる SOM に 5000 回の学習を行わせた。 なお、フィードバック SOM では過去の履歴情報の取り扱いに関わる重要なパラメータとして  $\beta$ 、 $\gamma$  が挙げられるが、予備的な実験を行った結果、以下では  $\beta=1.0$ 、 $\gamma=0.1$  を採用することとした (6) 。

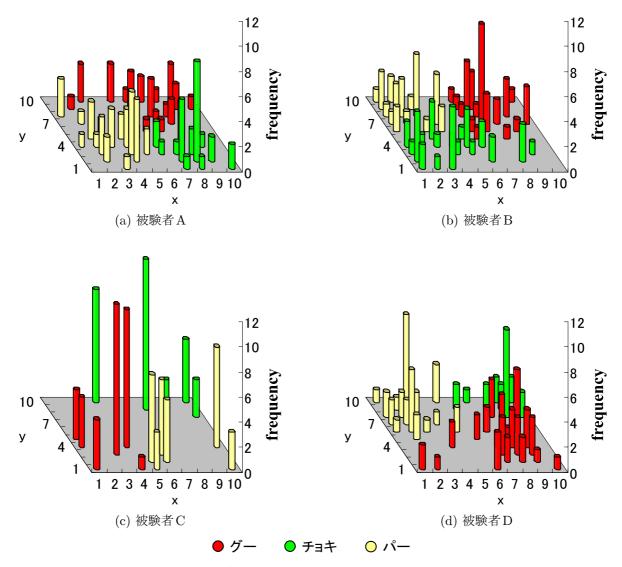


図 3. SOM によるジャンケンの対戦データの解析結果(1) ―勝者ニューロンの出現場所とその頻度に着目

#### 4.2 SOM を用いた解析結果

さて、上述のように定めたパラメータを用いて、ジャンケンの対戦データの解析を行った結果を図3に示す。これは、学習終了後に100時刻分の学習済み対戦データをSOMに入力し、そのとき、競合層上に現れた勝者ニューロンの場所とその頻度を表したものである。ここでいう頻度とは、特定のニューロンがどれだけ多くの異なる入力に対して勝者になったかということであり、勝者ニューロンが同じ座標に多く出現するほど縦棒が長くなるように表現している。なお、図中のx,yは競合層上の座標を示すが、SOMは初期結合荷重に応じて上下左右方向の任意性があるため、お互いの相対的な位置関係のみが重要となる。

この図から、被験者A、B、Dと比較して、被験者Cは特定のニューロンが勝者となる傾向が強いということがわかる。また概観については、被験者A、Bの間に顕著な差異は認められないが、被験者Dはやや勝者ニューロンの出現箇所が少ないようにも見受けられる。次に、各手(グー、チョキ、パー)の情報を入力し

たときの勝者ニューロンの分布に着目したものを図4 に示す。これは、ちょうど図3を"真上"から眺めたも のに相当する。このとき、各マップ上で勝者となった ニューロン数を表 2に、各被験者の学習用入力データに 占める各手の出現回数を表3にまとめておく。一例とし て被験者Aについて考えてみると、勝者ニューロン数 は多い順に「グー→パー→チョキ」であるのに対して、 各手の出現回数は多い順に「パー→グー→チョキ」で あった。どちらもチョキが最も少ない点では一致して いるものの、残りのグーとパーは順番が入れ替わって いる。入力データの多いものほど学習が進行し、特徴 マップ上で広い領域を獲得するというSOMの性質を考 えると、これは矛盾しているように思える。そこで、こ の原因が過去の履歴情報にあるとみなし、現在と1時 刻前の手の間の状態遷移表を求めたところ、表4のよう になった。これによると、現在の手がグーのとき、1時 刻前の各手はほぼ均等の出現回数となっている。これ に対し、現在の手がパーのときは、1時刻前もパーであ ることが多く、パーに至るまでの履歴系列に出現頻度

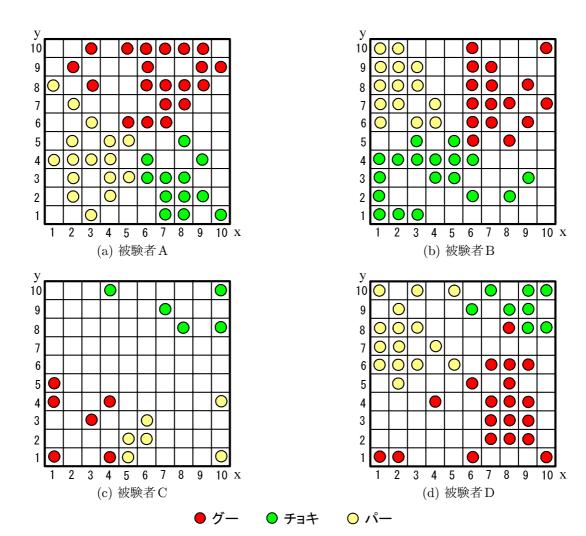


図 4. SOM によるジャンケンの対戦データの解析結果 (2) ―各手に対応する勝者ニューロンの出現領域に着目

表 2. 学習済み SOM の各手に対する特徴マップ上の勝者ニューロン数

	グー	チョキ	パー	合計
被験者A	20	12	16	48
被験者B	16	18	14	48
被験者C	6	5	6	17
被験者D	20	8	15	43

表 3. 学習用入力データに占める各手の出現回数

	グー	チョキ	パー	合計
被験者A	34	29	37	100
被験者B	36	35	29	100
被験者C	36	32	32	100
被験者D	43	23	34	100

の偏りがあったことがわかる。すなわち、オートマトン的な考え方をすれば、フィードバック SOM は過去の履歴系列に応じて異なる"内部状態"をとることでそれぞれを区別するため、履歴系列の種類が多い場合は、競合層上に現れる勝者ニューロン数を増やすこと(分

布範囲も広くすること)で対処していると思われる。 以上のことから、被験者 A はパーを出す回数自体は多 かったものの、それまでの履歴に"多様性"が少なかっ たため、勝者ニューロン数ではグーの方が逆転して多 くなったのではないかと考えられる。

このようにして得られた結果をまとめると、以下の 2点に集約できる。

- i). 各手の出現回数が増すほど、対応する勝者ニューロンの分布範囲は広くなる。
- ii). 各手を出すまでの履歴系列の多様性が増すほど、 対応する勝者ニューロンの分布範囲は広くなる。

一般に、多岐にわたる手を出す被験者ほど意思決定様式は複雑であり、特徴マップ上で勝者ニューロンの出現場所は分散するが、そうでなければ単純なものとなり、集中してしまうと考えられる。

#### 4.3 統計的解析手法との対応

これまでSOMによって獲得された特徴マップを定性 的に解析したが、ここでは従来からある統計的な解析 手法との対応について、定量的な視点を一部交えて検 討する。

表 4. 学習用入力データの現在と1時刻前の手の関係

#### (a) 被験者A

			1時刻前					
		グー	チョキ	パー	合計			
	グー	12	10	12	34			
現	チョキ	16	9	4	29			
在	パー	7	10	20	37			
	合 計	35	29	36	100			

#### (b) 被験者B

		. ,						
			1時刻前					
		グー	チョキ	パー	合 計			
-	グー	7	6	23	36			
現	チョキ	25	4	6	35			
在	パー	3	25	1	29			
	合 計	35	35	30	100			

#### (c) 被験者 C

			1時刻前				
		グー	チョキ	パー	合 計		
	グー	21	0	15	36		
現	チョキ	13	19	0	32		
在	パー	2	14	16	32		
	合 計	36	33	31	100		

#### (d) 被験者 D

		1時刻前								
		グー	チョキ	パー	合 計					
	グー	12	2	29	43					
現	チョキ	20	2	1	23					
在	パー	12	19	3	34					
	合 計	44	23	33	100					

さて上述のように、特徴マップ上の勝者ニューロン数 (領域の広狭) は各手の出現確率の偏りと関係がありそうである。情報通信工学の分野では、すべてを確率的な現象と仮定し、情報の価値をその出現頻度に基づいて定めるという学問が"シャノンの情報理論"として体系化されている†。そこで、この考え方を参考にして、上で得られた SOM 解析の結果と比較を行ってみよう。

以下、必要に応じて、現在の手がグー、チョキ、パーの場合を記号で  $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 、 $\phi_3$ 、1時刻前の手がグー、チョキ、パーの場合を  $\psi_1$ 、 $\psi_2$ 、 $\psi_3$ と表記する。まず被験者 A の場合であるが、表 4(a) に示す結果を利用すると、次のようになる。

• 現在の手がグー  $(\phi_1)$  のとき:

$$p(\psi_1|\phi_1) = \frac{12}{34}, \ p(\psi_2|\phi_1) = \frac{10}{34}, \ p(\psi_3|\phi_1) = \frac{12}{34}$$

$$H_{\mathcal{A}}(\Psi|\phi_1) = -\sum_{j=1}^{3} p(\psi_j|\phi_1) \log_2 p(\psi_j|\phi_1)$$

$$= -\frac{12}{34} \log_2 \frac{12}{34} - \frac{10}{34} \log_2 \frac{10}{34} - \frac{12}{34} \log_2 \frac{12}{34}$$

$$\approx 1.580 \left[ \text{Eyh} \right] \tag{5}$$

現在の手がチョキ(か)のとき:

現在の手がパー(∅₃)のとき:

$$p(\psi_1|\phi_3) = \frac{7}{37}, \ p(\psi_2|\phi_3) = \frac{10}{37}, \ p(\psi_3|\phi_3) = \frac{20}{37}$$

$$H_{\mathcal{A}}(\Psi|\phi_3) = -\sum_{j=1}^3 p(\psi_j|\phi_3) \log_2 p(\psi_j|\phi_3)$$

$$= -\frac{7}{37} \log_2 \frac{7}{37} - \frac{10}{37} \log_2 \frac{10}{37} - \frac{20}{37} \log_2 \frac{20}{37}$$

$$\approx 1.444 \left[ \text{Eyph} \right] \tag{7}$$

以上のことから、被験者Aの条件付きエントロピーは、

$$H_{A}(\Psi|\Phi) = \sum_{i=1}^{3} p_{A}(\phi_{i}) H_{A}(\Psi|\phi_{i})$$

$$= \frac{34}{100} \times 1.580 + \frac{29}{100} \times 1.391 + \frac{37}{100} \times 1.444$$

$$\approx 1.47 [ ビット]$$
(8)

で表される。また被験者 B $\sim$ D の場合は、表  $4(b)\sim(d)$  に示す結果を利用して、同様に、

$$H_{\rm B}(\Psi|\Phi) = \sum_{i=1}^{3} p_{\rm B}(\phi_i) H_{\rm B}(\Psi|\phi_i)$$

$$= \frac{36}{100} \times 1.303 + \frac{35}{100} \times 1.141 + \frac{29}{100} \times 0.691$$

$$\approx 1.07 [ \mbox{$\su\s$$\mbox{$\mbox{$\mbox{$\mbox{$\mbox{$\mbox{$\ssi\$$\ssi\$$\ssi\$$\s$$

$$H_{\mathcal{C}}(\Psi|\Phi) = \sum_{i=1}^{3} p_{\mathcal{C}}(\phi_i) H_{\mathcal{C}}(\Psi|\phi_i)$$

$$= \frac{36}{100} \times 0.980 + \frac{32}{100} \times 0.974 + \frac{32}{100} \times 1.272$$

$$\approx 1.07 \lceil \text{ピット} \rceil \tag{10}$$

$$H_{\rm D}(\Psi|\Phi) = \sum_{i=1}^{3} p_{\rm D}(\phi_i) H_{\rm D}(\Psi|\phi_i)$$

$$= \frac{43}{100} \times 1.103 + \frac{23}{100} \times 0.678 + \frac{34}{100} \times 1.308$$

$$\approx 1.07 [ ビット] \tag{11}$$

<sup>†</sup>生起確率が均等な事象ほど、次に何が起こるかを当てにくいため、それに関係する情報には価値があるとする。エントロピーという尺度を用いる。単位はビット。

と求められる。

この結果からは、被験者Aのみ1.47ビットと大きな 値を示したが、他の3名についてはいずれも1.07ビッ トと同一であった<sup>†</sup>。換言すると、被験者B~Dはいず れもジャンケンの各手を出す際に同程度の"偏り"が あったことを意味する。これに対して、被験者 A は彼 ら3名よりも各手を出すときの偏りが小さかったこと になる。しかし、これは図3~4に示す特徴マップとは 明らかに傾向が異なっている。そこで、表4を再度注視 してみると、被験者Cについては確かに対角線上の値 が大きくなっており、同じ手を頻繁に繰り返している ことがわかる。これに対して、被験者B、Dについては 「グー→チョキ」、「チョキ→パー」、「パー→グー」の欄 の値が大きくなっており、これらをつなげると「グー→ チョキ→パー→グー→・・・」というループを形成するこ とになる。要するに、1状態から成るループが3つ(初 期状態は各1つ)と3状態から成るループが1つ(初期 状態は3つ)の比較となっている。上で計算したエン トロピーの場合、極論すれば、「グー→グー」(同一状 態間)と「グー→チョキ」(異状態間)という2種類の 状態遷移を区別せず、ただ単に数値を求めているだけ ということになり、"同一状態を繰り返す"という現象 の意味合いを全く考慮していないことになる。そこで、 これを

iii). 同一状態に戻ってくるループを含むものについては、その周期の長いもの(状態数の多いもの)ほど、勝者ニューロンの分布範囲は広くなる。

として、先のルールに追加する。

#### 5. 考 察

本研究では、ヒトの意思決定様式の解明のため、その第1段階としてジャンケンの対戦データ(グー、チョキ、パーから成る系列)をSOMに与えて解析を試みた。しかし、現実問題として我々ジャンケンを繰り返す場合、過去に自分が出した手だけに基づいて次の手を決定している訳ではない。これ以外にも、直前に相手が出した手やそのときの勝敗も密接に関わっているはずである。むしろ、相手の戦略を対戦系列から読み取って、有利になるように自分の戦略を変えていくのが自然であろう。したがって、このような状況を考慮すると、次の段階では、これらに相当する情報もSOMに与えて特徴マップを作成することが必要と思われる。

また一般に、対象システムの特性を同定することと、 その将来の挙動を予測することは別物と言われている。 しかし、もし前者が実現できた場合は、その成果に基 づいて後者もある程度は達成できると考えられる。そ こで、ここで行っている解析手法の評価や応用として、 獲得された特徴マップに基づいた次の手の予測も、将 来的には重要な課題であると考える。

#### 6. おわりに

本稿では、自己組織化マップ(SOM)が有する入出力関係の可視化機能に着目し、これを用いてヒトの意思決定様式の解析を試みた。具体的には、ヒトの意思決定を過去の履歴情報に基づく一種の時系列情報をみなし、ごく単純でよく知られたゲームであるジャンケンを取り上げた。その結果、各被験者の意思決定様式を反映した特徴マップが形成されることを明らかにした。また、それぞれのマップの定性的な解釈を行い、従来の統計的解析手法との共通点・相違点についても言及した。今後は、5.でも触れたような課題を整理し、1つずつ解決していくことで、より現実的な解析手法の確立を目指して検討する予定である。

#### 参考文献

- T.Kohonen: "Self-organizing maps, 3rd Edition", Springer, 2001
- [2] G.T.Chappell and J.G.Taylor: "The temporal Kohonen map", Neural Networks, Vol.6, pp.441-445, 1993
- [3] K.Horio and T.Yamakawa: "Feedback selforganizing map and its application to spatiotemporal pattern classification", Int. J. of Computational Intelligence and Applications, Vol.1, pp.1-18, 2001
- [4] 和久屋 寛,原田浩之,信太克規: "時系列信号処理 を行う自己組織化マップのアーキテクチャと点字認 識課題への応用",信学論(D-II), Vol.J87-D-II, pp.884-892, 2004
- [5] 中山幹夫: "はじめてのゲーム理論", 有斐閣, 1997
- [6] 和久屋 寛, 谷川昌弘: "ジャンケンに見られる ヒトの意思決定様式のSOM解析", 第5回自己組 織化マップ研究会 2004 講演論文集, SOM 2004-08, pp.37-42, 2004

#### 連絡先:

和久屋 寬

佐賀大学理工学部電気電子工学科

〒840-8502 佐賀市本庄町1番地

Phone: 0952-28-8636, Fax: 0952-28-8865

E-mail: wakuya@ee.saga-u.ac.jp

 $<sup>^\</sup>dagger$ もっと小さな桁まで考慮すると、大きい順に被験者 ${f D}$  (1.075 ビット)、被験者 ${f C}$  (1.072 ビット)、被験者 ${f B}$  (1.069 ビット) であった

## 遺伝的プログラミングによるデータマイニングアルゴリズムの 組み合わせ手法の改良

## Combined Method of Data Mining Algorithms using Genetic Programming

## 新美 礼彦 Ayahiko Niimi

公立はこだて未来大学 システム情報科学部 情報アーキテクチャ学科
Department of Media Architecture, Future University-Hakodate

Abstract: Quality of keywords given to each document is important to search documents from a lot of document databases. It is necessary automatically extracting high quality keywords from a document to achieve a document retrieval with high efficiency. We proposed a keyword extraction approach with selection of extracting keyword method depended on document categories using genetic programming. This approach could select only one extracting keyword method. In this paper, we expand this approach with stemming algorithm and GP node which selects filtering algorithm. By our new proposed approach, we can construct more complex keyword extraction system with combination of some methods.

#### 1 はじめに

現在、インターネットの爆発的は普及により、さまざまな情報が簡単に手に入るようになった。しかし、これらの情報の中から自分のほしい情報を探すのは簡単ではない。多量の文献の中から自分の欲しい文献を検索する時の効率は、各文献に付与されているキーワードの品質に大きく左右される。効率の高い文献検索を実現するためには、与えられた文献から高品質のキーワードを自動抽出する必要がある。今までにいくつかのキーワード抽出法が提案されているが、各キーワード抽出法は文献に応じて精度に違いがあり、パラメータチューニングなども大変である。

この問題に対して、文献をカテゴリごとに分類し、遺伝的プログラミングを用いてカテゴリごとにキーワード抽出法を自動選択し、キーワードの抽出を行うシステムを提案した。 [1] 以前提案したシステムでは、1 手法のみを用いたキーワード抽出しか行えなかった。 そこで前回の発表では、それを複数のキーワード抽出法を同時に組み合わせてキーワード抽出が行えるように拡張した。 [2] 本論文では、前回までのマイニングアルゴリズムに、語幹抽出処理とフィルタリング選択ノードを追加した。これにより、提案手法では複雑なキーワード抽出アルゴリズムの組み合わせが行えるシステ

ムを構築可能になる。

提案した手法の検証のため、キーワード抽出実験の ためのシステム構築を行った。

#### 2 遺伝的プログラミング

遺伝的プログラミング (Genetic Programming:GP) は、生物進化論の考えに基づいた学習法であり、そのアルゴリズムの流れは遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm:GA) と同様である。 [3] その特徴は染色体表現が GA と異なり、関数ノードと終端ノードを用い構造表現ができるように拡張してあることである。GP では、関数ノードと終端ノードを用いて LISP の S 式形式で個体を表現する。

GPでは、個体評価に適応度関数を用いる。適応度 関数には、個体の精度、大きさ、計算時間など複数の 指標を総合して組み込むことが可能である。

#### 3 キーワード抽出法

キーワード抽出法として、さまざまなものが提案されている。提案されているキーワード抽出法を大きく分けると、形態素解析を用いるもの、形態素解析を用いないもの、文章の構造をもとに解析するものなどがある。 [4] 本論文では、主に形態素解析を用いるものに

ついて検討した。

#### **3.1** 形態素解析

形態素解析とは、入力文を言語学的に意味をもつ最小単位である形態素に分割し、各形態素の品詞を決定するとともに、活用などの語変形化をしている形態素に対しては原形を割り当てることである。 [5] 形態素解析で分割された単語を要素単語という。要素単語に分けることにより、頻度解析や特定品詞へのフィルタリングが行えるようになる。

#### 3.2 語幹抽出処理

形態素解析の処理は、比較的計算量の多い処理である ため、単に単語分けするためだけに形態素解析の処理 を使うのは、全体の処理を重くしてしまう可能性があ る。そのため、英文に対しては、単語分けが容易なた め、形態素解析を行わずに処理することがある。しか し、英単語にでも活用があり、語尾が変化してしまう。 単に単語分けしただけでは、語尾が変化してしまった 単語を別の単語として処理してしまうことになる。語 幹抽出処理では、活用により語尾が変化している単語 や、品詞を変えるために語尾が変化している単語 や、品詞を変えるために語尾が変化している単語 幹を抽出する。語幹とは、語尾変化する単語の変化し ない部分のことである。この処理を行うことにより、活 用などで変化してしまった単語をまとめて扱うことが できるようになる。

#### 3.3 出現頻度による抽出

形態素解析で分割された各要素単語の出現回数 (頻度) を調べる。出現頻度の高い要素単語をキーワードとして抽出する。出現頻度の高い要素単語をキーワードとして抽出するため、どんな文章からも最適なキーワードを抽出しやすい手法である。しかし、助詞などのキーワードとして適切でない語を抽出する傾向があるため、抽出後のフィルタリングが重要になる。単純な頻度を使わずに、*tf・iof* を用いることもできる。これは、以下の式で定義される。

$$\lambda \exists \mathcal{T} = tf \times iaf \tag{1}$$

ただし、

tf: あるキーワードがその対象文章中に含まれる出現 回数 (Term Frequency) idf = log(N/n): (Inverse Document Frequency)

#### N: 全文章数

n: そのキーワードを含むファイル数

tf·inf 法を用いることにより、多数の文章に多く含まれる一般的なキーワードの重要度を下げ、特定の文章中に多く含まれるキーワードの重要度をあげることができる。

#### 3.4 連続名詞の抽出

情報検索の世界では名詞概念をキーワードとして抽出する傾向が強い。 [6] 一般的には、形態素解析を用いて名詞を抜粋し、キーワードの抽出を行う。

#### 3.5 N-グラム

構文解析を行わない方法の1つとして、N-グラム (n-gram) 法がある。N-グラムは長い文字列から部分文字列を取り出す方法で、Nには2や3などの数をとることができる。N-グラムのアルゴリズムでは1文字ずつずらしながら、連続するN文字を取り出し、取り出した文字列の出現頻度を調べ、その集合の中で出現頻度の高い語をキーワードとして抽出するというものである。[6] あらかじめ文章に形態素解析による単語分けを行う必要がなく、任意の数の文字数を設定することができる。

しかし、単語分けを行わないで解析すると、単語の一部分を含んだ文字列を大量にキーワードとして抽出する恐れがある。これを改善するために、本論文では 形態素解析を行い、要素単語に分けた後で、その要素 単語の連続を調べる手法も検討した。

#### 3.6 相関ルール

文章中に現れる文字や単語の相関から、キーワードを抽出することが考えられる。これを相関ルールと呼び、ルールはいくつかの文字(または単語)からなり、どれだけ同時に現れやすいのか(相関があるか)が評価対象となる。相関ルールを高速に抽出する手法として、aprioriアルゴリズムがある。[7] 相関ルールの探索では、支持度(support value)と確信度(confidence value)という2つの指標を用いて相関ルールを評価する。本論文では、相関ルールの支持度(sup)は全データに対する構成要素が含まれる割合、確信度(conf)はある構成要素が含まれた時に他の構成要素が含まれる割合の平均であると定義する。

相関ルール探索は、N-グラムを用いたアルゴリズムと同様に、形態素解析を行わなくてもキーワードを抽出することが可能である。しかしこれも、単語の一部分のみを抽出する可能性を減らすため、本論文では形態素解析を行った後に要素単語間の相関ルールからキーワードも作成することを考える。

#### **3.7** フィルタリング

単に文章からキーワードを切り出しただけでは、"てにをは"や"数字"などキーワードに適さない語が含まれてしまう可能性がある。また、"行う"、"行い"など、活用によって語尾が変化する語もある。これらを除去したり、適切な形に替える必要があり、本論文ではこの作業をフィルタリングと定義している。フィルタリングでは、このほかにも同じ意味の違う単語を統一するなどの作業を行うことがある。フィルタリングを行うことにより、キーワードの質を高めることができる。フィルタリングでは、

- 不要語リストを用いるフィルタリング
- 品詞によるフィルタリング
- 頻度によるフィルタリング

がある。不要語リストによるフィルタリングでは、キーワードになりにくい単語のリストを作成しておき、リストにある単語をキーワード候補からはずす方法である。品詞によるフィルタリングでは、キーワードになりやすい品詞やキーワードになりにくい品詞に対して、キーワード候補のふさわしさに重み付けしたり、除キーワードになりやすい品詞として名詞が、キーワードはひけにくい品詞として助詞や助動詞がある。頻度によってもつにくい品詞として助詞や助動詞がある。頻度によるフィルタリングでは、キーワードの出現頻度によってキーワード候補のふさわしさに重みを付ける方法である。高頻度のものほどキーワード候補としてふさわした考えられるが、単純に頻度情報を使うのではなく、tf・iaf 法を用いて特定の文章中に多く含まれるキーワードの重要度を上げて評価することもある。

#### 4 GP によるキーワード抽出手法の組み合わせ

各キーワード抽出法には、対象文章に得意・不得意が あると考えられる。構造化した文章には構造を解析し ながらキーワードを抽出することができるが、あまり 構造化されていない文章では同じ解析を行うことは難

表 1: AND ノードと OR ノード

関数ノード	定義
(AND A B)	A と B を評価し、両方に含まれているキーワードの割合を出力する
(OR A B)	A と B を評価し、少なくともどちら か一方に含まれているキーワードの 割合を出力する

しい。メールなどの短く、あまり構造化されていな文章と、論文などのある程度の長さがあり、構造のはっきりした文章では、異なるキーワード抽出法を用いる方が効果的と考えられる。また、それぞれのキーワード抽出法において、パラメータを対象文章にあわせて、チューニングする必要もある。

そこで以前、GPを用いて、各情報カテゴリをもとにして各キーワード抽出法を選択し、その時のキーワード抽出法の正答率を求め、正答率が一番高い情報カテゴリとキーワード抽出法の組み合わせを見つける手法を提案した。 [1] この手法では、GPを用いることで情報カテゴリに適したキーワード抽出法を自動選択し、キーワードの抽出を行うことができる。また、 適適応度関数の設計時に、キーワードの精度や数、抽出までの時間などを考慮することが可能となる。また、キーワード抽出法のパラメータも同時に学習させることが可能である。提案した定義では、関数ノードはどのカテゴリの文章なのかの条件判断をあらわし、終端ノードはどのキーワード手法を用いるのかをあらわすようにした。

しかしこの定義では、選択する手法は1つになってしまう。そこで、複数の手法が選択できるように、ANDとORの関数ノードの定義を追加した。 [2](表1参照) 以前の定義では、

のような出力が得られたが、AND  $\circlearrowright$  OR を追加することにより、

のような出力が得られるようになる。

また、フィルタリングを行うかどうかについても、関数ノードとして定義した。(表2参照)

これにより、手法ごとにフィルタリングを行うかどうか、行うならどのフィルタを使うのかが学習できるようになる。フィルタリング選択ノードを追加した GPでは、以下のような出力が期待される。

表 2: フィルタリングノード

関数ノード	定義
(filtering_by_stopword A)	引数 🗛 を評価し、その結果を不要語
	リストによりフィルタリングする
(filtering_by_part A)	引数 A を評価し、その結果を品詞に
	よりフィルタリングする
(filtering by frec A)	引数 A を評価し、その結果を頻度に
	よりフィルタリングする

#### 表 3: GP のパラメータ

集団数	500
複製確率	0.1
交叉確率	0.8
突然変異確率	0.1
選択方式	トーナメント方式
関数ノード	表4の7種類
終端ノード	表5の5種類
訓練データ数	各カテゴリ 25 文章ずつ、合計 125 文章

#### (if\_news associate-w\_key

#### (if\_editorial

適応度は、以前と同様に GP の個体により情報カテゴリからキーワード抽出法を選択し、そのキーワード抽出法によって得られてキーワードの正答率を求め、これをもとにした。これにより正答率が一番高い個体が適応度の高い個体となる。キーワードの抽出数や抽出時間なども適応度計算として定義することにした。

GPを用いたキーワード抽出システムの欠点として、実時間での学習が難しい点が考えられる。適応度をシステム利用者の評価により行う対話的なキーワード抽出システムも考えられる。しかし、GPの適応度計算が個体数やノード数に依存して増加してしまうので、対話的に学習をさせようとすると待ち時間が長くなってしまう。そこで、システム利用者からの評価入力待ち時間やシステムが利用されていない時間などを使って、評価と平行して学習するなどの工夫を行うことにより、実時間での学習に対応させることが可能であると考えられる。

提案手法で前提となるカテゴリ分けに関しても、以 前と同様に、文章を自動的にカテゴリ分けする手法は含 まず、カテゴリは使用者により指定されるものとした。

#### 5 検証実験

提案手法の有効性を検証するために、複数カテゴリの文章から複数手法を用いてキーワード抽出を行った。文章のカテゴリとして、論文、ニュース、社説、マニュアル、メールを用いた。まず、それぞれから手作業によりキーワードを抽出し、これを正解とした。キーワード抽出手法として、頻度解析、連続名詞の抽出、文字をもとにした N-グラム法、単語をもとにした N-グラム法、単語をもとにした N-グラム法、単語をもとにした N-グラ

GP のパラメータは、以下のものを用いた。(表 3 参

表 4: 関数ノード

表示	意味
and	引数 1 と引数 2 を評価し、評価値の
	小さい方を返す
OF	引数 1 と引数 2 を評価し、評価値の
	大きい方を返す
if_paper	カテゴリが論文なら引数 🛚 を、違う
	なら引数 2 を評価する
if_news	カテゴリがニュースなら引数 』を、
	違うなら引数 2 を評価する
if_editorial	カテゴリが社説なら引数 🛚 を、違う
	なら引数 2 を評価する
if_manual	カテゴリがマニュアルなら引数 ▮を、
	違うなら引数 2 を評価する
if_mail	カテゴリがメールなら引数 』を、違
	うなら引数 2 を評価する
filtering by stopword	引数を評価し、その結果を不要語り
	ストによりフィルタリングする
filtering_by_part	引数を評価し、その結果を品詞によ
	りフィルタリングする
filtering by fre	引数を評価し、その結果を頻度によ
	りフィルタリングする

照)適応度は、正答率から求めた。個体評価の際、毎回キーワード抽出を行うと時間がかかるので、実験ではあらかじめ各キーワード抽出法でキーワード抽出を行い、正答率を求めてから GP 学習を行った。以前の実験では正答率にあまり差がない場合にうまく学習が行えなかった。そこで、今回の実験では、正答率の差が適応度の大きく影響するように正答率に重み付けを行った。AND と OR に関して、あらかじめ個別の手法での正答率が得られているので、とりあえず表 4 のように定義した。

単に引数の最大、最小を返す実装になっている AND,OR によるキーワード選択時の正答率を、実際に複数手法でキーワードを抽出した時のキーワード数に応じたものになるように変更し、提案手法が実際に使えるかどうか検討する予定である。また、フィルタリング選択ノードを追加した実験も行う予定である。現在、実験で使用するための学習データを整理している段階である。

表 5: 終端ノード

表示	意味
frec_key	出現頻度による抽出法を用いる
connect_noun_key	連続名詞による抽出法を用いる
ngram-c.key	文字をもとにした N-gram による抽
	出法を用いる
ngram-w_key	単語をもとにした N-gram による抽
	出法を用いる
associate w key	単語をもとにした相関ルール抽出よ
	る抽出法を用いる

#### 6 おわりに

本論文では、以前提案した文献をカテゴリごとに分類し、遺伝的プログラミングを用いてカテゴリごとに複数のキーワード抽出法の組み合わせを自動選択し、キーワードの抽出を行うシステムに、語幹抽出処理とフィルタリング選択ノードを追加した。語幹抽出処理は、形態素解析と同様に使用できるように実装した。フィルタリング選択ノードは案数ノードとして実装した。提案した手法の検証のため、キーワード抽出実験のためのシステム構築を行った。

現在、実験で使用するための学習データを整理している段階であるので、フィルタリング選択ノードを追加した実験を行い、提案手法が実際に使えるかどうか検討する予定である。また、単に引数の最大、最小を返す実装になっている AND,OR によるキーワード選択時の正答率を、実際に複数手法でキーワードを抽出した時のキーワード数に応じたものになるように変更し、提案手法が実際に使えるかどうか検討する予定である。

#### 参考文献

- [1] 新美 礼彦、安信 拓馬、田崎 栄一郎: 遺伝的プログラミングを用いたカテゴリごとのキーワード抽出法選択,第18回 ファジィシステムシンポジウム論文集,pp.303-306,2002
- [2] 新美 礼彦: 遺伝的プログラミングを用いたデータ マイニングアルゴリズムの組み合わせ手法, 第 19 回 ファジィシステムシンポジウム論文集, pp.815— 818, 2003
- [3] J.R. Koza: Genetic Programming, MIT Press, 1992

- [4] 市村 由美、長谷川 隆明、渡部 勇、佐藤 光弘: テキストマイニング 事例紹介, 人工知能学会誌, Vol.16, No.2,pp.192-200, 2001
- [5] 松本 裕治、北内 啓、山下 達雄、平野 善隆、松田 寛、浅原 正幸:日本語形態素解析システム 『茶筌』 version 2.0 使用説明書 第二版, 1999
- [6] 那須川 哲哉、河野 浩之、有村 博樹:テキストマ イニング基盤技術, 人工知能学会誌, Vol.16, No.2, pp.201-211, 2001
- [7] R. Agrawal, R. Srikant: Fast Algorithms for Mining Association Rules, the 20th International Conference on Very Large Databases, Santiago, Chile, 32pages, 1994

#### [問い合わせ先]

新美 礼彦

公立はこだて未来大学 システム情報科学部 情報アーキテクチャ学科

〒 041-8655 北海道函館市亀田中野町 116-2 Phone:0138-34-6222 FAX:0138-34-6301 E-mail:niimi@fun.ac.jp

## 記述型データベースからのデータマイニング手法と 感性工学への応用

# Data mining method from text database based on fuzzy quantification analysis and its application to Kansei Engineering

青木 圭佑 和多田 淳三 持田 信治 川浦 孝之 Keisuke Aoki Junzow Watada Shinji Mochida Takayuki Kawaura

早稲田大学 早稲田大学 HIMAC.JP 大阪国際児童文学館

Waseda University Waseda University Iternational Institute For Children's Literature, Osaka

**Abstract:** Data mining till now mainly treated numerical data. In recent years, research on data mining is pursued not only on numerical values but also on linguistic values in order to analyze text data. A freely written texts are widely employed to express opinions. So it is more important to acquire knowledge from a real world. Texts are more important in the process of mining than words themselves. Furthermore, fuzzy method is applied to the mining.

As examples, we deal with data of fashion monochrome, data for books. The result will be shown to be effective. Moreover, the application of this technique to Kansei Engineering is discussed in the latter half of this paper.

#### 1.はじめに

数値情報だけでなく言語情報の取り扱いを,ファジィ理論は近年目指している.[9,10]本論文では,記述型データベースからのデータマイニング手法を提案する.

文章で与えられたデータから単語の切り出しを行い、それらの単語をあらかじめ経験的に獲得されたファジィシソーラスによって同意語や上位概念に置き換えることで多くのデータを共通に理解する可能性を与える.

これらのデータをファジィ多変量解析で分析することで,互いに関係する内部的な構造を取り出すこと.すなわちデータマイニングを試みる.この手法の応用として図書館テキスト情報のマイニングについて説明する.

最後に,これらマイニングの将来における適応の例として,感性工学的な取り扱いについて触れ,本論文のまとめとする.

### 2.テキストからのデータマイニング

データマイニングは統計学の世界では適切な仮説を前もってもたずに、しらみつぶしに、たらめにパターンを探すことというようなうなででいる意味で用いられてきた、従来、統計学では、データは特定の質問に答えるために目常の質問に対して前もって適切な仮説を立てるように対して前もって適切な仮説を立て多いがけない(unsuspected)パターンを発見いがけない(unsuspected)パターンを発見られるようになってきた、本論文であつかっているものはデータマイニングの中でもテキストマ

イニングと呼ばれるものである.データマイニングとの最も大きな違いは扱う元データにあり,データマイニングが整えられた数値データを扱うのに対し,テキストマイニングは文章データが含まれたデータを扱うという点である.

テキストマイニングでは、文章で与えられているテキストデータに、切り分けによる単語化やシソーラスデータベースによるキーワードの整理等の自然言語処理をほどこす、結果として得られた単語の集合にたいしデータマイニングを行う、後に、これで得られた知識を感性工学的な観点から、例えば商品開発などに応用する方法を考える、その様流れを簡略化したものを図1に示す、

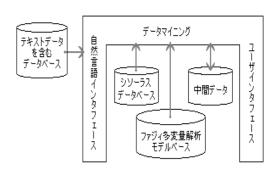


図1.テキストマイニングの過程

#### 2.1 ファジィシソーラス

テキストデータからのマイニングではテキストデータを解析に適した形に加工しなくてはならない.解析対象の単語が同じ意味に対して異なる言葉が用いられている場合にはシソーラスを用いて,同一単語(キーワード)に統一する必要がある.例えば"携帯"と"携帯電話"と

いったデータがあった場合にそれらを一つの言葉で統一する必要がある.また,ある範疇に含まれる複数の単語があった場合に,解析のためにそれらの単語をそれらの上位概念を表す単語で統一する作業を行う.例えば"犬"と"猫"などの単語があった場合,それらを"動物"などの上位概念の単語に置き換える.

この作業を可能にするために,同義語などを 示すシソーラスデータベースを構築する必要が ある.

本論文ではこのシソーラスデータベースを, 構築ファジィ理論を用いたメンバーシップ関数 を用いて表現する.本論文では,上述のシソー ラスデータベースは一つのキーワードから複数 のメンバーシップ値をもった複数のキーワード を作成することで,一つのデータを多面的に扱 うことを可能としている.

#### 2.1.1 テキストの単語への分割

テキストデータからマイニングを行う際,テキスト部分を単語に切り分ける作業が必要になる.この部分には Web 技術を使用した動的知識集合体生成システムを用いた.

このシステムではあらかじめ登録された辞書データベースを参照してキーワード抽出を行うのではなく,漢字やカタカナなどを JIS コードから判断し,カタカナならカタカナ,漢字なら漢字が 2 文字以上続いた場合に,それをキーワードとして抽出することが出来る.このことにより,扱えるデータの幅が広がり,新しく生まれてくる単語が含まれたテキストデータに対しても,その新しい未知な単語をキーワードとして抽出することができる.

#### 2.1.2 ファジィシソーラスの構築

本論文では切り分けた単語の整理に必要なシソーラスデータベースの構築にファジィ理論を用いたファジィシソーラスを用いる.このファジィシソーラスの構築については,すでに多くの方法[1,2]が提案されている.

シソーラスの構築にファジィ理論を用いることにより,あいまいな意味をもつ文字や文章を,より適切に,実際に近い形で扱うことが出来るようになる.

ファジィシソーラスにおいては各々の単語どうしの関連度がメンバーシップ関数で表される. 例えばチワワに興味を持っている人が3人いたとすると,その3人は犬に対しては0.65の興味があり,ペットに対しては0.9,動物にたいしては0.55の興味があると定義することが出来る.

### 2.1.3 ファジィシソーラスの利用

従来,シソーラスはキーワードの変換に用いられることが一般的である.それは例えば,複数の人がそれぞれ犬や猫といった複数種類の動物を好きだといった場合,"犬"や"猫"といったそれぞれのキーワードをその上位語である"動物"に置換することにより,その集団を"動物"好きな集団としてグルーピングして扱うことができる.

本論文では,このファジィシソーラスを単なるキーワードの置き換えだけでなくキーワードを自動的に増やす方法を考える.この方法は,元データの表面的には現れない潜在的な特徴や傾向をマイニングできる可能性を高めることが出来るであろう.

この手法では、偶然が重なったりすることにより実際には存在しない結果を生み出す可能性がある。それを解決するために、実際には、上記の方法にさらにメンバーシップ関数を組み入れるようにする。このことにより、より精密な分析が可能となる。

#### 2.2 ファジィ数量化分析

テキストデータをキーワードに切り分け,シ ソーラスデータベースにより整理した後,分析 の段階に入る.

シソーラスデータベースを使ってキーワード の数をある程度絞った状態のデータに対して, 数量化分析 類による分析を行う.

本研究では,データの分析にファジィ数量化分析 類を用いている.これにより,メンバーシップ関数の付いたデータを扱うことが出来る.

### 3.テキストマイニングの適用

### 3.1 図書館データベースからのデータマイ ニング

本論文では,図書館において利用された本の データをまとめた記述文章からなるデータベー スを対象にマイニングする方法を説明する.

このデータベースは、本を借りた人の年齢や性別といったデータに加えて、その本の種類、タイトル、筆者、対象学年、出版社、ページ数、初版年度、ISBN コード、NDC、キーワード、概要から構成されている、表3の形である、

表3 児童図書データ

对象学	性	木のタイトル	キーワード	說明文
高字年	女	星にわかいを	ろらなし (力)	顧惰した?と母に傷つけられながら ほのえ
高字年	男	TO FOR	うらないが	山の上の一軒面に住む無よい確に思われ
幼稚園	男	おまじないさん	しんばい 7ま	生情や不安全につも低いている少年がおま
甲字校	男	コックリスんの2	ららないへか	コークリさんの現象を科学的に証明しようと
甲字校	女	恋のまじない。	れんあいノま	カメを好きな女性に乏した男性が一枝懸命
(7)	4	2		

#### 3 . 2 Web データからのデータマイニング

本論文では記述型データベースの応用として アンケートデータの収集の分析について検討する

従来からあるアンケートの形式は質問者の問いに回答者が答えるものである.この形式では質問者が質問をする時点ですでに,回答者の答えがいくつかの選択肢に限定されている場合が多い.すなわち,質問者の質問の仕方次第では回答者の回答の幅を極端に狭めてしまい,結果,十分に回答者の意図をくみ上げることが出来ないことが多い.

本論文では,アンケートではなく,Web 上に 散在する自由な形式で書かれた意見を収集する ことにより,より包括的なデータを得る方法を 提案している.

テキストデータを収集する手法は,ほとんどの場合アンケート調査である.だが,アンケート手法は質問をする時点で,ある程度回答の幅を狭めてしまっている場合が多い.あらかじめ答えを YES と NO に限定し,その後の分析を容易にする場合もあるだろう.しかし,出来るだけ回答者から沢山の情報を得ようとした場合に,アンケートを取る方法では必ずしも適切とはいえない.

そこで本論文では,アンケートに代わるデータの収集方法を考える.

アンケートにかわるテキストデータの収集方法として、Web データからの情報収集を考える.ここではまず、掲示板のような特定の話題について書かれているデータについて検討する.掲示板では、ある特定のテーマが与えられている.発言者はそのテーマについて意見を書き込む.

掲示板は発言者(回答者)の発言に関する制約が少なく,アンケートに比べてより多くの情報を得ることが出来る.この方法の欠点は,掲示板が不特定多数の会話の形式を取っていることである.各々の発言が互いに他の発言の影響を大きく受けており,発言に対する信憑性が低くなることが挙げられる.

複数の Web ページを検索し,目的のキーワードを含むページを,そのキーワードに対しての回答者の意見と捕らえ,そのページのテキストデータを得る方法が考えられる.

この場合でもそのテキストデータを有効に使うためには、その文章を理解することが必要である.これをするためには、動詞を理解出来るようにする等の工夫が必要になる.

## 4 .テキストマイニングの感性工学へ応用

本節では,上記のデータマイニングを感性工 学手法に適応する方法を提案する.すなわち, 感性情報をもとにテキストマイニングによって 得た知識をシステムやマーケティングセールス 等に利用する方法を説明する.

現在の商品開発において感性情報は,欠かせないものとなっている.

新しい商品を開発する際に,デザインや機能 に関係がある感性情報は,非常に重要である.

感性工学とは人が持つ感性やイメージを具体的にモノとして実現するための設計レベルへ翻訳する技術とされており〔5〕, そこで行われる感性工学評価実験の心理測定法は,言葉を手がかりとして行われている.

テキストマイニングは文章や単語について分析を行うので,感性データの解析に適していると言える.また感性判断に含まれるあいまいな部分もファジィ理論に基づいて,適切に表現できる.

感性工学の手順は,調査対象に対する感性ワードを抽出し,SD法,数量化分析を用いて感性ワードの評価を行う.ここで言う感性ワードとは"きれいな"や"上品な"の感性表現に近い言葉で,主に形容詞が用いられることが多い.

いままでは感性ワードの収集には,対象となる商品の顧客や売り手側の感じた内容から集めたり,カタログや辞典から感性をあらわす言葉を抜粋したりするような作業が必要であった.

# 4.1 図書館データから得られた結果によると図書購入の実現

上述の図書館データを分析し、以下図3、4 のような結果を得た。

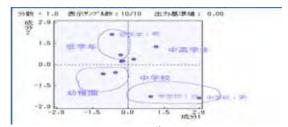


図3.図書館データ分析結果

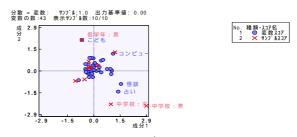


図4.図書館データ分析結果

図3の結果より、学年により興味を示す本に 違いが出ていることが分かり、図4より各々の 学年でどういったジャンルの本に興味を示して いるかを知ることができる。

幼稚園児は、幼稚園や動物に関わる本に高い 興味を示している。小学校中学年の男の子は乗 り物に、高学年の男の子はコンピュータに高い 関心を示しており、怪談や占いに興味を示して いるのは中学生である。

こういった結果を新たな図書購入に役立てる ことで、図書館利用の活性化と館の発展に貢献 することができる。

### 4 . 2 Web データからの商品開発に関する 感性データの取り込み

上述の Web からのテキストデータの分析について考える.これらのデータの場合は文章の意味を知ることが必要になるので,文章を単語に切り分ける等の作業は行わない.ただし"."等の文章の終わりを示す記号があった場合,そこで区切りをつけテキストデータが文章一行ごとのデータになるようにする.

掲示板等のように,書かれている対象がはっ きりと分かっている場合は,文章の中から良し 悪しを表すキーワードを探す"良い", 悪い", "好き","嫌い"などである. さらにその後に 否定形が続いていないかどうかを判断する."~ でない"などである.これはたとえ"嫌い"と いうキーワードが使われていても後ろにその否 定形"~でない"があった場合,"嫌いでない" のように肯定的な意見になるからである.ただ しこの場合,普通に"好き"と書かれている場 合に比べるとその好きであるという意思が弱い 場合が多い. そこで"是"の意見と"否"の意 見に分けるだけでなく、それぞれにグレードを つけて扱うことにする. 例えば "好き"という キーワードがあった場合はグレード1で"是" の意見 . "嫌い"と"でない"というキーワード があった場合はグレード0.5で"是"などの ように扱う.

この時点でも,調査対象に対して好意をもたれている割合とそうでない割合をだすことが出来る.さらに,同じ文章中で"是"や"否"を表すキーワードの前後に現れている単語をみることで,その回答者が調査対象のどのような部分にたいして好意もしくは非好意を感じたかを知ることができる.

#### 5.むすび

本論文ではファジィ理論を用いたテキストマイニング法について述べ、その応用例を示した。 結果その有効性を示すことができた。

本手法を実現するためには,膨大な量のファジィシソーラスのデータベースが必要になる. 本論文では、シソーラスを経験的に決定したが、 そのため計算にかかる時間やコストは膨大なものとなる.膨大な量のファジィシソーラスのデータベースをいかにして作成するのかも,大きな問題である.

これらのことは,今後の課題として考えなければならない.

#### 参考文献

- (1) 磯本征雄,野崎浩成,吉根勝美,長谷川聖美 and 石井直宏.印象語シソーラスにおけるファジィな類義語関係の定量的検証.日本ファジィ学会誌 Vol.8, No.4,pp.646-656(1996)
- [2] 藤本太郎 and 菅野道夫.ファジィ近接関数を用いた動詞シソーラスの構築.日本ファジィ学会誌 Vol.11, No.3, pp.462-471(1999)
- [3]片岡充雄,今中武,水谷研治 and 若見昇. テキスト情報を対象としたキーワード抽出 と関連情報システム.日本ファジィ学会誌 Vol.9, No.5, pp.710-717 (1997)
- [4] 持田信治. Web 技術を使用した動的知識 集合体生成システム.バイオメディカル・ファジィ・システム学会九州・山口支部学術会 議論文集(2003.8.23)
- [5] 長町三生.感性商品学,感性工学の基礎と 応用.海文堂出版株式会社(1993)
- [6] 中森義輝.感性データ解析,感性情報処理のためのファジィ数量分析手法.森北出版(2000)
- [7]河口至商.多变量解析入門 , .森北出版株式会社(1998)
- [8] 寺野寿郎, 浅居喜代治, 菅野道夫. ファジィシステム入門. オーム社(1987,4,30)
- [9] Zadeh LA(1999) What is computing with words. Computing with Words in Information/Intelligent Systems. In: Physica-Verlag, Foundation, Zadeh LA, Janusz Kacpruzyk (Eds.) viii-ix
- [ 10 ] Zadeh LA ( 1999 ) Fuzzy Logic : = computing with words. Computing with Words in Information/Intelligent Systems. ,Zadeh LA, Janusz Kacpruzyk ( Eds. ) Physica-Verlag, Foundation, pp.3-23
- [11] 青木圭佑,和多田淳三,薮内賢之.記述型データベースからのデータマイニング.バイオメディカル・ファジィ・システム学会九州・山口支部学術会議論文集(2003.8.23)

## 大脳視覚野の階層的情報処理に基づく V1-IT SOM の 手書き数字認識への適用

An Application of V1-IT SOM based on Human Visual Information Processing to Handwritten Digits Recognition

加藤 聡

Satoru Kato

松江工業高等専門学校

Matsue National College of Technology

下平 博

Hiroshi Shimodaira

北陸先端科学技術大学院大学

Japan Advanced Institute of Science and

Technology

堀内 匡

Tadashi Horiuchi

松江工業高等専門学校

Matsue National College of Technology

堀口 進

Susumu Horiguchi

東北大学

Tohoku University

**Abstract:** This article presents a hierarchical SOM what we call V1-IT Model derived from the stimulus selective cells in both the area V1 and the area IT, and from the hierarchical neural projection from the area V1 to the area IT in the visual cortex. We discuss about the ability of classification of handwritten digits on the V1-IT model through the numerical experiments. It is shown that our V1-IT Model has high ability of classification compared with Kohonen's basic SOM.

#### 1 はじめに

大脳視覚野の第 1 次視覚野 (V1 野) では,ある特定の傾きを持つスリット状の光刺激に選択的に反応する方位選択性細胞の存在が古くから知られており [1],近年では,マカカ属のサルの下部側頭葉皮質 (IT 野)において,特定の単純図形やテクスチャ,コントラストの変化など,中程度に複雑な図形に対して選択的に反応する細胞が発見されている [2].これらの生理学的知見から,大脳視覚野における物体形状の知覚は,V1 野によって抽出された視覚パターンの原始的な部分特徴を,IT 野が統合することによって行なわれていると考えられている.

このような大脳視覚野の階層的情報処理を意識したパターン認識器として、福島のネオコグニトロン [3] が挙げられる・ネオコグニトロンは視覚パターンの位置ずれや変形などに強い認識システムを構築することができる・また、Obermayer らは、V1 野に関する生理学的知見に基づき、Kohonenの自己組織化マップ (SOM)[4] を用いて V1 野における方位選択性細胞のマップ構造を再現している [5] ・

我々はこれらの先行研究を踏まえ, V1 野から IT 野に至る神経結合モデルである V1-IT SOM を提 案している [6].このモデルは,SOM を階層的に用いたものであり,Obermayer らの手法によって得られた方位選択性細胞のマップ構造を,特徴抽出層として用いるものである.本稿では,パターン認識問題の1つである手書き数字認識に対してV1-IT <math>SOM を適用し,V1 野から IT 野への階層的な視覚情報処理に基づいた階層型 SOM の有効性について議論する.

#### 2 V1-IT SOM の概要

#### 2.1 ネットワーク構造

V1-IT SOM は,図 1 に示すように,入力層の後方に 2 つの競合層が階層的に結合した構造を持つ.第 1 競合層は V1 野に,第 2 競合層は IT 野にそれぞれ相当し,本稿では第 1 競合層を V1 層,第 2 競合層を IT 層と呼ぶ.入力層には  $n \times n$  個の入力ユニットが 2 次元格子状に配置され,各ユニットが  $0.0 \sim 1.0$  までの値をとることで  $n \times n$  画素の視覚イメージを表現する.V1 層および IT 層には  $m \times m$ , $l \times l$  個の J ードがそれぞれ 2 次元格子状に配置されている.

V1 層の各ノードj および IT 層の各ノードk は,それぞれ結合重みベクトル $\mathbf{W}_{i}$  および  $\mathbf{W}_{k}$  を持つ.

また,V1 層と IT 層は完全結合しているが,V1 層と入力層については,V1 層の各ノードはそれぞれ部分的に重複する局所的な受容野を入力層上に持っており,V1 層は入力パターンの部分的な特徴を学習する.

V1層の役割は,入力層に与えられた入力パターンに基づいて,IT層に出力パターンを送り出すことであり,IT層はV1層の出力パターンを学習する.すなわち,V1-IT SOM はV1野が抽出した視覚パターンの部分特徴をIT野が統合するという,大脳視覚野の階層的な情報処理に基づいている.

#### 2.2 学習方式

V1-IT SOM における入力パターンの学習は , 以下に示す 2 つの段階に分けられる . このとき , V1 層あるいは IT 層の各ノードにおける結合重みベクトル  $\mathbf{W}_j$  および  $\mathbf{W}_k$  の更新には , Kohonen の SOM における学習アルゴリズム [4] を用いる . 第 1 段階

V1 層に対して,入力パターンが持つ局所的な特徴の抽出機能を持たせるためのものであり,図 2(a) に示す V1 層に対して行なわれる.V1 層の各ノードは,局所的な受容野を通して呈示された入力パターンの部分的構造に応じて,結合重みベクトル  $\mathbf{W}_j$  を適切に調節し,入力パターンの部分的特徴を学習する.第 1 段階終了後,V1 層は特徴抽出層として用いられ,新たな学習をしない.第 2 段階

IT 層の各ノードに対して,それぞれ固有の入力パターンに対する選択性を持たせるためのものであり,第 1 段階終了後の V1 層に競合層を追加した,3 層構造の V1-IT SOM (図 2(b) 参照)に対して行なわれる.このとき,特徴抽出層である V1 層において,ある入力パターン  $E_i$  が呈示されたときの IT 層への出力パターン  $V_i$  を,以下の式 (1) および式 (2) で定義する.

$$v_j = \cos \theta_{\mathbf{E}'_{ij}\mathbf{W}_j} = \frac{\mathbf{E}'_{ij} \cdot \mathbf{W}_j}{|\mathbf{E}'_{ij}| \cdot |\mathbf{W}_j|}, \tag{1}$$

$$\mathbf{V}_i = (v_1, v_2, ..., v_j, ..., v_{m^2}). \tag{2}$$

ここで, $\mathbf{E}'_{ij}$  は入力パターン  $\mathbf{E}_i$  が呈示された時の, $\mathrm{V}1$  層各 J ードから見た局所的な入力パターンである.すなわち, $\mathrm{V}1$  層の各 J ードは,個々が持っている結合重みベクトル  $\mathbf{W}_j$  と,個々に入力されている局所的な入力パターン  $\mathbf{E}'_{ij}$  の方向余弦の値

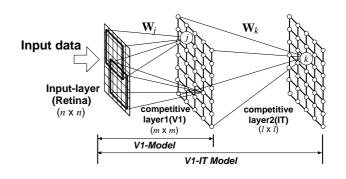
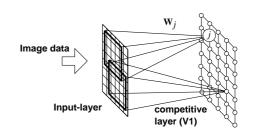
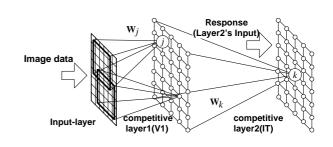


図 1: V1-IT SOM の構造



(a) 第 1 段階: V1 層における入力パターンの部分的特徴の学習



(b) 第2段階:IT層における入力パターンの学習

図 2: V1-IT SOM の学習方式

を出力する.したがって,図 2(b) に示すように,入力層に呈示された入力パターンに対して,V1 層は式 (2) によって出力パターン  $\mathbf{V}_i$  を生成し,IT 層は  $\mathbf{V}_i$  を入力パターンとして  $\mathbf{W}_k$  を更新し,入力パターンの学習を行なう.

#### 3 V1-IT SOM による手書き数字認識

#### 3.1 実験方法

認識実験には,手書き数字データベースである MNIST handwritten digits database[7] を用いた. 60,000 字分のサンプルから,学習用とテスト用に それぞれ 10,000 字を , 重複が起こらない形でランダムに抽出した .

基本 SOM および V1-IT SOM における手書き 数字の学習については, V1-IT SOM では,入力 層に  $30 \times 30$  個のユニット,中間競合層に  $10 \times 10$ 個,出力競合層に $20 \times 20$ 個のノードをそれぞれ 格子状に配置した. V1-IT SOM の場合, 実際に 手書き数字の学習を行なうのは IT 層であり, そ の際の特徴空間の次元数は V1 層のノード数と等 しく  $10 \times 10$  次元である.従って,パターン認識 に用いられる競合層における特徴空間の次元数を 揃えるために,基本 SOM では入力層のサイズを  $10 \times 10$ ,競合層のサイズを $20 \times 20$ とした.基本 SOM および V1-IT SOM の第1段階と第2段階 における学習回数はいずれも 1,000,000 回とした. また,学習時の近傍半径dおよび学習率 $\alpha$ の初期 値は,基本 SOM および V1-IT SOM の第2段階 においては $d_{\rm ini}=2$ ,  $\alpha_{\rm ini}=0.2$ とし, V1-IT SOM の第1段階では  $d_{\text{ini}}=5$ ,  $\alpha_{\text{ini}}=0.2$  とした.

#### 3.2 学習終了後の認識手法

 $\mathrm{SOM}$  をパターン認識に用いる場合 , 学習後における競合層の各ノードに対してラベル付けを行なう必要がある . 基本  $\mathrm{SOM}$  の場合 , 競合層のノード j に与えられるラベル  $L_j$  は次式によって決定される .

$$L_j = \text{Class}_c$$
 (3)

$$c = \arg\max_{i} (\cos \theta_{\mathbf{E}_{i}\mathbf{W}_{j}}) \tag{4}$$

ここで, $\mathbf{E}_i$  は訓練用の文字画像を表し, $\mathbf{Class}_c$  は文字画像 c が属するクラス  $(0 \sim 9)$  を意味する.

V1-IT SOM の場合,IT 層におけるノードkの ラベル $L_k$ は,式(3)における $L_j$ を $L_k$ とおき,式(4)における $\mathbf{E}_i$ , $\mathbf{W}_j$ をそれぞれ $\mathbf{V}_i$ , $\mathbf{W}_k$ とすれば,基本 SOM の場合と同様に求められる.ここで, $\mathbf{V}_i$ は式(2) および式(1) によって定義されている.

学習およびラベル付けが終了した後に,テスト用の手書き数字に対する認識率を求める.認識には,最近傍決定則による認識手法 (1-NN) 法)を用いた.このとき,基本 SOM の競合層,あるいは V1-IT SOM の IT 層の各ノードが持つ重みベクトルが,認識クラス決定のためのプロトタイプとなる.今回の実験では,いずれの場合もプロトタイプ数は 400 個である.

#### 3.3 実験結果

表1に,基本SOMおよびV1-IT SOM それぞれにおける,訓練用およびテスト用サンプルに対する認識率を示す.このとき,評価の基準となる認識率として,すべての訓練用サンプルをプロトタイプとした1-NN法(プロトタイプ数10,000個)による認識結果を,項目 DNNC(Direct Nearest Neighbor Classification)として示している.表1から分かるように,基本 SOM および V1-IT SOM では,DNNC の場合と比較して低い認識率となっている.これは,認識に用いられるプロトタイプの数が,DNNCでは10,000個であるのに対して,基本 SOM および V1-IT SOM では400個と非常に少ないためであると考えられる.

基本 SOM と V1-IT SOM での認識率を比較すると, V1-IT SOM は基本 SOM の場合に比べて若干良い認識率が得られている.このことは, V1-IT SOM において,入力パターンの部分的特徴を利用することが有効に作用している可能性を示唆している.

表 1: 手書き数字に対する認識率の比較

	Training(%)	Testing(%)
V1-IT SOM	93.28	92.98
Basic SOM	92.39	91.89
DNNC	_	95.4

### 3.4 ノイズを含むパターンに対するロバスト性 の検証

V1-IT SOM の有効性について検討するために,テスト用サンプルにノイズを加えた場合について,DNNC,基本 SOM,および V1-IT SOM による認識率を比較する.画像に加えるノイズとしては,総画素数の  $5\% \sim 30\%$ に相当する画素をランダムに選び,選ばれた画素の輝度値をランダムに変化させるものとした.例として,5%,15%,30%のノイズを加えた時の手書き数字画像を図 3(a)(b)(c)に示す.

画像に加えるノイズ率を増加させていった時の,DNNC,基本 SOM,および V1-IT SOM の認識率の変化を図 4 に示す.DNNC および基本 SOMでは,ノイズ率の増加に対してほぼ線形に認識率が落ちているが,V1-IT SOM では,ノイズ率の増加に対する認識率の低下が抑えられていること

が分かる.このことは,V1 層各ノードの出力関数である式 (1) において,画像にランダムノイズが乗っていたとしても,方向余弦の値に大きく影響しないことが原因であると考えられる.

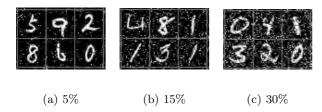


図 3: ノイズ率の増加と手書き数字画像の変化

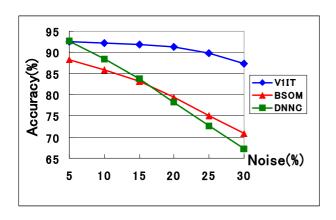


図 4: ランダムノイズの付加に対する認識率の比較

#### **4** むすび

本稿では、視覚情報の部分的特徴を学習する V1層と、それらを統合する IT 層から構成される V1-IT SOM に対して、手書き数字認識問題への適用を試みた、認識実験の結果から、 V1-IT SOM は基本 SOM よりも若干ではあるが精度の高い認識が可能であることが分かった、また、入力画像にランダムノイズを与えた場合の認識実験により、 V1-IT SOM のランダムノイズに対するロバスト性も確認することができた.

今後, V1-IT SOM において入力画像の回転や位置ずれなどの変形に対するロバスト性について詳しく検討することが課題である。また,階層型 SOM としての V1-IT SOM に関連する研究としては,Wu らによる階層型 SOM の提案および手書き数字認識への適用があげられる [8] . Wu らの手法は,第 1 層の SOM で特徴空間を粗く分割しておき,第 2 層の SOM で適応的に細かい分割を

行なうことで,入力パターンの効率的な学習を行ない,認識精度の向上や,認識処理の高速化を図るものである.Wu らの階層型 SOM と,V1-IT SOM との基本性能の比較についても今後の課題である.

#### 参考文献

- [1] Hubel, D.H. and Wiesel, T.N.: Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex, *J. Physiol.*, Lond., Vol. 195, pp. 215–243, 1968.
- [2] Tanaka,K.: Neural Mechanisms of Object Recognition, Science, Vol.262, pp.685–688, 1993.
- [3] 福島邦彦: 神経回路と情報処理, 朝倉書店, 1989.
- [4] T. Kohonen: Self-Organizing Maps, Springer-Verlag Verlin Heidelverg, 1995.
- [5] K.Obermayer, H.Ritter and K.Schulten: A principle for the formation of the spatial structure of cortical feature maps, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol.87, pp.8345–8349, 1990.
- [6] 加藤 聡 , 堀内 匡 , 下平 博 , 堀口 進: 大脳視覚野の情報処理に基づいた階層型 SOM に関する考察, 平成 15 年電気学会 電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.1024-1029, 2003.
- [7] Yann LeCun: The MNIST database of handwritten digits, http://yann.lecun.com/exdb/mnist/
- [8] Jing Wu, Hong Yan and Andrew Chalmers: Handwritten digit recognition using two-layer self-organizing maps, *International Journal of Neural Systems*, Vol.5, No.4, pp.357–362, 1994.

### 連絡先:

#### 加藤 聡

松江工業高等専門学校 情報工学科 〒 690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4

Phone/Fax: 0852-36-5249 E-mail: kato@matsue-ct.ac.jp

## 遺伝的アルゴリズムを使用した資源制約を持つ多重モードプロジェクト問題における一解放 Multi-Mode Project Scheduling Problem with resource-constrained using Genetic Algorithm

KwanWoo Kim, RISE, Waseda University Mitsuo Gen IPS, Waseda University

**Abstract**: In this paper, we develop an adaptive genetic algorithm (aGA) to solve multi-resource constrained project scheduling problem with the multiple modes (mcPSP-mM) which is well known NP-hard problem. A new aGA algorithm approach for solving these mcPSP-mM problems is 1) the design of priority-based encoding for activity priority and multistage-based encoding for activity mode, 2) order-based crossover operator for activity priority and local search-based mutation operator for activity mode, 3) iterative hill-climbing method in GA loop, 4) auto-tuning for the rates of crossover and mutation operators. The numerical experiments show that the proposed aGA is effective to the mcPSP-mM.

Keywords: Multi-resource constrained Project Scheduling Problem, Multiple modes, Adaptive Genetic Algorithm

#### 1. Introduction

Recently, manufacturers tend to handle many real-life project scheduling characteristics such as time-varying resource requirements and availabilities, activity ready time, due dates and deadline, activity overlaps, activity start time

constraints and other type of temporal constraints.

Heilmann (2003) solved the mcPSP-mM problem using the depth-first search based branch-and-bound procedure. Bouleimen and Lecocq (2003) used simultated anneling (SA) algorithms. Reyck and Herroelen (1999) used the local search-based solution methodology or the mcPSP-mM problem. Özdamar (1999) proposed hybrid genetic algorithm which used two-point crossover and mutation. But the two-point crossover happen infeasible offspring with respect to nonrenewable resource in the mode assignment part of the chromosome. This paper is organized as follows. After the introduction, we present a hypothetical instance of the multi-resource constrained project scheduling problem with the multiple modes. In Section 3, we describe the feature of the proposed adaptive genetic algorithm approach including a chromosome representation of GA. In Section 4, numerical experiments are presented to demonstrate the efficiency of the proposed method. Finally, some concluding remarks are given in Section 5.

2. Multi-resource constrained project scheduling problem with the multiple modes

The multi-resource constrained project scheduling problem with multiple modes (mcPSP-mM) with precedence subsumes the activity shop, flow shop, assembly line balancing, and related scheduling problem, we consider the special versions as follows: 1) the mcPSP-mM consists of a number of activities with known processing time, multiple resources, and multimode. 2) the managerial objective is to minimize the makespan. 3) the multiple resources are renewable and nonrenewable resource constraints. 4) the multiple resources are available in limited quantities but nonrenewable from period to period. 5) activities can not be interrupted, there is only one execution mode for each activity. 6) start time of each activity is dependent upon the completion of some other activities (precedence constraints of activities). After finishing a specific activity, next activity must be also started in a project. We consider the following example involving seven activities for mcPSP-mM in Figure 1. The each activity has processing time, two nonrenewable resources, one renewable resource and several execution modes (Table 1). Activity has to make sure that precedence relations are maintained. Two nonrenewable resources are allowed 6 and 7 units to be consumed over the whole project. The start and finish activity are dummy site.

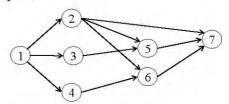


Figure 1 Network representation of example mcPSP-mM

i	j	$p_{ij}$	$oldsymbol{r}_{ij1}$	$r_{ij2}$	$r_{ij3}$	Pred
1	1	Lyg I	(Dum	my site)		
2	1 2 3	12 15 18	3 4 3	5 4 3	3 2 4	1
3	1 2 3	5 11 13	2 5 4	5 2 3 2 4	3 4 2	1
4	1 2	5 14	4 5	2 4	3 2	1
5	1 2 3	15 12 8	2 5 4	3 2 3 3 4 3		2,3
6	1 2 3	13 12 15	5 6 2	3 4 3	3 2 3 2 3	2,4
7	1	10	2,5,6			

i: activity index,  $i = 1, 2, \dots, I$ .

j: mode index,  $j = 1, 2, ..., m_i$  ( $m_i$  is the number of possible modes for activity i).

k: renewable resource type index, k = 1,...,K (K is the number of the renewable resource types)

 $p_{ij}$ : processing time of activity i of selected mode j.  $r_{ijk}$ : amount of nonrenewable resource k required to

execute activity i when mode j is used.

 $Pred_i$ : set of immediate predecessors of activity i.

## 3. Adaptive genetic algorithm

3.1 priority-based encoding for activity priority and multistage-based encoding for activity mode

We use the position to denote an activity ID, the values to denote the priority associated with the activity and to denote the priority for activity mode as shown in Figure 2 [8]. In the Figure 3, we generate the randomly an activity mode with the activity after doing the priority-based decoding for activity priority.

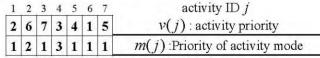


Figure 2 Priority and multistage-based encoding

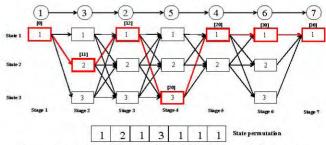


Figure 3. Multistage-based encoding for activity mode

3.2 Iterative hill-climbing method in GA loop

For the proposed hybrid methods, we apply the iterative hill climbing method suggested by Michalewicz (1996). This technique can guarantee the properties of local search technique for hybridization explained above. The main difference between the local search technique proposed for the hybridization of GA and conventional local search technique is that the proposed technique selects a optimal string among each string satisfying constraints in hybrid GA and, on the other hand, the conventional technique selects a current string at random, which makes the former having various search ability and good solution rather than the latter.

#### 3.3 Auto-tuning the rates of crossover and mutation operators

For this heuristic, we use the concept of Mrk, Wong, and Wang (2000). They employed the fitness values of parent and offspring at each generation in order to construct adaptive crossover and mutation operators: this scheme increases the occurrence rates of the crossover and mutation operators, if it consistently produces a better offspring during genetic search process; however, it also reduces the occurrence rates of the operators, if it produces a poorer offspring. This scheme based on the fact that it encourages the well-performing crossover and mutation operators to produce more offspring, while also reducing the chance for the poorly performing operators to destroy the potential individuals during genetic search process.

3.4 Overall adaptive genetic algorithm procedures

In this section, we show the combined procedures of aGA as

Step 1: Initial population

We use the population obtained by random number generation

Step 2: Genetic operators (Gen and Cheng, 2000)

Selection: elitist strategy in enlarged sampling space Crossover: order-based crossover operator for activity priority

Mutation: local search-based mutation operator for ••• activity mode

Step 3: Apply the local search using iterative hill-climbing method in GA loop

Step 4: Apply the heuristic for adaptively regulating GA parameters (i.e., the rates of crossover and the mutation operators)

Step 5: Stop condition

If a pre-defined maximum generation number is reached or an optimal solution is located during genetic search process, then stop; otherwise, go to Step 2.

4. Numerical experiment

In this section, our aGA proposed in Section 3 is tested in order to find the best makespan. The proposed algorithms are implemented in Delphi language on IBM-PC Pentium 1400 MHz clock-pulse and 256MB RAM as operation system. The evolutionary environment for the problem was set as follows: population size was 20, swap mutation and local search-based mutation were 0.3, respectively, and maximum generation was 1000. Table 2 shows multiple modes, processing time, two renewable and nonrenewable resources, and predecessors of each activity on a machine as a simple example of a mcPSPmM. Two nonrenewable resources are allowed 15 and 15 units to be consumed over the whole project.

Table 2 Information for the example mcPSP• mM

i	j	$p_{ij}$	1 40	l 30	$l_3^M$	$l_4^M$	Pred,				
1	1		(Dummy site)								
2	1 2	3 9	6 5	4 3	5 3	7 6	1				
3	1 2 3	1 1 5	8 7 6	4 3 4	5 4 3	8 8 5	1				
4	1 2	5 8	7 6	4 3	2 5	6 7	1				
5	1	- 6	2	5	4	7	2				
6	1 2	6	2 2	3	8 7	4	3				

7	1 2	3 8	5 5	5 4	10 7	5 10	2,3
8	1 2	4 10	6	4 2	7 10	1 3	6
9	1 2 3	2 7 10	2 1 1	4 3 2	6 4 3	5 8 7	5
10	1 2 3	1 1 9	4 5 4	4 2 6	4 6 3	6 8 5	5,7
11	1 2 3	6 9 10	5 3 6	2 1 1	4 3 6	10 9 7	4,6,7
12	1 2	11 8	6 7	2 4	3 5	2 6	8,10
13	1 2 3	5 6 7	2 3 4	3 3 2	5 4 3	4 3 4	8,9,11
14	1 2	4 3	2 3	4 5	3 2	4 3	9
15	1		12,13,14				

We find the three alternative schedules with the minimized makespan ( $t_M = 27$ ) using the aGA as shown Table 3. The alternative schedules are very important part in mcPSP. mM problems. Figure 4 shows the Gantt Chart for the first schedule among the five alternative schedules with minimized makespan made by the operation permutation as follows:

1	2	3	4	5	6	7	8	9						15	
4	15	13	10	11	12	6	9	8	5	3	2	1	7	4	$\nu(j)$
1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	m(j)



Figure 4 Gantt Chart for with minimized makespan

#### 5. Conclusion

In this paper, we have formulated a mathematical model to find a best solution for multi-resource constrained project scheduling problem with the multiple modes (mcPSP - mM). And we have proposed the adaptive genetic algorithm (aGA) for solving the mcPSP—mM. The aGA was performed by the procedures such as priority-based encoding for activity priority and multistage-based encoding for activity mode, order-based crossover operator for activity priority and local searchbased mutation operator for activity mode, iterative hillclimbing method in GA loop, and then we auto-tuned for the rates of crossover and mutation operators. The analysis result has shown that the proposed aGA is found the alternative schedules with optimal makespan for mcPSP mM problem.

#### Reference

Gen M. and Cheng R. (2000). Genetic Algorithm and Engineering Optimization, John Wily and Sons, New York.

Bouleimen K. and Leccoq H. (2003). A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem and its multiple mode version, European Journal of Operational Research, Vol.144, pp.268-281.

Heilmann R. (2003). A branch-and-bound procedure for the multi-

mode resource-constrained project scheduling problem with minimum and maximum time lags, European Journal of Operational Research, Vol. 144, pp. 348-365.

Mak, K. L., Wong, Y. S. and Wang, X. X. (2000). "An Adaptive Genetic Algorithm for Manufacturing Cell Formation," International Journal of Manufacturing Technology, Vol. 16, 2401, 402. p.491-497.

[5]

pp. 491-497.

Michalewicz Z. (1996). Genetic Algorithm + Data Structure = Evolution Programs, Springer-Verlag, New York, third edition.

Özdamar L. (1999). A genetic algorithm approach to a general category project scheduling problem, IEEE Transactions, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews, Vol.29,

No.1, pp.44-59.
[7] Reyck B. D. and Herroelen W. (1999). The multi-mode resourceconstrained project scheduling problem with precedence relations, European Journal of generalized Operational precedence relations, European Journal of Operational Research, Vol. 119, pp. 538-556.
[8] Kim K., Yun Y., Yoon J., Gen M. and Yamazaki G. (2004). Hybrid

genetic algorithm with adaptive abilities for resource-constrained multiple project scheduling, Computer in Industry, (Accepted).

# マッピング手法ベースの遺伝的アルゴリズムによるタスク・スケジューリング問題における一解法 (The New Mapping Approach based on GA for Multiprocessor Task Scheduling)

黄 来国 ReaKook Hwang 早稲田大学 Waseda University 玄 光男 Mituo Gen 早稲田大学 Waseda University

**Abstract** - This paper addresses the problem of scheduling parallel programs represented as directed acyclic task graph (DAG) for execution on multiprocessors with communication time delays. We investigate an alternative paradigm which genetic algorithms (GAs) have recently received much attention as a class of robust stochastic search algorithms for various combinatorial optimization problems. We design chromosome using the priority representation so called priority-based multi-chromosome (PMC) that each chromosome can efficiently represent a task schedule and mapping processors.

Key words - Task scheduling on multiprocessor, Priority-based genetic algorithm.

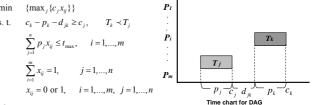
#### 1. Introduction

The task scheduling problem considered in this paper is based the deterministic model, that is, the execution time of tasks and the data communication costs between tasks are assigned in the directed acyclic graph (DAG). Many heuristic based methods and approaches to the task scheduling problem have been proposed [1]-[3]. We assume that the multiprocessor system is uniform and nonpreemptive and communication delays between processors are not negligible. When two communicating tasks are mapped to the same processor, the communication delay becomes zero because the data transfer is effective.

We solve this problem by GA using the concept of priority method, which considered the precedence relations among the tasks and mapping method, called multi-chromosome was introduced.

#### 2. Task Scheduling Problems and Model

We formulate the problem of task scheduling that can be stated as finding a scheduling for a general directed acyclic graph to be executed on a parallel processing system so that schedule length can be minimized. The problem of optimal task scheduling of a DAG and a multiprocessor system with m processors is to assign the computation tasks to processors in such a way that precedence relations are maintained and that all tasks are completed in the shortest possible time as given following mathematical formulation:



where

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if task } T_j \text{ is assigned} & \text{to processor} & P_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

n: number of tasks, m: number of processors

 $c_k$ : the completion time of task  $T_k$ 

 $p_k$ : the processing time of task  $T_k$ 

 $d_{ik}$ : the data communication time between  $T_i$  and  $T_k$ 

 $t_i$  : the time required to process all tasks assigned to processor  $P_i$ 

 $\prec$  : represents a precedence relation between tasks; that is,  $T_k \prec T_j$  means that  $T_k$  precedes  $T_j$ 

 $t_{\max} = \max_i \{t_i\}$ 

where  $T_k \prec T_j$ 

$$d_{jk} = \begin{cases} \tau_{jk}, & \text{if task } T_j \text{ and } T_k \text{ are assigned to different} \\ & \text{processor} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

 $\tau_{ik}$  : the communication delay between  $T_i$  and  $T_k$ 

#### 3. Priority-based Genetic Algorithm

#### 3.1 Representation and Encoding/ Decoding

Normal binary coding would not be suited for this GA in multiprocessor. Gen, Cheng *et al.*[5][6] proposed priority-based encoding and here we proposed extension of priority-based encoding that use priority-based multi-chromosome in this chromosome,

each element in the strings has two values, one to represent the priority of task nodes and another to represent processor numbers for mapping as shown in Figure 1.

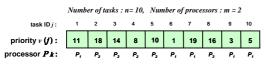


Figure 1. An example of priority-based multi-chromosome

Suppose we want to assign n tasks to m processors by using above chromosome. First, we try to find first schedule - if task1 and task2 are eligible for the position, which can be suitable for start node. The priorities of them are 11 and 18, respectively. Then the task2 has the highest priority and is put into the schedule S. And we repeat these steps until we obtain complete schedule. Next step, we assign tasks to processors from the completed schedule which also corresponds to value of priority V(j). In the example, there are just two processors so that we can check the V(j) is even number or odd number. If value of priority has even number, it assign to processor  $P_2$  and odd number will be assigned processor  $P_1$ .

#### 3.2 Crossover

Here the position-based crossover operator by the weight mapping crossover (WMX) that we proposed. It can be viewed as two-point crossover of binary string and remapping by order of different binary string as shown in Figure 2.

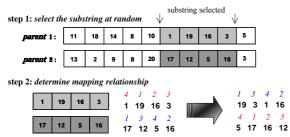


Figure 2. Weight mapping crossover operator (WMX)

#### 3.3 Mutation

We proposed the swap mutation operator, in which two positions are selected at random and their contents are swapped.

#### 4. Experimental result and comparison

In this section, the comparative results are used to illustrate the effectiveness of our proposed approach. For comparison, we used Kwok and Ahmad's [2]

comparative data and example that the best solution of schedule by the other four scheduling algorithms used as table 1. The parameters were set as follows:  $pop\_size = 100$ ,  $gen_{max} = 2000$ ,  $p_c = 0.7$  and  $p_m = 0.3$ .

Table1. Comparative Results with Kwok's data [2]

Algorithms	MCP	DSC	MD	DCP	Our GA
NO.	4	6	2	3	2
Processor	4	О	3	3	2
B. Solution	520	460	460	440	440

■ MCP (Modified Critical Path) by Wu & Gajski, DSC (Dominant Sequence Clustering) by Yang & Gerasoulis, MD (Mobility Directed) by Wu & Gajski, DCP (Dynamic Critical Path) by Kwok & Ahmad [2].

#### 5. Conclusion

This paper presents a eifficient algorithm to schedule the tasks of a DAG onto processors of multiprocessor system and is based on the priority-based GA and we compared the proposed algorithm with the some heuristic task schedule algorithm [2]. As result, we proposed priority-based multi-chromosome that helped to make a schedule and assign to processors more efficiently.

#### 6. References

- [1] M.A. Palis & J.C. Lieu: "Task clustering and scheduling for distributed memory parallel architectures", *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, Vol.7 No.1, pp.46-55, 1996.
- [2] Kwok and Ahmad: "Dynamic Critical-Path Scheduling: An Effective Technique for Allocating Task Graphs to Multiprocessors", *IEEE Trans. on Parallel* and Distributed Systems, Vol.7, No.5, 1996.
- [3] S. H. Hou. Edwin, A. Nirwan & R. Hong: "A Genetic Algorithm for Multiprocessor Scheduling", *IEEE Trans.* on *Parallel and Distributed System"*, Vol.5, No.2, pp.113-120, 1994.
- [5] M. Gen & R. Cheng: *Genetic Algorithms & Engineering Design*, John Wiley & Sons, New York. 1997.
- [6] M. Gen & R. Cheng: *Genetic Algorithm and Engineering Optimization*, John Wiley and Sons, New York. 2000.

〒808-0135 北九州市若松区ひびきの 207 番地 早稲田大学 情報生産システム研究科 黄 来国 Tel: 090-6294-6041 E-Mail: rkhwang@ruri.waseda.jp

# 多目的 GA によるネットワーク設計問題の一解法 Multiobjective Genetic Algorithm for Solving Network Design Problem

林 林\* 玄 光男\* Lin Lin Mitsuo Gen \*早稲田大学大学院情報生産システム研究科

The Graduate School of Information, Production and Systems, Waseda University

**Abstract:** This paper proposes a new multiobjective Genetic Algorithm (GA) approach for bicriteria network design problem (BND). The objectives are to maximize flow and minimize cost. The proposed method adopts priority-based encoding method to represent a path in the network. Different from other encoding methods, such as path oriented encoding method, priority-based encoding method can be applied for different network design problems, *i.e.*, shortest path problem, maximum flow problem, minimum cost flow problem, etc. In the proposed method, while weighted-sum approach is employed to evaluate solutions found in the search process, nondominated sorting technique is used to find Pareto optimal solutions. Numerical analysis shows the efficiency and effectiveness of the GA approach on the bicriteria network design problem.

#### 1. Introduction

Networks are pervasive and arise in numerous applications. Many applications in many different types of systems: communications, hydraulic, mechanical, electronic and logistics. In the real world, there are usually has to consider simultaneously multicriteria in network design problems. In generally, we can not get the optimal solution of the problem because these objectives usually conflict with each other in practice. The real solutions to the problem are a set of Pareto optimal solutions (Chankong and Haimes, 1983), but the calculation of it is a difficult task because it is an NP-hard problem and no previous work in this area has been reported in literature.

In this paper, bicriteria network design problem with maximum flow and minimum cost has been considered and a genetic algorithm approach is proposed. The proposed method adopts priority-based encoding method to represent a path in the network. In the proposed method, while weighted-sum approach is employed to evaluate solutions found in the search process, nondominated sorting technique is used to find Pareto optimal solutions.

#### 2. Bicriteria Network Design Problem (BND)

Let G=(N,A) be a directed network defined by a set N of n nodes and a set A of m directed arcs. Each arc  $(i, j) \in A$  has an associated  $cost\ c_{ij}$  that denotes the cost per unit flow on that arc. It is assumed that the flow cost varies linearly with the amount of flow. Each arc  $(i, j) \in A$  has a capacity  $u_{ij}$  that denotes the maximum amount of flow on the arc and a lower bound 0 that denotes the minimum amount of flow on the arc. The decision variables in BND are the maximum possible flow  $z_1$  with minimum cost  $z_2$  from a specified source node s to another specified sink node t.  $x_{ij}$  represents the flow on an arc  $(i, j) \in A$ . BND is a multiobjective optimization model formulated as follows:

$$\max \ z_1 = f$$

$$\min \ z_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij}$$
s.t. 
$$\sum_{i=1}^m x_{ij} - \sum_{k=1}^m x_{ki} = \begin{cases} f \ (i=1) \\ 0 \ (i=2,3,\cdots,m-1) \\ -f \ (i=m) \end{cases}$$

$$0 \le x_{ij} \le u_{ij} \ , \forall (i,j) \in A$$

$$f \ge 0$$

#### 3. New Approach of Multiobjective GA

- **3.1 Genetic Representation** Gen *et al.* proposed a priority-based encoding method firstly for solving resource-constrained project scheduling problem (rcPSP) and they also adopted this method for solving SPP in [1]. In this encoding method, the position of a gene is used to represent node ID and its value is used to represent the priority of the node for constructing a path among candidates. A path can be uniquely determined from this encoding.
- **3.2 Decoding Method** To describe this decoding method, we first define a one-path growth procedure that decodes one path base on the generated chromosome with given network; and then present a overall-path growth procedure that obtain overall possible path for the given chromosome.
- 1) <u>One-path growth procedure</u>: The path is generated by procedure 1.

procedure 1: one path growth

input: number of nodes m, chromosome  $v_k$ , the set of nodes  $S_i$  with all nodes adjacent to node i

output: path  $P_k$ 

step 0: the source node  $i\leftarrow 1$ ,  $P_k \leftarrow \phi$ 

step 1: If  $S_i = \phi$ , go to step 3; otherwise, continue.

step 2: Select *I* from  $S_i$  with the highest priority, and go back to step 1.

Table 1. Comparison of the four approaches using the D1<sub>R</sub> measure.

Test Problems		D1 <sub>R</sub> me	easure			CPU Tin	nes ( <i>ms</i> )	
(# of nodes/ # of arcs)	AWA	RWA	SPEA	NSGA-	AWA	RWA	SPEA	NSGA-
25/49	143.58	191.21	315.61	228.65	14170	15122	17635	15693
25/56	141.43	203.96	224.40	185.89	14961	11918	16684	15981

if  $v_k(I)\neq 0$  then  $v_k(I)=0$ ,  $P_k \leftarrow P_k \cup \{x_{ii}\}$ ,  $i\leftarrow I$ ; else  $v_k(I)=0$ 

step 4: Output the complete path  $P_k$ 

$$P_k = \{x_{1l_1}, x_{l_1, l_2}, x_{l_2, l_3}, ..., x_{l_{m-1}, l_m}\}$$

- 2) <u>Overall-path growth procedure</u>: For a given path, we can calculate its flow  $f_k$  and the cost  $c_k$ . By removing the used capacity from  $u_{ij}$  of each arc, we have a new network with the new flow capacity  $\tilde{u}_{ij}$ . With the one-path growth procedure, we can obtain the second path. By repeating this procedure we can obtain the maximum flow for the given chromosome till no new network can be defined in this way.
- **3.3 Fitness Assignment** The weighted-sum approach can be viewed as an extension of methods used in the multiobjective optimization to the GAs. In this paper, the fitness of each individual in a generation is calculated using AWA. Adaptive evaluation function based on the AWA is given in procedure 2.

#### procedure 2: Adaptive Weight Approach

input: chromosome  $v_k$   $k \in pop\_size$ , the flow  $f_i^k$  and the cost  $c_i^k$  of each  $v_k$ 

output: fitness value  $eval(v_k)$ ,  $k \in pop\_size$ 

step 1: Define two extreme points: the maximum extreme point  $z^{+}$  and the minimum extreme point  $z^{-}$  in criteria space as  $z^{+} = \{z_{1}^{\max}, z_{2}^{\max}\}, z^{-} = \{z_{1}^{\min}, z_{2}^{\min}\}$ . Where  $z_{1}^{\max}$ ,  $z_{2}^{\max}$ ,  $z_{1}^{\min}$  and  $z_{2}^{\min}$  are the maximal value and minimal value for objective 1 and objective 2 in the current population. They are defined as follows:

$$\begin{split} &z_{1}^{\max} = \max\{f_{i}^{k} \mid i \in L_{k}, \ k \in pop\_size\}, \\ &z_{2}^{\max} = \max\{-c_{i}^{k} \mid i \in L_{k}, \ k \in pop\_size\}, \\ &z_{1}^{\min} = \min\{f_{i}^{k} \mid i \in L_{k}, \ k \in pop\_size\}, \\ &z_{2}^{\min} = \min\{-c_{i}^{k} \mid i \in L_{k}, \ k \in pop\_size\} \end{split}$$

step 2: The adaptive weight for objective 1 and objective 2 are calculated by the following equation:

$$w_1 = \frac{1}{z_1^{\max} - z_1^{\min}}, \qquad w_2 = \frac{1}{z_2^{\max} - z_2^{\min}}$$

step 3: Calculate the fitness value for each individual.

$$eval(v_k) = \frac{\sum_{i=1}^{L_k} \left( w_1(f_i^k - z_1^{\min}) - w_2(c_i^k + z_2^{\min}) \right)}{L_k},$$

$$\forall k \in pop \quad size$$

#### 4. Experiments and Discussion

4.1 **Test Problems**: The effect of different solution approaches on multiobjective GAs is investigated using

SPEA[3], NSGA [4], MOGLS[5] and AWA to the 2 test problems [2].

**4.2 Performance Measures:** We mainly use a performance measure based on the distance from a reference solution set (i.e., the Pareto-optimal solution set or a near Pareto-optimal solution set) for evaluation the solution set  $S_j$ . This measure was used in [5] and referred to as D1<sub>R</sub>. Let  $S^*$  be the reference solution set. The D1<sub>R</sub> measure can be written as follows:

$$D1_{R} = \frac{1}{|S^*|} \sum_{y \in S^*} \min\{d_{xy} | x \in S_j\}$$

where  $d_{xy}$  is the distance between a solution x and a reference solution y in the 2-objective space.

**4.3 Discussion of the Results:** The results of the four solution approaches are given in Table 1. While in first problem, AWA got the shortest distance  $D1_R$ , and also is faster than others. In second problem, RWA is faster than AWA, but its solution (distance  $D1_R$ ) quality also decreases.

#### 5. Conclusion

In this paper, we presented a new bicriteria network design model including MXF and MCF. The objectives are to maximize flow and minimize cost. To solve the problem, GA approach was proposed with priority-based encoding method. The effect of different solution approaches on multiobjective GAs was also investigated using SPEA, NSGA , MOGLS and AWA.

#### References

- [1] Gen, M., R. Cheng & D. Wang (1997). Genetic Algorithms for Solving Shortest Path Problems. In Proc. of IEEE Int. Conf. on Evol. Comput., Indianapolis, Indiana, 401-406.
- [2] Munakata, T. & D. J. Hashier (1993). A genetic algorithm applied to the maximum flow problem. In Proc. of the 5th Inter. Conf. on Genetic Algorithms, San Francisco, 488-493.
- [3] Zitzler, E & L. Thiele (1999). Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach. *IEEE Trans. on Evol. Comput.*, 3(4), 257-271.
- [4] Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal & T. Meyarivan (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA- . IEEE Trans. on Evol. Comput., 6(2), 182-197.
- [5] Ishibuchi, H., T. Yoshida & T. Murata (2003). Balance Between Genetic Search and Local Search in Memetic Algorithms for Multiobjective Permutation Flowshop Scheduling. *IEEE Trans. on Evol. Comput.*, 7(2), 204-223.

# 遺伝的アルゴリズムを用いた複数デポ付時間枠付制約車両配送問題 A Genetic Algorithm for Multi-depot VRP with Time Windows

呉 成真\* Sungjin Oh 玄 光男\*

Mitsuo Gen

\*早稲田大学大学院情報生産システム研究科

The Graduate School of Information, Production and Systems, Waseda University

**Abstract:** Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRP-tw) is a well-known combinatorial optimization problem, which is encountered very frequently in decision-making within distribution system. In this paper, for a more realistic approach that provides transportation service in logistics, we consider its mathematical model formulated as multi-depot Vehicle Routing Problem with time windows (mdVRP-tw). This model includes not only multi-depot VRP also time window constraints. Thus, this problem becomes an NP-hard problem due to an NP-hard of VRP-tw. We show the computational result by GA implementation in Numerical experiments.

Keywords: multi-depot VRP (md-VRP), VRP with time window, Genetic Algorithm (GA)

#### I. Introduction

In many logistic environments managers must make decisions such as location for distribution centers (DC), allocation of customers to each service area, and transportation plans connecting customers [4].

To consider realistic VRP, a fleet of vehicles is available at each DC. These vehicles need to visit many customers while satisfying their capacity and time constraints.

To solve mdVRP-tw, as the number of customers is usually much larger than the number of DC, we adapted cluster first and route vehicles approach. VRP-tw is more complex as it involves servicing customers with time windows using multiple vehicles that vary in number with respect to the problem. Multi-depot vehicle routing problem with time window (mdVRP-tw) must be designed so that:

(1) All distances are represented by Euclidean distance, (2) each customer is serviced by one of the depot, (3) each route starts the depot and then returns depot, (4) each customer can be visited only once by a vehicle, (5) the vehicle capacity of each route is equal, (6) total customer demand for each route does not exceed the vehicle capacity, (7) Each customer is associated with a time window period for its service time. (8) Each vehicle has maximum travel time.

The objective is to determine depot and vehicle routing system to achieve the minimal cost satisfying

with the DC capacity and time window constraints. This problem is an NP-hard problem due to an NP-hard of VRP-tw. To solve this problem, we develop a GA approach.

#### 2. Mathematical model

#### 2. 1 Clustering customers (Phase 1)

In this phase, we divided set of customers into regionally bounded sets that satisfy restrictions to ensure within the customers [2]. The objective here is to determine the DC to satisfy the customer demand so that the total distance is minimized.

#### 2. 2 Vehicle Routing (Phase 2)

As the output from the previous phase, we determine the set customers assigned to each DC. At this phase, we would like to make the vehicle routing to satisfy all constraints, at the same time minimizing the total travel cost.

#### Parameters:

- n total number of customers
- l total number of vehicles
- $d_i$  demand of customer j
- $g_j$  the earliest arrival time at customer j
- $h_i$  the latest arrival time at customer i
- Y<sub>e</sub> capacity of vehicle e
- $S_{ij}$  service time at customer j in DC i
- $C_{jk}$  cost from customer j to customer k
- $t_{jk}$  travel time from customer j to customer k
- $T_{ei}$  maximum time of a route allowed for vehicle e in DC i

#### Decision variables:

- $a_{ii}$  arrival time at customer *j* in DC *i*
- $W_{ij}$  waiting time at customer j in DC i
- $z_{\it eijk} = 1 \quad \text{if the vehicle $e$ travels from customer $j$} \\ \qquad \qquad \text{to $k$} \quad \text{in DC $i$. Otherwise } z_{\it eiik} = 0 \ .$

Here, we would like to determine the set of vehicle routes to satisfy the customer demand within its time window periods. We formulate its mathematical model as follows:

$$\min \quad \sum_{i=1} \sum_{e \in E_i} \sum_{j \in C_i} \sum_{k \in C} c_{jk} z_{eijk} \tag{1}$$

$$\sum_{e \in E_i} \sum_{j \in C_i} z_{eijk} = 1, \quad \forall i, k \in C_i - \{0\},$$

$$\tag{2}$$

$$\sum_{j \in C_i - \{0\}} \sum_{k \in C_i} d_j z_{eijk} \le Y_e, \quad \forall i = 1, \ e \in E_i$$

$$\tag{3}$$

$$\sum_{k \in C_i} z_{ei0k} = 1, \quad \forall e \in E_i, i$$
 (4)

$$\sum_{j \in C_{i} - \{0\}} z_{eijk} - \sum_{k \in C_{i} - \{0\}} z_{eijk} = 0, \quad \forall e \in E_{i}, i$$

$$\sum_{k \in C_{i} - \{0\}} z_{eij0} = -1, \quad \forall e \in E_{i}, i$$
(6)

$$\sum_{j \in C_i} z_{eij0} = -1, \quad \forall e \in E_i, i$$
 (6)

$$(a_{ik} + w_{ik}) + M(1 - z_{eijk}) \ge (a_{ij} + w_{ij}) + t_{ij}, \quad \forall i, j, k \in C_i, e \in E_i$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} (s_{ij} + t_{jk} + w_{ik}) z_{eijk} \le r_{ei}, \ \forall e, i$$
 (8)

$$\sum_{e=1}^{E} \sum_{j=1}^{n} (a_{ij} + s_{ij} + t_{jk} + w_{ik}) z_{eijk} \le a_{ik}, \ \forall i, k$$
 (9)

$$g_{j} \leq (a_{ij} + w_{ij}) < h_{j}, \ \forall i, j$$

$$z_{eiik} = 0 \text{ or } 1, \qquad \forall e \in E_{i}, i, j, k \in C_{i}$$

$$(10)$$

# 3. Design of the algorithm

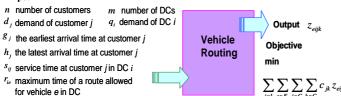
#### 3.1 Clustering customers (Phase 1)

The aim of this phase is to determine the assignment of customers to each DC so that the total distance is minimized. We used the parallel assignment. This heuristics compares the cost of assigning a customer to its closest DC with the cost of assigning the customer to any other depot.

#### 3.2 Vehicle routing (Phase 2)

The aim of this phase is to develop the vehicle routing from DC satisfying time window constraint.

#### Input



#### 3.2.1 Genetic operators

In our proposed method, we used genetic operators as follows: For the selection methods, we use elitist method that enforces the best chromosomes into the next generation. PMX crossover Insertion mutation is used [1].

#### 4. Numerical Experiments

In this section, consider a test consists of 3DCs and 20 customers. All experiments were realizing using C++ on Pentium 4 processor (1.5-GHz clock).  $pop\_size = 100;$ population size: Maximum generation: *max\_gen* =1000; Terminating condition: 100 generations with same fitness.

As shown in Table 1, we found best solution from the result of test problems under almost the conditions of  $P_C = 0.6$ ,  $P_M = 0.5$ .

Table 1. Performance comparision

Test				
Problems	$P_C$	$P_M$	V*	T*
(D* / C*)				
_	0.6	0.3	5	153.26
2(#1, #2) / 20	0.6	0.5	5	152.74
	0.6	0.7	5	153.25
	0.6	0.3	5	137.98
3(#1, #2, #3) / 20	0.6	0.5	5	137.30
	0.6	0.7	5	136.29

D\*: Number of DCs (selected DC)

C\*: Number of Customers

V\*: Number of Vehicles

T\*: Total distance (Best solution)

#### 5. Conclusion

(7)

(11)

In this paper, we consider multi-depot Vehicle Routing Problem with time windows (mdVRP-tw). Since this problem is very difficult to be solved optimally, we proposed GA for solving this problem. We have shown that the computational result by GA implementation. As a near future work, we will compare the proposed method with conventional methods.

#### Reference

- [1] M. Gen & R. Cheng: Genetic Algorithms and Engineering Design, John Wiley & Sons, New York,1997.
- [2] M. Filipec, D. Skrlec & S. Krajcar: Darwin meets computers: new approac h to multiple depot capacitated vehicle routing problem, Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man, Cybernetics, vol.1, 421 -426,1997.
- [3] K.C. Tan, T.H. Lee, K. Ou & L.H. Lee, A messy genetic algorithm for the vehicle routing problem with time window constraints, Proc. of Congress on **Evolutionary** Computation, vol. 1, 679 -686, 2001.
- [4] T.H. Wu, C. Low & J.W. Bai, Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems, Computers & Operations Research, Vol.29, 1393-1415, 2002.

#### 連絡先:

呉 成真

早稲田大学大学院情報生産システム研究科 〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-7

E-Mail: sjoh@fuji.waseda.jp

# マルチエージェントシステムによるサプライチェーンマネジメント Multi-Agent System for Supply Chain Management

金寛允\* Kwanyun Kim 玄 光男\*

Mitsuo Gen

\*早稲田大学大学院情報生産システム研究科

The Graduate School of Information, Production and Systems, Waseda University

**ABSTRACT-**Supply chain networks are highly complex structures made up of a multitude of competing individual companies in the real world. Supply chain coordination is very important in the supply chain network because coordination ensure that each stage of the supply chain takes actions that increase total supply chain revenues. It views the supply chain as composed of a set of intelligent software agents, each responsibility for one or more activities in the supply chain networks and each interacting with other agents in the planning and execution of their responsibilities. This paper presents model for the construction of such agent-based software architecture.

**KEYWORDS**: Multiagent system, Supply Chain Management, Coordination, Agent Communication Language (ACL)

#### 1. Introduction

A supply chain management is to efficiently integrate suppliers, plants, distribution centers and retailers and coordinate raw materials, information and financial flows in order to fulfill ultimate customer demands in supply chain. Each party has involved their own resources, capabilities, tasks, and objectives in the supply chain. A supply chain is dynamic and involves the constant flows of materials, information, and funds across multiple functional areas. There are already a variety of information systems but there is lack of coordination and integration between the systems. For this reason agent technology is very suitable to support collaboration in supply chain management. In this paper we propose a model for construction of multiagent system. Supply chain satisfies the overall operations and logistics policies are proposed for supply chain and logistics. In order to keep competitive advantage up, it is not enough to construct efficient supply chains. The objective of the multiagent systems represents business entities as agents and the information and material flows with proposed coordination method for collaborating among agents. In the following, we present an approach to propose and visualize such a multiagent system.

#### 2. Construction of multiagent system

A Supply chain is composed of several autonomous or semi-autonomous business entities that can be viewed as agents. Each business entity

has its capability and capacity and can be assigned to or take certain types of tasks, according to its organizational roles. Every agent is responsible for one or more activities in the supply chain and each interacting with other agents for planning and executing their responsibilities [3]. A logical agent represents a logical object with an information function as the Figure 1, such as scheduling agent, order agent, etc.

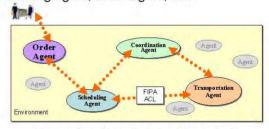


Figure 1. Interaction among agents

**Coordination agent** is the heart of this multi-agent system, is the representative of the multi-agent system when communicating with other coordination agents, and is the controller of the other agents.

**Order Agent** is responsible for acquiring orders from customers and handling customer request for modifying or canceling their orders.

**Transportation agent** is responsible for the assignment and scheduling of transportation resources to satisfy customers specified. It can consider a variety of transportation assets and transportation routes in the construction of its schedules.

Scheduling agent is responsible for scheduling

and rescheduling activities in each stage.

**Interface agent** is responsible for interacting with the user.

**Information Agent** is responsible for gathering and providing information that allow other agents from the computerized organization to be selectively aware of relevant information by providing communication and information services.

#### 3. An Overview of Coordination Techniques

There are many approaches which have been devised to achieve coordination in agent systems [1] as following categories:

- · Organizational structuring
- Contracting
- Multi-agent planning
- Negotiation

#### 3.1 Organizational Structuring

It provides a framework for activity and interaction through the definition of roles, communication paths and authority relationships. Durfee et al. define this as the pre-defined long term relationships between agents.

#### 3.2 Contracting

A now-classic coordination technique for task and resource allocation among agents and determining organizational structure is the contract net approach [4].

#### 3.3 Multi-agent Planning

In order to avoid inconsistent or conflicting actions and interactions, agents build a multi-agent plan that details all their future actions and interactions required to achieve their goals, and interleave execution with more planning and re-planning. There are two types of multi-agent planning [1]:

- · · Centralized multi-agent planning
- .. Distributed multi-agent planning

#### 3.4 Negotiation

Most coordination schemes involve some sort of negotiation. For this reason, it has merited a section on its own in this paper. The literature abounds because negotiation is a key coordination technique used to address several Distributed Artificial Intelligence (DAI) issues. However, there are probably as many similar definitions of negotiation as there are negotiation researchers.

#### 4. Multi-agent Communication

Communication has long been recognized as a topic of central importance in computer science, and much formalism have been developed for representing the properties of communication concurrent systems (Hoare, 1978; Milner, 1989). Such formalisms have tended to focus on a number of key issues that arise when dealing with systems that can interact with one another.

#### 4.1 Agent Communication Language (ACL)

A language with precisely defined syntax, semantics and pragmatics that is the basis of communication between independently designed and developed software agents. ACL is the primary subject of this part of the FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) specification [2] [5]. FIPA ACL deals with intention interpretation and supports the communication between agents through explicit linguistic actions. The information content transmitted and the protocols are those described and defined in FIPA specifications.

#### 5. Conclusion

the This paper proposes model for construction of such agent-based software architecture. The approach depends on the use of an agent shell, providing generic, reusable, and guaranteed components and services for speech-act-based communication. In this paper, We proposed a multiagent system to describe a Supply chain network, its component, behaviors, and interaction, represent interaction of agents and the involved information flows with proposed for collaborating among agents. The proposed model aims at the design of efficient, effective, and flexible supply chain . In near future work, we will develop and expand our proposed model.

#### Reference

- [1] H. Nwana, L. Lee, N. Jennings, Coordination in Software Agent Systems, *BT technology Journal*, Vol. 14, No. 4, 1996
- [2] J. P. Bigus & J. Bigus (2001): Constructing Intelligent Agent Using Java, John Wiley & Sons
- [3] M. S. Fox, M. Barbuceanu & R. Teigen (2000): Agent-Oriented Supply Chain Management, International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Vol. 12, 165–188
- [4] E.H. Durfee & V.R. Lesser, Using Partial Global Plans to Coordinate Distributed Problem Solvers, *Proc. of Int. Joint 15 Conf. on Artificial Intelligence*, 1987.
- [5] http://www.fipa.org/specs/fipa00018/OC00018A.pdf

#### 金 寛允

早稲田大学大学院情報生産システム研究科 〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-7 N261 E-Mail: kykim@akane.waseda.jp

# ハイブリッド GA によるサプライチェーン・ネットワークの障害物付き施設配置問題による一解法

# (Capacitated Obstacle Facility Location Problems in Supply Chain Network using hGA)

谷口 純一玄 光男Jyunnichi TaniguchiMituo Gen宮崎産業経営大学,早稲田大学早稲田大学Miyazaki Sangyou-keiei Univ.Waseda University

**ABSTRACT -** In this paper, an extended location-allocation problem with obstacles is considered. Since this problem is very complex and with many infeasible solutions, no direct method is effective to solve it, we propose a hybrid Genetic Algorithm (hGA) for effectively solving this problem. The proposed hGA combines two efficient methods based on Lagrangian relaxation and Dijkstra's shortest path algorithm. We demonstrate the computational result by comparing it with the traditional method.

**キーワード**: 立地・配置問題と遺伝的アルゴリズム, ラグランジュのリラクゼーション法, ダイクストラの最短パス・アルゴリズム, ハイブリッド, サプライチェーン

#### 1. はじめに

Cooper<sup>[1-2]</sup>が立地・配置問題を示して以来,数多くの立地・配置モデルが文献で述べられてきた<sup>[5,6,7]</sup>。しかし,それらのほとんどは,設備場所の位置を障害区域のない理想的な場所を想定して論議している。しかし,現実的には『場所の禁止』と『パスの接続禁止』の二種類の障害を考慮する必要がある。

また、遺伝的アルゴリズム(GA)は、立地・配置問題<sup>[3-4]</sup>のような、最適化問題を解決するために、非常に有効な手段であるということが実証されている。我々はこの障害区域に関する立地・配置問題を解決するために、Lagrangianの緩和や Dijkstra の最短のパス・アルゴリズムを組み込んだ hGA アプローチを提案する。

#### 2. 数学的モデル

全ての顧客に対し、同均一のサービスを提供するためにm個の流通センター(DC)とm顧客、さらにm個の障害区域を伴うモデルを考えた。このモデルの数学的な定式化の条件は以下の通りである:

- j番目の顧客は d<sub>j</sub>のサービス要求量を持っている
   (j=1,2,...,n)<sub>e</sub>
- i 番目の流通センターDC は q<sub>i</sub>のサービス量を持ってい(i=1,2,...,m)。
- 個々の顧客は一つの流通センターからのみサービスを受けられる。
- DCは,どの障害区域Q<sub>k</sub>k=1,...,qの内側にも構築することは出来ない。
- DCと顧客間のパスは、障害区域のどれをも通り抜けることはできない。

この問題は、『顧客と DC 間の距離の合計』や『各顧客に対する DC のサービスの最小化』となるような最適な場所を選ぶことであり、また『障害区域は凸面の多角形として表わすことが可能である』と仮定する。

上記の条件を考慮した数学モデルは,以下のように定式化することができる:

min 
$$f(D, z) = \sum \sum t(D_{i}, C_{j}) z_{ij}$$
s.t. 
$$\sum_{j=1}^{n} d_{j} z_{ij} \leq q_{i}, \qquad i = 1, 2, \cdots, m$$

$$\sum_{i=1}^{m} z_{ij} = 1, \qquad j = 1, 2, \cdots, n$$

$$D_{i} = (x_{i}, y_{j}) \notin Q_{k}, \quad i = 1, 2, \cdots, m, k = 1, 2, \cdots, q$$

$$(x_{i}, y_{j}) \in R_{T}, \qquad i = 1, 2, \cdots, m$$

$$x_{i}, y_{j} \in R \qquad i = 1, 2, \cdots, m$$

$$z_{ij} = 1 \text{ or } 0 \qquad i = 1, 2, \cdots, m, j = 1, 2, \cdots, n$$

ここで

 $C=(u_i, v_i)$  j番目の顧客の位置。

- $D_i = (x_i, y_i)$  決定変数であり; /番目の流通センター $DC_i$ の 位置は,任意の障害区域の内部に在っては ならないことを示す。
- $t(D_i,C_j)$  流通センターDCi と顧客  $C_j$  間に在る障害区域を回避して,最短で接続するパスの距離。
- R<sub>T</sub> 設置・配置問題を考慮したトータル・エリア。
- $z_{ij}$  0-1 の決定変数であり;  $z_{ij}$ =1 は , DCi から j番目 の顧客へサービスの提供をすることを示し ,  $z_{ij}$ =0 はそうでないことを示す。

#### 3. アルゴリズムの設計

上に示されるように,本モデルには二種類の決定変数がある。一つは連続的な設置変数であり,もう一つは 0-1 の割り当て変数である。また,この配置問題を解決することでグローバルな投資コストを追求することが可能となる。

#### 3.1 染色体表現

DC の座標位置を決める染色体の表現は,非常に重要な課題であり,GA の成功の鍵を握る問題でもある。位置変数は障害区域の場所を指定する変数であり,またこれは制限付きであり,かつ連続的に繋がったものである。

次の式は DC の座標位置を表す染色体の構造を示す:  $C_t = [(x_1^{\ t}, y_1^{\ t}), (x_2^{\ t}, y_2^{\ t}), \cdots, (x_i^{\ t}, y_i^{\ t}), \cdots, (x_m^{\ t}, y_m^{\ t})]$  この $(x_i^{\ t}, y_i^{\ t})$ は t-番目の染色体の i 番目の DC の場所を表わす $(i=1,2,\ldots,m)$ 。

- 3.2 染色体の修復
- 3.3 初期化
- 3.4 染色体の評価
- 3.5 遺伝的オペレータ
  - A. 交叉
  - B. 突然変異
  - C. 選択

#### 4. 数值実験

提案した方法の有効性を確認するために,我々は,24の顧客の位置と,その要求量に関する任意に生成されたテスト問題を考えた。また,この問題には小さな2つの町と1つの大きな湖,1つの禁止地域,そして4つの障害区域が存在する。hGAのパラメーターは $pop_size=20,pc=0.5,p_m=0.5,max_gen=1000$ である。

ハイブリッド型遺伝的アルゴリズムで提案したこの結果は、参考文献<sup>61</sup>の中の発見的方法によって示唆された結果より、より満足度の高い解が求められた。その相対的な結果はテーブル1で示した通りである。

図1は,hGA およびf-hGA の適合値の収束過程を比較したグラフである。またこの図は,最良解に収束するまでの過程で,hGA が従来の手法より,より早く計算されることを示している。

Method	Total length	DC locations	Customer allocations
Heuristic	184.21	1.(6.00, 31.20)	17,19,23,24
[6]		2.(7.0, 6.59)	11,12,13,14,15,16
		3.(26.40, 9.60)	5,6,7,8,9,10
		4.(4.80, 13.20)	1,2,3,4,18,20,21,22
hGA	164.07	1.(5.2, 5.0)	1,2,3,4
		2.(25.2, 29.6)	5,6,7,8,9,10
		3.(26.6, 11.7)	11,12,13,14,15,16
		4.(7.6, 22.3)	17,18,19,20,21,22,23,24

Table 1. Comparision of Heuristic and hGA Methods

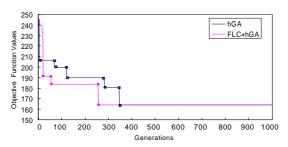


Figure 1: The average fitness value in the generation

#### 5.結論

この発表は、障害区域に関する立地・配置問題について、従来の最適化方法では直接解くことが非常に難しい。このため我々は、ハイブリッド型の遺伝的アルゴリズム (hGA)の手法を提案した。この結果により、障害区域問題を回避のためのネットワークがダイナミックな形で目に見えるものとして構築することができる。また、最短の経路は Dijkstra の最短のパス・アルゴリズムの手法を使用することにより、この解をより簡単に見いだすことができる。そして Lagrangian の緩和法は、この問題の解をより短時間で導くことができる。

我々は、hGA を使うことより、この数値実験の結果が、 発見的方法より、より良いパフォーマンスを得られることを 明らかにした。

#### 参考文献

- [1] Cooper, L., Location-Allocation Problem, *Operations Research*, Vol.11, No.3, pp. 331-344, 1963.
- [2] Cooper, L., Heuristic Methods for Location-Allocation Problem, *SIAM Review*, vol. 6, pp. 1-18, 1964.
- [3] Gen, M. and Cheng R., Genetic Algorithms and Engineering Design, 1997.
- [4] Gen, M. and Cheng, R., Genetic Algorithms and Engineering Optimization, 2000.
- [5] Gong, D., M. Gen, G. Yamazaki, and W. Xu, Hybrid Evolutionary Method for Capacitated Location-Allocation, Engineering Design and Automation, 1997.
- [6] Gama Mdhl and S Salhi, Constructive Heuristics for the Uncapacitated Continuous Location Allocation Problem, Journal of the Operational Research Society, vol. 52, pp. 821-829, 2001.

[7]Vladimir Hanta, Planar Multifacility Location-Allocation Problem, *Conference on Scientific Computing*, pp. 260-267, 2002.

#### 問合せ先1

〒880-0931 宮崎県宮崎市古城町丸尾 100番地 宮崎産業経営大学 経済学部

> 谷口 純一 0985-52-3111

> > E-Mail: taniguchi@po.miyasankei-u.ac.jp

# XML を用いたインターネット環境での遺伝的アルゴリズムによる FMS スケジューリングの一解法

# (Genetic Algorithm Approach for FMS Scheduling using XML in Internet Environment)

堀田 拓郎 Takuro Horita 早稲田大学 Waseda University

金 官禹 KwanWoo Kim

玄 光男 Mitsuo Gen 早稲田大学 理工学総合研究センター 早稲田大学 Waseda University

井田 憲一 Kenichi Ida 前橋工科大学 Maebashi Institute of Technology

Advanced Research Institute for Science and Engineering

Abstract - In this paper, we propose an eXtensible Markup Language (XML)-based Genetic Algorithm (GA) to solve Flexible Manufacturing System (FMS) scheduling problem in internet environment. The goal of it is to have seamless information flow between systems and to exchange the open information of written in XML between the suppliers and factory through the internet, intranet and extranet layers. The numerical experiments show that the proposed XML-based GA is efficient to the FMS problems in internet environment.

キーワード: eXtensible Markup Language (XML)、Flexible Manufacturing System (FMS)、遺伝的アルゴリズム (GA)、インターネット/イントラネット/エクストラネット環境

#### 1 . はじめに

アウトソーシングはワークステーション内での仕事量 を減らし、一つのジョブが終了するのを待たずに次の 仕事に移れるといった利点を持つ また他のワークス テーションと連携を取ることを必要とするため、どのよう な手法で連携を取るかを考えなくてはならない.インタ ーネット環境は簡単にアウトソーシング環境を整えてく れる媒体といえる、また複数のジョブの分割と統合もア ウトソーシングの注目すべき所であるといえる.これら の複雑なスケジュールを効率的に制御できる手法に FMS スケジューリングが存在する。

この効率性をインターネット環境で活用するために、 本論文ではスケジュールデータを XML で統一し、デ ータの共通性と利便性を図る事を提案すると共に、複 数のジョブを扱う FMS スケジューリングにおいて、それ ぞれのジョブは NP 困難な問題になる.この問題を解 決するため、提案手法による遺伝的アルゴリズムを用 いた解探索を提案する.

#### 2. FMS 問題と数式モデル

通常の生産システムはワークステーションと資源取り 扱いシステム、荷積み荷下ろしのステーションの3つで 構成される. 例として4つのワークステーション、3つの ジョブ、6 つのオペレーションで構成される FMS 問題を 考える. そしてその時のプロセッシングタイムの例が FMS スケジューリングシステムであるといえる.

図1において各ジョブがそれぞれのオペレーション で構成されており、それらを複数のワークステーション に割り当てる FMS スケジューリングのモデルを表して いる.

$$J_{1} = [o_{1}, o_{3}]$$

$$J_{2} = [o_{2}, o_{3}]$$

$$J_{3} = [o_{4}, o_{3}]$$

$$W_{1}$$

$$W_{2}$$

$$W_{3}$$

$$W_{4}$$

図1.FMS スケジューリング問題の例

FMS 環境においてのスケジュール問題の目的は、メイ クスパン $t_M$ と総合フロー時間 $t_F$ を最小にすることであ

$$\min t_{M} = \max_{i} \{t_{ijk}\} \tag{1}$$

$$\min t_{M} = \max_{\dot{k}, j, k} \{t_{ijk}\}$$

$$\min t_{F} = \sum_{k=1}^{k} \max_{i, j} \{t_{ijk}\}$$
(2)

$$t_{ijk} + p_{hjk} \le t_{ijk}, \forall_i \in succ_h$$
  
 $t_{ijk} \ge 0, i = 1, 2, \dots, I \quad j = 1, \dots, J \quad k = 1, 2, \dots, K$  (3)

#### 変数の説明

 $succ_h$ : オペレーション h の後続につなげる事のでき る可能性を持つオペレーションの集合

 $t_{iik}$  :ワークステーション $W_{\scriptscriptstyle i}$  におけるジョブ $J_{\scriptscriptstyle k}$  によるオ ペレーション $o_i$ の終了プロセッシング時間.

 $p_{\mathit{ijk}}$ : פרסגד האפיז אין ווא ווא פרסגד אין ווא פרסגד אין ווא פרסגד פרסגד אין ווא פרסגד オペレーション $o_i$ のプロセッシング時間.

 $t_{\iota}^{D}$ : ジョブ $J_{\iota}$  の納期

 $c_{\iota}^{TP}$ : ジョブ $J_{\iota}$  における総合ペナルティコスト

数式(1)はワークステーションWにおける最終オペレ ーションo。の終了プロセッシング時間をメイクスパンと 定義している、数式(2)はワークステーションW, の最終 オペレーション $o_i$ における最終プロセッシング時間を 表している.

#### 3.XML による遺伝的アルゴリズム

入力されたスケジューリングデータはクライアント側 で XML スケジューリングデータに変換される.図2に おいて、クライアント側からスケジューリングデータを入力し、XML 化することを行う.

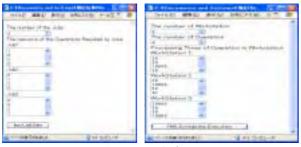


図 2.スケジューリングデータ入力画面

#### 3.1 染色体表現

ワークステーション番号を染色体表現とするコーディング法を用いる。図3はコーディング法を表している。

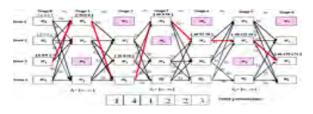


図3. FMS 問題のネットワークの流れ

#### 3.2 染色体の評価

# 3.3 遺伝的操作

A. 交叉: 一点交叉を用いる

B.突然変異 : 提案手法として Swap Mutation と

local search-based Mutation を行う

C. 選択 :ルーレット選択を用いる

#### 4.数値実験と結果

数値実験を行って問題を実行し、提案手法の有効性を判定する.表1では、実験に用いる数値データとして、各ワークステーションにおけるそれぞれのオペレーションのプロセス時間を表している.表2においてはそれぞれのジョブにおけるオペレーションの構成を示している.

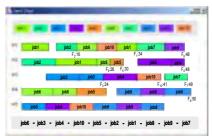
表1. 各ワークステーションにおけるプロセッサ時間

Workstation	Operations							
	$o_1$	$o_2$	$o_3$	$o_4$	$o_5$			
$W_{1}$	8	$\infty$	6	$\infty$	12			
$W_2$	10	12	$\infty$	9	4			
$W_3$	$\infty$	$\infty$	8	10	7			
$W_4$	$\infty$	9	8	7	$\infty$			
$W_5$	7	7	10	$\infty$	8			
Average	8.33	9.33	8	8.67	7.75			

表2.ジョブに関するオペレーションデータ

Job	Required operations	$t_k^{ATP}$	$t_k^D$	$c_k^{TP}$
$\boldsymbol{J}_1$	$o_1 \rightarrow o_2 \rightarrow o_3$	25.66	50	10
${\pmb J}_2$	$o_1 \rightarrow o_3$	16.33	50	10
$\boldsymbol{J}_3$	$o_1 \rightarrow o_4 \rightarrow o_5$	24.75	50	10
$\boldsymbol{J}_4$	$o_2 \rightarrow o_4 \rightarrow o_1 \rightarrow o_5$	34.08	50	10
$oldsymbol{J}_5$	$o_2 \rightarrow o_5$	17.08	50	10
$oldsymbol{J}_6$	$o_2 \rightarrow o_4 \rightarrow o_3 \rightarrow o_5$	33.75	55	10
$oldsymbol{J}_7$	$o_1 \rightarrow o_5$	16.08	55	10
$oldsymbol{J}_{8}$	$O_1 \rightarrow O_4 \rightarrow O_2 \rightarrow O_3$	34.38	55	10
$oldsymbol{J}_{9}$	$o_1 \rightarrow o_4 \rightarrow o_3$	25	55	10
$oldsymbol{J}_{10}$	$o_2 \rightarrow o_3 \rightarrow o_5$	25.08	55	10

実験の結果、新たなスケジュールが得られた.数値実験のスケジュールを示すガントチャートを図4、XMLでの出力を図5に示す.



See an Applicate Part of the Applicate Part

図4.数値実験の結果を表す ガントチャート

図 5 . 排出された XML データ

表3. 従来の手法と提案手法の比較

	$t_{SAP}$	DDP	Yang's	提案手法
$t_{\scriptscriptstyle M}$	95	88	60	50
$t_F$	453	440	415	366

表3は比較実験の結果を表している.上記の結果より、 従来手法より提案手法が優れていることが判った.そ して図5よりインターネット環境においてXMLでのデー タ出力が行われた.

#### 5 娃里

スケジューリングは従来スタンドアローンのシステムで構成され、不特定多数のユーザーの使用を考えることは少なかった。本論文ではインターネット環境でスケジューリングを行うことにより、ユーザーを限定しないアウトソーシングを考えた新たなスケジューリングが行えることを示した。XML で出力できたことにより本手法はインターネット環境においてデータの共通性を持たせることが可能になり、そして今回の提案手法により従来手法よりさらに有効性が証明できた。

#### 6.参考文献

[1] J. B. Yang (2001) GA-Based Discrete Dynamic Programming Approach for Scheduling in FMS Environment, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetic*, Vol. 31, No.5, pp.824-835.

# Fuzzy Multiobjective Decesion Making by Hybrid GA

#### 

\* Dept. of Indust. & Inform. Sys. Engg., Ashikaga Institute of Technology, Ashikaga, Japan \*\* Graduate school of Information, Production and Systems, Waseda University, Kitakyusu, Japan

#### Abstract

In this paper, a hybrid genetic algorithm based method for solving fuzzy multiple objective Knapsack problem with GUB (generalized upper bounding) structure is introduced. In this genetic algorithm, we propose the new chromosomes representation which represents the GUB structure simply and effectively at a time.

Also, by introducing the hybrid genetic algorithm (HGA) that makes use of the peculiarity of GUB structure, the proposed approach is efficient in finding solution. By the proposed approach, the solution can be searched efficiently.

#### 1 Introduction

In general, many problems are considered to have multiple objective functions in the real world problem. Further, the goal of each objective function is considered to be fuzzy because of the Decision Maker(DM)'s subjective judgement. The fuzzy mathematical programming approach is effective to represent the real-world situations.

In some kind of large-scale optimal design problem such as optimal reliability design problem, it exists the particular structure called GUB by introducing 0-1 variable. Considering the GUB structure especially in large scale problem is important to apply the solution method.

In this paper, we propose a method for solving fuzzy multiple objective Knapsack problem with GUB structure by HGA. This approach enables the flexible optimal system design. In this GA, we propose the new chromosomes representation which represents the GUB structure simply and effectively at a time. Also, by introducing the HGA which combine the proposed heuristic algorithm that makes use of the peculiarity of GUB structure with GA, the proposed approach is efficient than the previous method in finding solution. To demonstrate the effectiveness of the proposed approach, a Numerical Example is introduced.

# 2 Fuzzy Multiple Objective Knapsack Problem with GUB

#### 2.1 fmokp/GUB Model

The fuzzy multiobjective knapsack problem with the GUB constraints(fmokp/GUB) is shown as follows:

[fmokp/GUB:]

max 
$$f_k(x) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n_i} c_{kij} x_{ij} \gtrsim h_k, \quad k = 1, \dots, q (1)$$

s. t. 
$$g(x) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n_i} a_{ij} x_{ij} \lesssim b$$
 (2)

$$\sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, n$$
 (3)

$$x_{ij} = 0 \text{ or } 1, \quad \forall i, j \tag{4}$$

$$a_{ij} \ge 0, \quad \forall i, j, \quad b \ge 0$$
 (5)

where eqs.(4) are called the GUB constraints. GUB constraints has the particular structure that each GUB constraint has only one variable with the value 1, and others 0.

 $f_k(\mathsf{x})$  is the kth objective function, the symbol  $\gtrsim$  represents fuzzy inequation. The constraints in eq.(2) are fuzzy system constraints which are given the upper and lower bound of each right hand side(RHS) constant b by the DM.

Further,  $c_{kij}$  is j-th coefficients of objective functions in subsystem i for k-th objective function,  $a_{ij}$  is the j-th coefficients of constraint in subsystem i. Also,  $n_i$  is the j-th decision variable in subsystem i. Also,  $n_i$  is the number of decision variable in subsystem i.

# 2.2 Membership Functions Representing the DM's Preference

We define the membership functions  $\mu(f(\mathsf{x}))$  for objective function  $f_k(\mathsf{x})$  that represent the DM's basic preference. Further, the membership functions for system constraints  $g(\mathsf{x})$  as  $\mu(g(\mathsf{x}))$  as follows:

$$\mu(f_{k}(x)) = \begin{cases} 1 & ; f_{k}(x) > h_{k} \\ \frac{f_{k}(x) - z_{k}^{-}}{h_{k} - z_{k}^{-}} & ; z_{k}^{-} \leq f_{k}(x) \leq h_{k} \\ 0 & ; f_{k}(x) < z_{k}^{-} \end{cases}$$
(6)

$$\mu(g(\mathsf{x})) = \begin{cases} 1 & ; g(\mathsf{x}) > b \\ \frac{g(\mathsf{x}) - b + \delta}{\delta} & ; b - \delta \ge g(\mathsf{x}) \ge b \\ 0 & ; b - \delta > g(\mathsf{x}) \end{cases}$$
(7)

where  $h_k$  is the goal value for kth objective function which is between worst solution(NIS)  $z_k^-$  and positive ideal solution (PIS)  $z_k^*.$   $\delta$  is the range of the RHS constant b which is settled by the DM,

#### 2.3 Transformation to ckp/GUB

To represent the membership functions for objective functions and constraints the fmolp/GUB is transformed to the following single-objective knapsack problem with GUB constraints by using minimum op- $\frac{\text{erator.}}{[\text{ckp/GUB}]}$ 

max 
$$z(x) = \sum_{k=1}^{q+1} w_k \mu_k$$
  
s. t.  $\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n_i} c_{kij} x_{ij} + (h_k - z_k^-) \mu_k = z_k^-,$  (8)  
 $k = 1, \dots, q$ 

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n_i} a_{ij} x_{ij} + \delta \mu_{q+1} = b$$
 (9)

$$\sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, n$$
 (10)

$$x_{ij} = 0 \text{ or } 1, \quad \forall i, j$$
 (11)

$$a_{ij} \ge 0, \quad \forall i, j \quad b \ge 0$$
 (12)

#### 3 Hybrid Genetic Algorithm

The proposed GA introduces the heuristic approach for finding better solution at each generation which make use of the GUB structure. The proposed genetic algorithms has the following characteristics:

- Introduce a chromosome representation which represents the GUB structure simply and effectively.
- Introduce a search algorithms which make use of the GUB structure and find solutions efficiently to GA(hybridize).

#### 3.1 Chromosome Representation

We introduce the new chromosome representation which make use of the peculiarity of the GUB structure.

 $s_i$  is the position of variables with 1,  $1 \leq s_i \leq q_i$ in subsystem i. That is, each gene  $s_i, i = 1, \dots, n$  is represented as follows:

$$s_i = j \quad \text{if} \quad x_{ij} = 1, \quad i = 1, \cdots, n,$$
 
$$1 \le j \le n_i$$
 
$$(13)$$

From this chromosome representation, the p-th chromosome  $\mathbf{V}_p$  in a generation is represented as follows:

$$\mathbf{V}_p = [s_{1p} \ s_{2p} \ \cdots \ s_{np}]$$

#### 3.2**Evaluation**

$$eval(\mathbf{V}_p) = pen(\mathbf{V}_p) * z(\mathbf{V}_p), \quad p = 1, \dots, pop\_size$$

where penalty function  $pen(\mathbf{V}_p)$  is expressed as fol-

$$pen(V_p) = \begin{cases} g(V_p)/b; & g(V_p) - b < 0\\ 0 & ; otherwise, p = 1, \dots, pop\_size \end{cases}$$
 (14)

As to the fitness function for survival, we introduce the following evaluation function based on convex fuzzy decision and evaluate each chromosome. The penalty value is assigned in proportion to the excess of the capacity of the knapsack.

#### Genetic Operations 3.3

The genetic operations introduced in this paper is shown below. As described above, the proposed method enables the chromosome representation which represent the GUB structure effectively, the genetic operation suitable for the problem among various operations proposed so far can be applied. In this paper, to demonstrate the effectiveness of the proposed chromosome representation, we apply the simple genetic operations.

#### Sorting based on the Efficient Index 3.4

Here, sort each decision variables of each GUB structure based on ranking.

Step 1: In the same GUB constraint, gain the efficient index value for ranking the variables at each GUB constraints.

$$e_{ij} = \sum_{k=1}^{q} w_k c_{kij} / a_{ij}$$
,  $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n_i$ 

**Step 2**: At each GUB constraint, rank the decision variables in descending order based on the efficient index.

$$\begin{split} \bar{t}_i &= & [\bar{j}_{i1} \ \bar{j}_{i2} \ \cdots \ \bar{j}_{in_i}] \\ &= & \underset{j}{\text{indsort}} \{e_{ij} \ | \ j = 1, \cdots, n_i\}, \ \forall i \end{split}$$

where indsort represents the sort in descending

order.

Step 3: At each GUB constraint, sort variable based on the ranking in descending order.

#### 3.5 Overall Procedure

Step 1: Parameter setting: Set maximum generation number  $max\_gen$ , population size  $pop\_size$ , crossover probability  $p_c$  and mutation probability  $p_m$ , respectively. Let generation number  $\mathbf{r}=0$ .

**Step 2:** Weights and goals setting: Set the weights  $w_k$ ,  $k=1,\cdots,q$ , goals of objective function  $h_k$ ,  $k=1,\cdots,q$ . Set the tolerable range  $\delta$  for constraint b.

**Step 3:** Formulate the single objective nonlinear integer programming problem(ckp/GUB).

**Step 4:** Sort based on rank.: In each GUB constraint, sort each decision variables based on efficiency index in descending order.

Step 5 : Generate initial group : Generate initial chromosomes  $\mathbf{V}_p$  with n elements at random around rank 1 .

Step 6: Gain the evaluation function value.

**Step 7**: Genetic operations: Operate the following three genetic operations.

7.1 Crossover: Execute the single-point crossover. 7.2 Mutation: Execute the mutation for genes selected at random.

7.3 Selection : Select chromosomes by elitist selection.

Step 8: Improvement solution at each chromosome (I): If the chromosome is feasible, find a chromosome which improves the objective function value from chromosomes which change gene with one rank upper and lower variable at each GUB structure. Go to Step9.

Step 9: Improvement solution at each chromosome (II): If chromosome is infeasible, find a chromosome which has the largest cost value from chromosomes which change gene with one rank upper and lower variable at each GUB structure.

Step 10: Judge for termination: If  $r < max\_gen$ , then let r = r + 1 and go back to Step 7. Otherwise, present the chromosome with the largest evaluation value as the best solution and if the DM satisfies the solution gained, terminate the algorithm. Otherwise, set r = 1 and go to Step 2.

#### 4 Numerical Example

As a numerical example, the Knapsack problem with two objective functions and GUB constraints is introduced.

$$\begin{array}{lll} \text{max} & f_1(x) = & \displaystyle \sum_{i=1}^{14} \sum_{j=1}^{n_i} c_{1ij} \, x_{ij} \gtrsim h_1 \\ \\ \text{min} & f_2(x) = & \displaystyle \sum_{i=1}^{14} \sum_{j=1}^{n_i} c_{2ij} \, x_{ij} \lesssim h_2 \\ \\ \text{s. t.} & g(x) = & \displaystyle \sum_{i=1}^{14} \sum_{j=1}^{n_i} a_{ij} \, x_{ij} \lesssim 200 \\ \\ & \displaystyle \sum_{i=1}^{n_i} x_{ij} = 1, \quad i = 1, \cdots, 14 \\ \\ x_{ij} = & 0 \text{ or } 1, \quad \forall i,j \end{array}$$

where  $c_{1ij}$  and  $c_{2ij}$  are the coefficients of objective function  $f_1(X)$  and  $f_2(X)$ .

Let  $p_c = 0.5$ .  $p_m = 0.6$ ,  $pop\_size = 100$ , and weights and goals  $w_1 = 0.7$ ,  $w_2 = 0.3$ ,  $h_1 = 0.98$ ,  $h_2 = 100.0$  and  $\delta = 65.0$ , respectively.

After 3rd iteration, let the DM is satisfied with the solution obtained. The reliability  $R(x) = 0.964(\mu_1 = 0.97)$  and the cost  $C(x) = 91.0(\mu_2 = 0.71)$ , respectively. The Fitness function value F(x) = 0.983. Fig. 1 shows the improvement process of Fitness function.

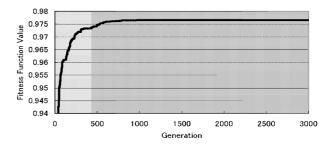


Figure 1: Improvement Process of Fitness function

In this case, the process of each membership function value at generation is shown in Fig.2.

In Fig.2, we can see that membership function values have a trade-off relationship. That is, if the membership function of  $f_1(x)$  increases, the membership

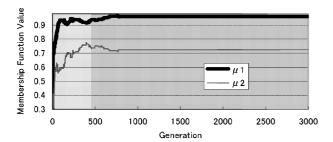


Figure 2: The Changing Process of Membership Function Values

function of  $f_2(x)$  decrease. And each membership function value converges to a certain value based on the weight  $w_1$  and  $w_2$  of each membership function which is given by DM.

Further, Fig.3 represents the comparison of Parrot Optimal Solution gained by the proposed method and the method without fuzzy goals and constraint (Previous Method).

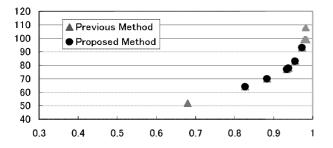


Figure 3: The Changing Process of Membership Function Values

In Fig. 3, we can see that the proposed method can gain the better solution of Parrot Optimal Solution. This shows the advantage of the proposed method that by introducing the fuzzy goal, the proposed method can obtain the solutions which cannot be obtained by the method because the limitation of total cost is released.

#### 5 Conclusion

In this paper, we proposed a method for solving fuzzy multiple objective optimal system design problems with GUB structure by HGA. This approach enables the flexible optimal system design by applying extended De Novo programming. In this GA, we proposed the new chromosomes representation which represents the GUB structure simply and effectively at a time. Also, by introducing the HGA which combine

the proposed heuristic algorithm that makes use of the peculiarity of GUB structure with GA, the proposed approach is efficient than the previous method in finding solution.

#### References

- [1] Gen, M. and R. Cheng, Genetic Algorithms & Engineering Optimization, John Wiley & Sons Inc., 2000.
- [2] Gen, M.: "Reliability Optimization by 0-1 Programming for a System with Several Failure Modes", IEEE Trans. on Rel., Vol.R-24, pp.206-210, 1975.
- [3] Goldberg, D. E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, Addison Wesley, 1989.
- [4] Hadj-Alouane, A. B. and J. C. Bean: "A Genetic Algorithm for the Multiple-Choice Integer Program", Operations Research, Vol.45, No.1, pp. 92-101, 1997.
- [5] Y.J. Lai and C.L. Hwang: "Fuzzy Mathematical Programming", Springer-Verlag, 1994.
- [6] Michalewicz, Z.: Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, 2nd ed., Springer-Verlag, 1994.
- [7] Sasaki. M. Y. Yokota & M. Gen: "A Method for Solving Fuzzy Reliability Optimization Problem by Genetic Algorithm" J. of Japan Society for Fuzzy Theory and Systems, Vol.7, No.5, pp. 1062-1072, 1995.

# Hybrid Ant Colony Optimization for Job-shop Scheduling Problem

Haipeng Zhang\*, Mitsuo Gen\*, Shigeru Fujimura\*, and Kwan Woo Kim\*\*

\*Graduate School of Information, Production & Systems, Waseda University

\*\*Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

\*hpzhang@suou.waseda.jp

**Abstract:** In this paper, an ant colony optimization (ACO) approach for solving job-shop scheduling (JSP) is presented. We propose hybrid ACO that is combined other heuristic method to find good solution. The traditional heuristic methods include shortest processing time (SPT), longest processing time (LPT), shortest remaining time (SRT), longest remaining time excluding the operation under consideration (LRM) for assigning priorities to the unscheduled operations is defined. Some numerical examples are demonstrated to show the performance of JSP using hybrid ACO.

**Keywords**: Job-shop Scheduling Problem, Ant Colony Optimization, Meta-heuristic Method

#### 1. Introduction

As is known before, job-shop scheduling problem (JSP) is to determine the operation sequences on the machines for minimizing a makespan, and has been confirmed as one of NP-hard problems. In this paper, the JSP we are treating is that totally n jobs and m machines to be scheduled, furthermore each job is composed of a set of operations and the operation order on machines is prespecified, and each operation is characterized by the required machine and the fixed processing time [11][2][4].

Ant colony optimization (ACO), first proposed by Dorigo and Maniezzo in 1992 [5], is one of the most promising meta-heuristic for combinatorial optimization problems. From then on, ACO has been first used on Traveling Salesman Problem (TSP) in some related works [6][7][8], and also has been used on many kinds of scheduling problem in some recent works [3][9][10][11]. In Section 2, we introduce the basic JSP. In Section 3, a whole transition rule of ACO is represented, and also five different hybrid ACO are promoted. In Section 4, two numerical experiments are presented to evaluate the five hybrid ACO. Finally, we draw some conclusions in Section 5.

#### 2. Job-shop Scheduling Problem (JSP)

Treating JSP, our object is to minimize the makespan. So the problem could be described by the simple equations as follows:

object function: 
$$\min C_M = \min \{\max_{i,k,j} \{c_{ikj}\}\}\$$
 (1)

constrains: 
$$c_{i,k-1,j} + p_{ikj} \le c_{ikj}, \quad \forall i,k,j$$
 
$$c_{ikj} \ge 0, \quad \forall i,k,j$$

with these notations and symbols:

 $C_M$ : makespan

 $c_{ikj}$ : completion time of operation oikj on machine  $M_j$  for each iob Ji

 $o_{ikj}$ : the kth operation of job  $J_i$  on machine  $M_i$ ,  $k=1, 2, ..., N_i$ 

 $N_i$ : number of operations of job  $J_i$ 

 $M_i$ : the jth machine, j=1, 2, ..., m

 $J_i$ : the *i*th job, i=1, 2, ..., n

 $p_{ikj}$ : processing time of operation  $o_{ikj}$ 

 $p_{iki}$ : processing time of operation  $o_{iki}$ 

#### 3. Hybrid ACO for JSP

#### 3.1 Transition rules of ACO for JSP

When building a tour in ACO, an ant at the position (same meaning as the operation  $o_{ikj}$ ), will choose the next position (operation) to move to by applying the transition rule given by the following equation (2):

$$o_{ikj}^* = \begin{cases} \underset{u \in O_i}{\text{arg max}} \{ [\tau(o_{ikj}, u)] [\eta(o_{ikj}, u)]^{\beta} \} & \text{if } q \leq q_0, \\ O' & \text{otherwise,} \end{cases}$$
 (2)

where

 $\tau(oikj, u)$ : the pheromone trail of edge (oikj, u)

 $\eta(oikj, u)$ : the heuristic desirability

 $\beta$ : a parameter which determines the relative importance of pheromone versus distance ( $\beta > 0$ )

q: a random number uniformly distributed in [0, 1]

 $q_0$ : a parameter which determines the relative importance of exploitation versus exploration ( $0 \le q_0 \le 1$ )

In addition, O' is a random value which gives the probability with which ant in operation  $o_{ikj}$  chooses to move to operation  $o^*_{ikj}$  that is select according to the probability distribution, which is called a random-proportional rule, given in the following equation (3):

$$P_{l}(o_{ikj}, o_{ikj}^{*}) = \begin{cases} \frac{[\tau(o_{ikj}, o_{ikj}^{*})][\eta(o_{ikj}, o_{ikj}^{*})]^{\beta}}{\sum_{u \in O_{l}} [\tau(o_{ikj}, u)][\eta(o_{ikj}, u)]^{\beta}} & \text{if } o_{ikj}^{*} \in O_{l}, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$
While constructing a tour, ant changes the

While constructing a tour, and changes the pheromone level to be visited edges by applying the local updating rule as follows:

$$\tau(o_{ikj}, o_{ikj}^*) \leftarrow (1 - \rho)\tau(o_{ikj}, o_{ikj}^*) + \rho \Delta \tau(o_{ikj}, o_{ikj}^*) \quad (4)$$
ere:

 $\tau$   $_0$ : the initial pheromone level, we set  $\tau$   $_0$ =( $UB(C_M)$ )-1 , where  $UB(C_M)$ ) is the upper bound of the optimal makespan

 $\Delta \tau(o_{ikj}, o_{ikj}^*)$ : the reverse of the makespan for arcs surrounding by the ant under consideration

 $\rho$ : the pheromone evaporating parameter (0< $\rho$ <1)

#### 3.2 Combining the traditional heuristic method

After checking the equation (2) and (3), we can find the only problem left to us is  $\eta(o_{ikj}, u)$ , which means that some heuristic method should be combined with the ACO. In this paper 5 heuristic methods are used to increase the efficiency of the hybrid ACO as follows:

SPT: select the operation with the shortest processing time

LPT: select the operation with the longest processing time

LRT: select the operation belonging to the job with the longest remaining processing time

SRT: select the operation belonging to the job with the shortest remaining processing time

LRM: select the operation belonging to the job with the longest remaining processing time excluding the operation under consideration

Finally we can obtain the procedure of hybrid ACO for JSP as follows:

**Step 1**: Initialize the environment ( $l = 1, \tau_0, ...$ )

**Step 2**: One ant chooses the next operation  $o_{ikj}^*$  from the order list  $O_l$  by applying the state transition rule given by Eq. (2) and Eq. (3), and move to the new  $o_{ikj}^*$ 

**Step 3**: Do Step 2 until all the operations finished, then go to the food

**Step 4**: Return the schedule and the makespan

**Step 5**: Update the pheromone level by Eq. (4)

**Step 6**:If all the ants finished the tour end the procedure, Else goto step 2

#### 4. Numerical Example

In this paper, we used the benchmark problem of JSP in OR library to evaluate the performances of different hybrid ACO including SPT, LPT, SRT-ACO, LRT, and LRM. We set the initial parameter as follows:

 $\beta = 2$ ; q0 = 0.7;  $\rho = 0.7$ ; Maximum iteration=3000

From the Table. 1 and Table. 2, it is easy to find that LRT-ACO and LRM-ACO usually outperform others, and not only can they get the less makespan and also the less iteration for the ants.

Table 2 performance of Hybrid ACO (10x5 for la01)

Hybrid ACO	Iterations	Makespan		
Tryblia ACO	Ticiations	Best	Average	
SPT+ACO	2529	891	1864	
LPT+ACO	1857	873	1630	
LRT+ACO	1159	724	1423	
SRT+ACO	2121	1161	2025	
LRM+ACO	1021	702	1431	

Table 2 performance of Hybrid ACO (15x10 for la21)

Hybrid	Iterations	Makespan			
ACO	Herations	Best	Average		
SPT+ACO	2370	1796	1864		
LPT+ACO	1921	1570	1630		
LRT+ACO	1002	1287	1423		
SRT+ACO	2403	1933	2025		
LRM+ACO	978	1295	1431		

#### 5. Conclusion

In this paper, we have proposed an integrated hybrid ant colony optimization (ACO) for solving classical job-shop scheduling problem (JSP). We combined 5 traditional heuristic method including SPT, LPT, LRT, SRT, and LRM with ACO, and also give the procedure of the hybrid ACO. In the end, by using some benchmark testing data (made by S. Lawrence), we evaluate the performances of all 5 hybrid ACO. We find that two of them obviously outperform others.

#### References

[1]R. Cheng, M. Gen, and Y. Tsujimura, "A Tutorial Sur-vey of Job-Shop Scheduling Problems Using Genetic Algorithm, Part I: Representation", *Computers and In-dustrial Engineering*, Vol. 30, no. 4, pp. 983-997, 1996.

[2] M. Gen, and R. Cheng, *Genetic Algorithms & Engineering Optimization*, John Wiley & Sons, New York, 2000.

[3] Kuo-Ching Ying, and Ching-Jong Liao, "An ant colony system for permutation flow-shop sequencing", *Computers & Operations Research*, pp.791-801, 2004.

[4] Anant Singh Jain, and Sheik Meeran, "A State-of –the-art Review of Job-shop Scheduling Techniques", *Technical Report*, Department of Applied Physics, Electronics and Mechanical Engineering, University of Dundee, Scotland, 1998.

[5] Colorni A., M. Dorigo & V. Maniezzo, "An Investigation of some Properties of an Ant Algorithm", *Proc. of the Parallel Problem Solving from Nature Conference* (PPSN 92), Brussels, Belgium, R.Männer and B.Manderick (Eds.), Elsevier Publishing, pp.509-520, 1992.

[6] M. Dorigo, and L.M. Gambardella "Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1, 1, pp. 53-66, 1997.

[7]Gambardella L.M. and M. Dorigo, "Ant-Q: A Reinforcement Learning Approach to the Traveling Salesman Problem", Proceedings of ML-95, Twelfth International Conference on Machine Learning, Tahoe City, CA, pp. 252-260 1995.

[8] Stützle T. and H. Hoos, "The MAX-MIN Ant System and Local Search for the Traveling Salesman Problem", Proceedings of ICEC'97 - 1997 IEEE 4th International Conference on Evolutionary Computation, pp. 308-313, 1997.

[9]Chandrasekharan Rajendran, and Hans Ziegler, "Ant-colony algorithms for permutation flowshop scheduling to minimize makespan/total flowtiime of jobs", *EJOR*, paper in press.

[10]V.K. Jayaraman, B.D. Kulkarni, Sachin Karale, and Prakash Shelokar, "Ant colony framework for optimal design and scheduling of batch plants", *Computers & Chemical Engineering*, pp. 1901-1912, 2000.

[11] Daniel Merkle, Martin Middendorf, and Hartmut Schmeck, "Ant Colony Optimization for Resource-Constrained Project Scheduling", *IEEE Tran. On Evo. Com.*, Vol. 6, No. 4, pp. 333-346, 2002.

# 統合型サブ集団を有するファジィ適応型探索並列遺伝的アルゴリズム

Combined Sub-Population Type Fuzzy Adaptive Search Method for Parallel Genetic Algorithm

石田 正英

前田 陽一郎

Masahide Ishita

Yoichiro Maeda

#### 福井大学

University of Fukui

Abstract — In this laboratory, we have already proposed Fuzzy Adaptive Search method for Parallel Genetic Algorithm (FASPGA) combined Fuzzy Adaptive Search method for Genetic Algorithm (FASGA) which tunes the genetic parameters according to the search stage by the fuzzy rule and Parallel Genetic Algorithm (PGA) which is able to obtain the high-quality solution by migrating every certain fixed generation interval for each sub-population divided all populations. In this research, we propose an improved method, C-FASPGA which is able to obtain a high-quality solution in the earlier generation by combining sub-populations in the final search stage. We also report the result for the function optimization simulation performed to confirm the efficiency of our method.

#### 1. 緒言

遺伝的アルゴリズム (GA) は生物進化の過程を模擬した近似最適化手法であり、複数の個体を用いて最適解を探索する確率的な多点探索の一手法である。一般に GA は通常一定の遺伝的パラメータ (突然変異率、交叉率など)で探索を行うため、特に探索初期、収束期において探索性能が上がらない場合がある。

本研究室ではすでにこの問題の改善手法としてファジィ適応型探索遺伝的アルゴリズム (FASGA: Fuzzy Adaptive Search method for Genetic Algorithm) を提案している [1]。この手法では、遺伝的パラメータを最大適応度および平均適応度を基に探索ステージに伴いチューニングするファジィルールを記述し、それにより探索ステージに適した効率的な探索を実現できる。

一方、進化における解の高質化を実現する手法として、並列遺伝的アルゴリズム (PGA: Parallel Genetic Algorithm) が提案されている [2][3][4]。しかしながら、PGA においても GA と同様に一定の移住率を用いるため、探索ステージに応じて必ずしも適切な移住が行われているとは限らないという問題がある。

そこで、昨年本研究室では FASGA と PGA と組み合わせることにより進化の高速化と解の高質化に基づく効率的な探索を行うファジィ適応型探索並列遺伝的アルゴリズム (FASPGA: Fuzzy Adaptive Search method for Parallel Genetic Algorithm) を提案した[5][6]。FASPGA は各集団における交叉率、突然変異率といった遺伝的パラメータに加え、移住率も探索ステージに応じてファジィ推論によりチューニングし、移住個体の決定を行うアルゴリズムである。

本研究では、この FASPGA を用いて、進化の収束期においてさらなる多様性の向上を目指した統合型サブ集団を有する C-FASPGA を提案する。本手法の有効性を検証するためにシミュレーションを行ったので、その結果についても報告する。

#### 2. C-FASPGA アルゴリズム

FASPGA では各サブ母集団ごとの突然変異率や交叉率という遺伝的パラメータを1世代ごとにファジィルー

ルを用いてチューニングを行うことにより各集団ごとの探索効率の向上を図るだけでなく、集団ごとの集団移住度に対してもファジィルールによるチューニングを行うことで、全体の探索効率の向上を図ることを目的としている。これに島の統合を加えた C-FASPGA (Combined sub-population type Fuzzy Adaptive Search method for Parallel Genetic Algorithm) を提案し、より高質な解を高速に求める手法の確立を目指す。

#### 2.1 ファジィ推論による遺伝的パラメータの決定

FASPGAでは島内の個体数が一定であるため、収束期には個体の多様性が確保できずに、最適解が得られないで進化が停滞してしまうという問題があった。収束期においては、適応度の比較的高い個体が存在するサブ集団以外の進化が止まり、無駄になってしまうことが考えられる。そこで C-FASPGA では収束期に進化の度合に応じて適応的に島を統合することで、進化の停滞した島により多様性を与え、さらに良い解が得られる可能性を高めようとするものである。

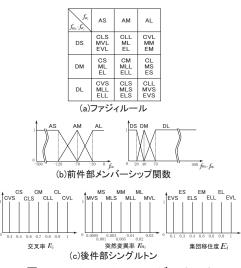


図 1. C-FASPGA のファジィルール

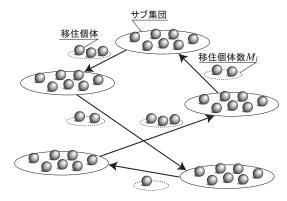


図 2. C-FASPGA の移住操作 (移住率可変型 Random Ring)

C-FASPGA のファジィ推論の前件部は FASGA と同じく平均適応度  $f_{a_i}$  および最大適応度と平均適応度 との差  $(f_{m_i}-f_{a_i})$  を用いて表す (i: サブ集団数,  $i=1,2\cdots,n$ )。後件部には交叉率  $r_{c_i}$  と突然変異率  $r_{m_i}$  以外に新たに集団移住度  $E_i$  と呼ばれるパラメータを加える。図 1 に C-FASPGA のファジィルールおよびメンバーシップ関数と後件部シングルトンを示す。

#### 2·2 C-FASPGA における移住操作

移住トポロジはリング型 (移住元と移住先を結んだ線が1つのリングを形成するように移住先を定めるというもの)であり、ランダムに移住する集団を決定する。また、移住先は移住操作の度に変化するものとする。

昨年度の研究 [5] では、比較的進化の進んでいない移住元の島と最も性質の違う島 (比較的進化の進んでいる島) を移住相手に選択するという方法を用いていた。この手法の場合、進化の進んでいない島に対しては、移住の効果が期待できるが、進化の進んでいる島に対しては、流入する移住個体がほとんどなく、多様性が急速に失われることがわかった。そこで、本研究での移住方法には、ランダムに移住する島を選択することで、集団全体の多様性が維持できる Random Ring を用いて、その移住率をファジィルールでチューニングする方法を採用した (図 2 参照)。

#### • 移住条件

従来の PGA では移住の必要性を検知せず、移住間隔といわれる一定世代ごとの移住の周期によって一定割合の個体の移住が行われる。これに対し、本研究で提案する手法では、ファジィ推論から得られる集団移住度 Ei に比例して個体数が決まる方式を用いている。本手法の移住条件は式 (1) のとおり、ある一定間隔で移住が行われるが、ファジィ推論により集団移住度が Ei=0 となれば移住は行われない。

IF (Generation mod 
$$Mig\_Span = 0$$
)
and  $(E_i \neq 0)$ 

THEN Migration.

 $Mig\_Span$ :移住間隔  $E_i$ :集団移住度

#### • 移住個体数

一般の PGA では移住率によって移住する個体の数が決まっており、移住率は交叉率や突然変異率の遺伝的パラメータと同様、終了世代まで一定である。この場合、進化の度合いに応じて適切な移住が行われているとは決して言えない。そこで本手法では移住率  $r_{e_i}$  は集団移住度  $E_i$  の値に比例するように設定する (式 (2) 参照)。このようにすることで移住が決定するごとにそのときの進化の度合いに応じて移住率が変化する。また、この式における k は移住率を正規化するための定数である。さらに移住個体数  $M_i$  は、この移住率  $r_{e_i}$  により式 (3) を用いて決定される。尚、式 (3) の計算結果で $M_i=0$  のときは、移住は行われない。

$$r_{e_i} = k \cdot E_i \tag{2}$$

$$M_i = r_{e_i} \cdot P_{initial}$$
 (3)

i: サブ集団番号  $(i=1,2\cdots,n)$   $E_i$ : 集団移住度 k: 正規化定数  $r_{e_i}$ : 移住率  $M_i$ : 移住個体数  $P_{initial}$ : 初期サブ集団内の個体数

#### 2·3 C-FASPGA における島統合操作

本研究で提案するサブ集団の統合条件は、ある世代の平均適応度が最も高いサブ集団の平均適応度  $f_{a_1}$  がある一定値  $Com\_Start$ (統合開始適応度) を越えたとき、かつ、一定の統合間隔  $Com\_Span$  を満たす世代にのみ行うものとする。最終的に残る島数  $Is\_Limit$ (統合限界島数) に達すると島を統合しないように設定する。 $Com\_Span$ 、 $Com\_Start$ 、 $Is\_Limit$  は島の統合操作を微妙に調整するためのパラメータでこれらを変更することにより、探索問題に応じた統合操作が可能となる。

IF 
$$(f_{a_1} > Com\_Start)$$
  
and  $(Generation \ \mathbf{mod} \ Com\_Span = 0)$   
and  $(N \ge Is\_Limit)$   
THEN Combine  $I_{a_1} \& I_{a_2}$  (4)

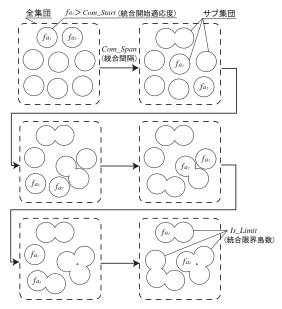
 $f_{a_1}$ : 平均適応度の最も高いサブ集団の平均適応度  $Com\_Start$ : 統合開始適応度  $Com\_Span$ : 統合間隔  $Is\_Limit$ : 統合限界島数 N: 現在の島数  $I_{a_1},I_{a_2}$ : 全サブ集団の中で 1 番目および 2 番目に平均 適応度の大きなサブ集団

図 3 は、C-FASPGA での統合の様子を図示したものである。 $f_{a_1} > Com\_Start$  により統合が始まり、 $N \leq Is\_Limit$  で統合が終わる (図は N=3 の例)。破線部分は、集団全体を表し、矢印の時間間隔は  $Com\_Span$ (統合間隔) を表している。

#### 2.4 本手法のアルゴリズムフロー

本研究で提案した C-FASPGA の処理フローを図 4 に示す。破線の範囲内ではファジィルールにより集団移住度や、交叉率、突然変異率のチューニングを行う。個体評価では全個体の適応度評価を、集団評価では平均適応度  $f_{m_i}$  の算出を行う。

(1)



 $f_{ai}$  全サブ集団の中で平均適応度が最大のサブ集団の平均適応度

faz 次に大きなサブ集団の平均適応度

図 3. 統合の様子

まず最初に集団評価により  $f_{a_i}$ 、 $f_{m_i}$  を求め、式 (4) の統合条件に従って統合する。統合された後は、集団の  $f_{a_i}$ 、 $f_{m_i}$  が変化するので、次の移住操作のために新たに集団評価を行う。これにより平均適応度  $f_{a_i}$  および最大適応度と平均適応度の差  $(f_{m_i}-f_{a_i})$  を入力として、ファジィ推論により集団移住度  $E_i$  が決定される。 $E_i$  に従って移住を行った後、集団の  $f_{a_i}$ 、 $f_{m_i}$  が変化する場合があるので、再び集団評価を行う。さらに、新たな  $f_{a_i}$ 、 $(f_{m_i}-f_{a_i})$  を用いて、ファジィ推論により、交叉率  $r_{c_i}$ 、突然変異率  $r_{m_i}$  が決定される。

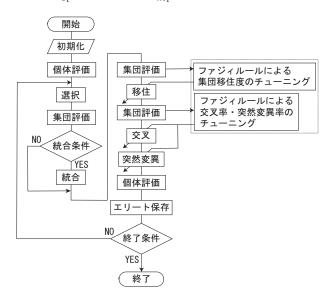


図 4. C-FASPGA のフローチャート

#### 3. シミュレーション

本研究の提案手法である C-FASPGA の有効性を関数近似シミュレーションを行って検証したので、そのシミュレーション結果について報告する。

#### 3.1 シミュレーション条件

今回提案した C-FASPGA の有効性を Rastrigin 関数を用いて検証した。Rastrigin 関数とは、式 (5) で表され、最適解の周辺に格子状に準最適解 (最適値に近い値を持つ局所的最適解)を持つ多峰性関数である。設計変数間に依存関係はないことが知られている [?]。 2 次元 (n=2) の場合の Rastrigin 関数の概観を図 5 に示す。

$$F_{Rastrigin}(x) = 10n + \sum_{i=1}^{n} (x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i))$$

$$(-5.12 \le x_i < 5.12)$$

$$min(F_{Rastrigin}(x)) = F(0, 0, \dots, 0) = 0$$

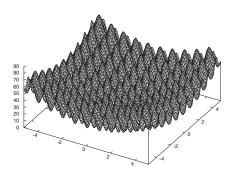


図 5. Rastrigin 関数

設定変数とは式 (5) で  $x_i$  に染色体からデコードされた値が代入される。図 5 では、縦、横に  $x_1, x_2$  の設定変数が表され、高さは適応度を表している。本研究では、図を反転し最適解が最大値で 0 となるように評価関数を設定して、最適化シミュレーションを行った。

#### 3.2 シミュレーション結果および考察

C-FASPGA、PGA および FASPGA を用いて行った Rastrigin 関数の最適化シミュレーションの結果を図 6 に示す。図の縦軸は母集団サイズを 400 個体とした場合の乱数 Seed を変更して行った 20 試行の最大適応度の世代ごとの平均値である。この場合に用いた C-FASPGA の各パラメータは、 $Com\_Start=-30$ 、 $Is\_Limit=4$ 、 $Com\_Span=5$  である。探索初期にFASPFA、C-FASPGA 共に適応度が低いのは、多様性を上げるためにファジィ推論による突然変異率と集団移住度を高く設定しているためであると考えられる。探索初期の多様性は探索中期以降の性能向上に役立っている。さらに探索後期(平均適応度 -30 以上)には統合することにより、FASPGA よりも早く最適解が求まることが確認できた。

図 $7\sim$ 図9は、C-FASPGAの統合に関するパラメータを変化させて行ったシミュレーションの結果である。図7は $Com\_Start$ (統合開始適応度)についての結果であり、 $Com\_Start$ を小さく(統合時期を早く)しすぎると、サブ集団内の適応度が低いまま島同士が統合するため、効果が得られないと考えられる。図8は $Is\_Limit$ (統合限界島数)の違いに関する結果であり、 $Is\_Limit$ を小さくしすぎると、適応度の低い島とも統合してしまい進化の進んだ島の退化が起こり、 $Is\_Limit$ を大きく設

定すると、あまり統合が起こらないので適応度の多様性が上がらないためと考えられる。図9は $Com\_Span$ (統合間隔)の違いに関する結果である。 $Com\_Span$ を大きくしすぎると、統合が起こりにくいため多様性が維持できず、 $Com\_Span$ を小さくすると頻繁に統合が起こるために進化が破壊されるものと考えられる。

#### 4. 結 言

本研究では、ファジィ適応型探索並列遺伝的アルゴリズム (FASPGA) を改良して探索ステージに応じてサブ集団を適応的に統合していくことで、多様性が減少したサブ集団内の個体数を増やし、収束期にさらなる多様性を確保することを目的とした統合型サブ集団を有する C-FASPGA を提案した。さらに、Rastrigin 関数を用いて最適化シミュレーションを行い、PGA やFASPGA と比較して、進化の収束期において良質の解をさらに早い世代で得ることができることを確認した。

今回のシミュレーションでは、統合性能を決定するパラメータ (Com\_Span、Com\_Start、Is\_Limit) の値を適切に選ばないと探索性能が大きく変動することもわかった。今後は、これらの値をどのようにチューニングするかの指針についても検討を加えていく必要があると考えられる。また、今回用いた統合方式とは異なる統合手法や、統合のみでなく分割なども含めた柔軟な島数操作についての検討も今後の課題であると考えられる。

#### 参考文献

- [1] 山本哲哉, 前田陽一郎: ファジィ適応型探索 GA の 提案と TSP 問題への応用, 第 11 回バイオメディカ ル・ファジィ・システム学会, pp.103-106 (1998)
- [2] J.Mang and K.Matsuo: A Survey on the Parallel Genetic Algorithms, 計測と制御, Vol.33, No.6, pp.112-117 (1994)
- [3] 三木光範, 廣安和之, 金子美華, 畠中一幸: 環境分散型並列遺伝的アルゴリズム, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.99, No.96, pp.87-94 (1999)
- [4] 三木光範, 廣安和之, 中村康範: 遺伝的アルゴリズムの分散並列化に関する研究 (ランダム移住型による分散遺伝的アルゴリズムの検討), 日本機会学会論文集 (A編), Vol.66, No.645, pp.112-117 (2000)
- [5] Y.Maeda and T.Tsubouchi: Parallel Genetic Algorithm Used Fuzzy Adaptive Search Method, SICE Annual Conference in Fukui, CD-ROM, pp.2353-2356 (2003)
- [6] 前田陽一郎, 坪内透: 並列遺伝的アルゴリズムのファジィ適応型探索手法, 第19回ファジィシステムシンポジウム, pp.469-472 (2003)

#### 連絡先:

〒 910-8507 福井市文京 3-9-1

福井大学 工学部 知能システム工学科

前田 陽一郎

Phone & Fax: 0776-27-8050

E-mail: maeda@ir.his.fukui-u.ac.jp

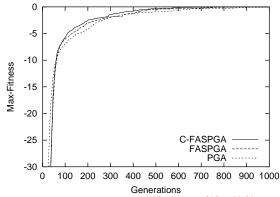


図 6. シミュレーション結果 (1)(手法の比較)

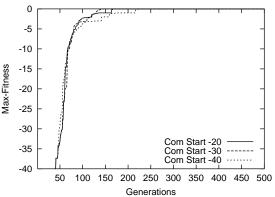


図 7. シミュレーション結果 (2)(Com\_Start の比較)

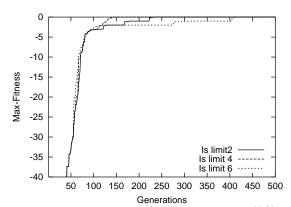


図 8. シミュレーション結果 (3)(Is\_Limit の比較)

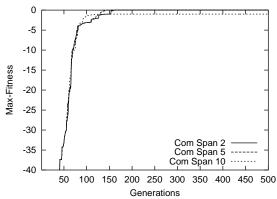


図 9. シミュレーション結果 (4)(Com\_Span の比較)

#### 複数配送車の輸送量を考慮した遺伝的アルゴリズムによる物資配送計画

Transport Planning of Supplies Using Genetic Algorithms Under Consideration For Roads of Plural Vehicles

河野 亮太 前田 幹夫 中山 健史 Ryota KOHNO Mikio MAEDA Takeshi NAKAYAMA 九州工業大学 工学部

Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

**Abstract:** The first, the scheduling of this research introduced a genetic algorithm and a fuzzy theory to this scheduling, and describe how to display the best route obtained from that. Second, when multi-transport vehicles are taken into consideration, from the mesh map, the area maps which integrated some mesh data with a certain fixed size are created, and transportation scheduling assigns the area maps to multi-transport vehicles. From results of the fuzzy scheduling and the simulations, we discuss the usefulness of this method.

#### 1. はじめに

本研究[1]では,企業活動において複数の得意先に物資を配送してまわる際に,効率的な配送経路を特定し,各得意先への予想到着時刻を提示できる物資配送計画について述べる.実際には、得意先間の移動時間は移動する時間帯によって変化する.また,配送経路を決定する際,総巡回時間の最小化だけでなく,得意先への到着時刻指定や配送順序の制約条件も考慮し,それをファジィ評価することによって配送経路の決定を行う.

本研究のスケジューリングは,まず,遺伝的アルゴリズム[2 4]とファジィ理論[5,6]を導入した実用的な物資配送計画法から求めた最適な配送経路を提示する.

次に,メッシュ地図より,ある一定の大きさのエリアデータ(本研究では縦 $5 \times$ 横5のメッシュを $1 \times$ 1 エリアデータ)で統合したエリア地図を作成し,そのエリア地図をもとに複数の配送車両を割り当てる.ある配送地域の中にある配送点を,1台の配送車が担当する配送点とし,各配送地域内での配送スケジューリングを行う方法を提案する.

最後に,スケジューリングと運用シミュレーションの結果から,本方法の有効性について検討する.

#### 2. 物資配送計画

#### 2.1 配送計画

物資配送計画において順序を決定する際には,それぞれの順序に対しての評価基準が必要となる.そこで,各順序を評価するための関数を目的関数として設定し,目的関数から得られた値を最大化または最小化するような配送順序を求める.

#### 2.2 配送順序の評価

主な目的関数として,総配送時間  $f_{end}$ ,総約束到着時間 遅れ $T_{x_i}$ ,優先順位を設定し,配送順序の評価を行う.それ ぞれの目的関数については,文献[1]を参照.

#### 3 物資配送計画へのファジィ理論の導入!!!

#### 3.1 物資配送計画のファジィモデル化

物資配送計画を行う際,まず対象をモデル化しなければならない.ファジィ物資配送計画では,配送ポイント間の時間をファジィ数で表し,ポイントごとの約束訪問時刻,

優先順位をファジィ制約条件として与え,ファジィ物資配送計画モデルとする.

移動時間が"だいたい」である"と分かっているとき,各移動時間ごとのメンバーシップ関数は「を基準として,図1のような三角型ファジィ数で設定する.移動時間が厳密に分かっている場合にはクリスプ数でもよい.



図1 移動時間のメンバーシップ関数

#### 3.2 目的関数の設定

本論文では目的関数として,総配送時間と到着時刻条件,優先順位を考える.しかし,総配送時間,到着時刻条件がファジィとなり,それらを単純に比較評価することは難しい.そこで,いくつかの目的関数を組み合わせて,それを評価値とする.

#### a. 総配送時間

配送順序を評価する 1 つの方法として,総配送時間を考える.総配送時間は,2.2 項で述べたように  $f_{end}$  として表すことができ,この三角型メンバーシップ関数である  $f_{end}$  の重心を取り,それを総配送時間の評価  $f_T$  とし,  $f_T$  を最小化するような順序を求める.

#### b. ファジィ目標と到着時間の一致度(ファジィ目標 満足度)

ある配送点到着時間について希望ないし制約がある場合, それをファジィメンバーシップ関数で表す.これをファジィ目標とし,例として,図2の形状をとる.図も他3種類あるが省略する.(文献[1]を参照)

ファジィ目標のメンバーシップ関数を m とし,図2の場

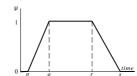


図2 ファジィ目標のメンバーシップ関数の概形

合は 4 つのパラメータ p,q,r,s によって表す . 図 2 ファジィ目標メンバーシップ関数  $\mathbf{m}_{G_i}$  を数式で表すと , (1)式のようになる . ここで x は , 0 または x>0 で任意の値(time)である .

$$\mathbf{m}_{G} = \begin{cases} 0 & (x \le p) \\ \frac{1}{q-p} x - \frac{q}{q-p} & (p < x < q) \\ 1 & (q \le x \le r) \\ \frac{1}{r-s} x + \frac{s}{r-s} & (r < x < s) \\ 0 & (s \le x) \end{cases}$$
 (1)

ここで配送点i の到着時刻メンバーシップ関数を  $\mathbf{m}_{\!A_i}$  と し ,  $\widetilde{N}(a,b,c)$  とする . このときのファジィ目標と到着時刻の一致度を  $f_G$  とし , これを求める方法を以下に示す .

配送点の到着時刻メンバーシップ関数  $\mathbf{m}_{A_i}$  とファジィ目標メンバーシップ関数  $\mathbf{m}_{G_i}$  の重なった部分の面積の合計を A とする(図 3). これを配送点 i の到着時刻メンバーシップ関数  $\mathbf{m}_{A_i}$  の面積 A'で割った値を,配送点 i 到着制限時刻との一致度  $f_{G_i}$  とする.これを,全ての配送点  $(i:1\sim n)$  について計算し,その最小値を順序の一致度  $f_G$  とする((2)式).



図3 ファジィ目標と到着時間の一致度

$$f_G = \min_{1 \le i \le n} \left( f_{G_i} \right) = \min \left( f_{G_1} \wedge \dots \wedge f_{G_n} \right) \tag{2}$$

#### c. 優先順位

ポイントを巡回するときに、仕事の都合上などから、あるポイントよりも優先して行かなければならないポイントがある、そのような条件を満たさない場合には、各優先順位の重要度に応じて優先順位の一致度  $f_p$  を変化させる.

ポイント $_i$  をポイント $_j$  より優先するとき,その重要度を $_{p_{ij}}$ とする.ある配送順序について,優先条件  $_i \to j$ )に反する順序の組 $_i \to j$ )の集合を  $_i \to j$ とすると,一致度  $_i \to j$ 0 は次式で表される.

$$f_{P} = \prod_{(i,j) \in P} (1 - p_{ij}) \quad (0 \le p_{ij} \le 1)$$
 (3)

一つでも優先条件を侵していない場合は  $f_p = 1.0$  である.

#### d. 総合評価

以上述べた 3 つの目的関数  $(f_T,f_G,f_P)$  のうち, 2 つの  $f_G,f_P$  に重み (w) をつけ,総合したものを総合一致度  $f_R$  とする.

$$\begin{split} f_{R} &= (1 - w_{G}(1 - f_{G})) \times (1 - w_{P}(1 - f_{P})) \\ &\qquad \qquad (0 \leq w_{G} \leq 1, \ 0 \leq w_{P} \leq 1) \end{split} \tag{4}$$

これらをもとに,配送順序の総合評価fは,

$$f = \frac{f_T}{f_R} \tag{5}$$

この総合評価 f が小さいほど配送順序として良いものであるとする .

#### 4 遺伝的アルゴリズムの導入□

配送点が多くなると,完全列挙法は全ての順序を完全に 探索するので計算回数がその階乗に比例して飛躍的に増加 してしまい実用的でなくなる.計算量を少なくした厳密解 法はいくつか提案されているが,それらは1つの最適解を 求めることを前提に考えられているので,ファジィ物資配 送計画に対し,複数の最適解を提案する場合,逆に計算回 数の増加が考えられ,適用させることが難しい.

そこで,ある程度の大きな規模の物資配送計画に対する 有効な解法として,遺伝的アルゴリズム(GA) [2 4]を用い たファジィ物資配送計画手法を考える.

#### 4.1 個体集団の生成

本論文では、遺伝子を配送ポイント番号として、配送ポイント番号が重複しないように並べたものを遺伝子列とする.このときの遺伝子列はすなわち配送順序であり、個体は1つの遺伝子列、つまり配送順序を持つものとする.また個体のサイズ、つまり遺伝子の数はポイント数nとなる.

#### 4.2 個体の評価法

M 個の個体集合の各個体(配送順序)について,3.2項で定めた評価関数を用いて評価値を計算する.この評価値fを用いてGA 空間における個体の適応度を

$$g = \frac{1}{f} \tag{6}$$

として定め,評価値の小さい配送路を持つ個体ほど優秀であり,適応度が高いものであるとする.このとき世代数が決定した最終世代であれば,個体集合の中で適応度の上位数個の個体を準最適解として終了する.そうでないときは,世代の更新を行う.

# 5 メッシュ地図を特化した Dijkstra の重み付きグラフの最短路アルゴリズム

最短経路の決定のアルゴリズムは、基本的にはE.W.Dijkstraにより発見された重み付きグラフにおける2点間の最短道決定[7]の手続きを用いる.しかし,E.W.Dijkstraの手続きでメッシュのように中央点が多い場合,全ての中央点に対して探索するのでは時間がかかるとともに,中央点に隣接しているメッシュの中央点でなければ,道は存在しないため,無駄が多く出てくる.よって,隣接メッシュの中央点だけ探索するように変更し,時間短縮を計る.メッシュ地図に特化した場合とそのままの場合での経路探索時間の違いについてのスケジューリングの結果,スケジューリング結果は省くが,特化することにより約2倍以上の高速化が実現できた.

メッシュ地図と Dijkstra のアルゴリズムを用いることにより、任意の配送点間において、時間帯により可変であいまいさを持つ移動時間とその移動経路を得ることができる.

#### 6 複数配送車による配送スケジューリング

複数配送車による配送スケジューリングで問題となるのは,各配送車がどの配送点を配送するかを決定することである.これまでの1台による配送スケジューリングでは,配送点を遺伝子,配送順序を遺伝子列として遺伝的アルゴリズムを用いて最良配送順序の探索をしている.そこで,この配送順序である遺伝子列に仕切り" でを配送車両 N 台に対して(N 1)箇所選び,分割された部分の遺伝子列を配送車 N 台がそれぞれ担当する方法が考えられる.しかし,このアルゴリズムでは遺伝子列に仕切り" で選ぶ場合,配送点数と配送車両数によって発生しうる仕切りの選択数の組み合わせは多く,それら全てに対してスケジューリングし,評価していては計算時間が増加してしまい,実用的ではなくなる.

そこで,本稿ではこの複数配送車による配送スケジューリングを,メッシュ地図から作成されるエリア地図を使用してスケジューリングを決定する方法を提案する.

まずメッシュ地図より,ある一定の大きさのエリアデータからなるエリア地図を作成し,このエリア地図をもとに複数の配送車両を各配送地域に割り当てる.ある配送地域の中にある配送点を,1台の配送車が担当する配送点とし,各配送地域内での配送スケジューリングを行う.

エリア地図内の配送地域は,配送車の台数に応じた数とし,複数の配送車両を割り当てていく.

#### 6.1 配送地域割り当てアルゴリズム

本稿では,エリアデータを分割する際にそれぞれの道路がもつ交通量に応じた分割法を提案する.

Stepl: エリアデータをエリア道路情報から得られる隣接指標に従って,配送車両N台に割り当てる. その際,エリアデータは必ず対象エリアのみ割り当てる.

Step2: 大型配送車両から優先的に割り当て,配送先に優先関係などがある場合は,最大積載量に余裕のある配送車両が向かうように割り当てる.

 ${
m Step 3:}$  配送車両 N 台それぞれを評価指標に従って評価する.

以上のアルゴリズムから,最良配送地域を割り当てる.

#### 6.2 配送車両の最大積載量

各配送車両において,配送する荷物の総重量が,配送車両の最大積載量を越えないように配送点を割り当てる.配送車両 $v_i$   $(i:1\sim n)$  に割り当てられた配送点k の配送量を $w_{v_i}^k$  とし,配送車両 $v_i$  の総配送量 $w_{v_i}$  を求める.また最大積載量を $W_{\max}$  とし,最大積載量を超えないようにする.

$$w_{v_i} = \sum_{k=1}^{m} w_{v_i}^{k}$$
 (7)

$$W_{v_i} \le W_{\max v_i} \tag{8}$$

#### 6.3 配送車両コスト

配送車両コストは,配送を行う際に掛かる燃料費や人件費を考える.単位距離当りの燃料費を $t_F$ ,人件費を $t_M$ とし,配送車両 1 台の配送距離 $t_D$ ,配送車 1 台の労働時間 $t_T$ を求め,配送料金 $t_F \times t_D$ と給料 $t_M \times t_T$ を計算する.そしてこれに対応する燃料費コスト $t_F$ ,人件費コスト $t_M$ を求め,

2 つの目的関数 $_{(f_{\mathbb{F}},\,f_{M})}$ に重み $_{(w)}$ をつけ,総合評価 $_{f_{s}}$ を求める[1].

$$f_s = (1 - w_F (1 - f_F)) \times (1 - w_M (1 - f_M))$$

$$(0 \le w_F \le 1, 0 \le w_M \le 1)$$
(9)

#### 6.4 エリア道路情報

通常配送先間は,道路で接続されているが,その道路は「国道」「県道」「都市部道路」といったように交通量がそれぞれの道路の種類によって変化している.

そのため「大型配送車両は,都市部道路を優先的に通行する」や「国道は,やや道路幅が狭いため,中型の配送車両が向かうことが望ましい」といったような条件が発生する場合がある.そこで本稿では,エリア地図に「国道」「県道」「都市部道路」といったエリア道路情報を付与する.

本稿で用いるエリア道路情報は,エリアデータ間の隣接 指標を算出して割り当てる.

#### 6.5 隣接指標

表1の道路分類表より,エリアデータを分割する際に使用する隣接指標を求める.

エリア道路情報を  $R_i$  , メッシュ地図上の接続道路情報を  $r_{ij}$  , エリアデータの接続方向をi , エリアデータ間の隣接 メッシュ数を j とすると , エリアデータ間の隣接指標は以下の式となる .

$$R_i = \sum_{i=1}^{8} (r_{ij} \mod 4)/8 \qquad (i = 1, 2, \dots, 8) \quad (11)$$

以上の隣接指標から,国道が多ければ中型の配送車両を, 県道が多ければ小型の配送車両を,都市部道路が多ければ 大型の配送車両を割り当てる.

表1 道路分類

	一般道路A(国道)	一般道路B(県道)	幹線道路	都市部道路 (DD)
何もなし	1	2	3	4
朝光滞	5	6	7	8
夕渋滞	9	10	11	12
朝·夕渋滞	13	14	15	16
工事·事场资滞	17	18	19	20

#### 7 スケジューリングとその結果

10 個の配送点を設定し,物資配送計画法に従い巡回するスケジューリングを行う.配送車両は最大3台とし,点0を配送開始地点および最終地点とする.各配送点の滞在時間は最短15(min)・平均30(min)・最長45(min),配送開始時刻を13:00として最良配送経路探索を行う.

メッシュ地図用に特化した Dijkstra の重み付きグラフの 最短路アルゴリズムと,配送順序探索アルゴリズムに GA 探索法を適用.配送点 O H に対する優先関係,配送点 D に 14:00 から 15:30 までの到着時刻指定を考慮する.

配送シミュレーションの初期設定は,大型配送車両1台の使用費を20000円,中型配送車両の使用費を10000円,小型配送車両の使用費を5000円とするまた燃料費を30円/km,人件費を時給1000円とし,配送車両の最大積載量を大型車から小型車の順にそれぞれ4500kg2000kg,1500kgとする.また配送点への配送両を全て300kgとする.

- ・優先関係の設定は(3)式の重要度 $(p_{ii})$ を1とする.
- ・制約条件の設定は図 2 の概形のファジィ目標メンバーシップ関数を用い、(1)式の各パラメータを p=840、

q=870 , r=900 , s=930とする .

・(4)式の重みは $W_G = 1$ ,  $W_P = 1$ とする.

GA の各パラメータは、個体数 M=120、選択個体数 60、 エリート個体数 12, エリート個体は適応度上位 10%, 選択 率は適応度上位 50%, 突然変異率 0.3, 終了判定世代数 100 とする.スケジューリングの結果を表 2, 配送評価を表 3, 配送地域の割り当て結果を図6,配送経路を図7に示す.

以上の結果から、制約条件を満たし、かつ複数台の配送 車両を使用することで,巡回する際に必要な配送コストを 低く抑えることができる配送スケジューリングを提案する ことができている.

#### 9 まとめ

本論文では,物資配送計画法の提案を目的とし,そのた めの手法を示した、現実に問題となる移動時間や制約条件 を考慮し,実用可能な時間で使用できる物資配送計画法を 示すことができた.また,複数配送車両を考慮下での,配 送コストを最小にする配送スケジューリングを提案した.

今後の課題としては,メッシュ地図の細密化による計算 時間増加への対処が考えられる.また,複数配送車両を考 慮する場合,配送地域割り当ての際の評価指数を増やし, 有効な配送地域の精度の向上と,配送コストの削減を目指 す必要がある.

表2 スケジューリング結果

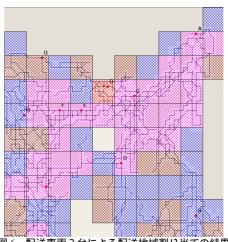
表2.1 配送車両1台目の配送順序						
訪問順序		着時			在時	
			最大		平均	最大
0 (出発点)	13:00	13:00	13:00			
В	13:10	12:17	12,25	0.20	0.20	0.40
В	13.10	13.17	13.23	0.20	0.30	0.40
Н	13:45	14:15	14:44	0:20#	0136	设单0年
0.407.5						
0 (終了点)	14:13	14:59	15:44			

表2.2 配送車両2台目の配送順序							
<b>公明順度</b>	到着時間 最小 平均 最大 13:00 13:00 13:00			洪	在時	置	
初间限分	最小	平均	最大	最小	塪	最大	
0 (出発点)	13:00	13:00	13:00				
目の配送順序							
0 (終了点)	13:29	13:48	14:07				

4X2.5 旧及手門5日日VMD区間77						
訪問順序	到着時間			滞在時間		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大
0 (出発点)	13:00	13:00	13:00			
С	13:02	13:03	13:05	0:20	0:30	0:40
A	13:28	13:44	14:00	0:20	0:30	0:40
E	13:59	14:32	15:06	0:20	0:30	0:40
D	14:25	15:13	16:02	0:20	0:30	0:40
F	14:53	15:57	17:01	0:20	0:30	0:40
1	15:18	16:37	17:57	0:20	0:30	0:40
0 (終了点)	15:46	17:21	18:57			

表 2 配送評価

		使用費コスト	人件費コスト	燃料費コスト	配送コスト
		×10 /3 (円)	×10 % (円)	×10 /3 (円)	×10 /3 (円)
配送車両 1台による配送		20.00	7.501	5.610	33.111
配送車両2台による配送	配送車両 1台目	10.00	2.548	2.040	14.583
	配送車両2台目	20.00	4.351	2.580	26.931
配送車両3台による配送	配送車両 1台目	10.00	1.977	1.890	13.867
	配送車両2台目	5.00	0.800	0.570	6.370
	配送車両3台目	20.00	4.351	2.580	26.931



配送車両3台による配送地域割り当ての結果 図 6

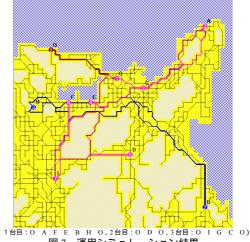


図7 運用シミュレーション結果

## 参考文献

- [1] 前田,濱田,村上,遺伝的アルゴリズムファジィ評価を用い た物資配送計画,知能と情報(日本知能情報ファジィ学会誌), vol.15, No.1, pp.111-126 (2003)
- [2] 坂和正敏,田中雅博,遺伝的アルゴリズム, pp.17-30,115-123(1995)朝倉書店
- [3] 三宮信夫, 喜多一, 玉置久, 岩本貴司, 遺伝アルゴリズムと 最適化, pp.1-51(1998)朝倉書店
- [4] 北野宏明,遺伝的アルゴリズム,pp.43-60(1993)産業図書
- [5] 村上周太,向殿政夫,本多中二,前田幹夫,和多田 淳三,坂和正敏,ファジィシステム演習問題集, pp.9-10,49-56,171-187(1992)工業調査会
- [6] 水本雅晴, ファジィ理論とその応用, pp.107-121(1987)サイエ ンス計
- [7] C.L.リュ , 成嶋弘 , 秋山仁 , コンピュータサイエンスのため の組み合わせ構造とグラフ理論入門, pp.111-114 (1978)マグロ ウヒル好学社

**連絡先:**〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1

九州工業大学工学部電気工学科

前田 幹夫

TEL (093)884-3249

E-mail mmaeda@comp.kyutech.ac.jp

# 進化戦略を用いたファジィ測度の同定

## Identification of a Fuzzy Measure by an evolutionary Strategy

若林高明

三田村保

WAKABAYASHI Taka'aki 北海道教育大学旭川校

MITAMURA Tamotsu 北海道工業大学

Hokkaido University of Education, Asahikawa

Hokkaido Institute of Technology

#### Abstract

Evolutionary strategies (ESs) are the algorithms developed to solve non-linear optimization problem. In this article we apply an ES to identification of a fuzzy measure on a finite set. We formulate the problem and conduct numerical experiments.

#### はじめに 1

有限集合上のファジィ測度の同定は困難であることが 多い.本稿では,非線形最適化問題を解くためのアルゴ リズムである進化戦略を導入し、ファジィ測度の同定を 高速に行う方法について述べる.

#### $\mathbf{2}$ λファジィ測度

本稿では,有限集合上の $\lambda$ ファジィ測度[1]のみを扱 うこととする.

有限集合  $S = \{s_1, \dots, s_n\}$  の互いに排反な部分集合列  $\{E_i\}$  と  $-1 \le \lambda < \infty$  に対して,

$$g_{\lambda}(\bigcup_{i=1}^{k} E_{i}) = \begin{cases} \frac{1}{\lambda} \left\{ \prod_{i=1}^{k} [1 + \lambda g_{\lambda}(E_{i})] - 1 \right\}, & \lambda \neq 0 \end{cases}$$
  $\alpha'_{ij} = \alpha_{ij} + \beta \xi_{ij}, & i = 1, \cdots, n-1, j = i, \cdots, n \quad (3)$   $x' = x + z \quad (4)$   $\sum_{i=1}^{k} g_{\lambda}(E_{i}), \qquad \lambda = 0 \quad \text{ここで,} \xi, \xi_{i}, \xi_{ij} \text{ はそれぞれ独立に正規分布 } N(0,1) \text{ に 従う乱数である.また } z \text{ は平均が } 0 \text{ , 共分散行列が } C \text{ と } \end{cases}$ 

を満たす集合関数  $g_{\lambda}: 2^{S} \rightarrow [0,1]$  を  $\lambda$  ファジィ測度と いう.

本稿で扱う  $\lambda$  ファジィ測度は  $g_{\lambda}(S) = 1$  を満たすもの とする.

#### 進化戦略 3

進化戦略 (ES) は n 次元実数空間  $\mathbf{R}^n$  を定義域とす る非線形最適化問題を解くことを目的に,60年代に考案 されたアルゴリズムである [2] . ES では, 実数値表現さ れた個体に正規分布に従う摂動を加える形で突然変異を 導入し,これを主な探索手段としている.

ES にはさまざまなバリエーションが存在するが,本

稿では, $(\mu, \lambda)$ - $\mathrm{ES}^1$ という方法を採用する.以下にその 概要を述べる[3].

 $(\mu, \lambda)$ -ES においては, $\mu$ 個の親個体から生成された  $\lambda(\geq\mu)$  個の子個体のうち,適応度の高い(目的関数値の 良い) ものから順に  $\mu$  個を次世代の親個体として選ぶ.

#### $(\mu,\lambda)$ – $\mathbf{ES}$ における突然変異

突然変異は,以下の手順で行われる. $(\mu, \lambda)$ -ES にお いては,突然変異パラメータも進化の対象となる.

以下の通り突然変異パラメータ  $\sigma_i, lpha_{ij}$  と個体 x より 次世代のパラメータ  $\sigma_i', \alpha_{ij}'$  と個体 x' を生成する.

$$\sigma_i' = \sigma_i \exp(\tau' \xi + \tau \xi_i), \quad i = 1, \dots, n$$
 (2)

$$\alpha'_{ij} = \alpha_{ij} + \beta \xi_{ij}, \quad i = 1, \dots, n - 1, j = i, \dots, n \quad (3)$$

$$x' = x + z \tag{4}$$

従う乱数である.またzは平均が0,共分散行列がCと なる n 次元正規分布

$$N(0,C): p(z) = \frac{\exp(-\frac{1}{2}z^TC^{-1}z)}{\sqrt{(2\pi)^n|C|}}$$

に従う乱数であり ,  $\sigma_i', \alpha_{ij}'$  を用いて以下の手順で生成さ れる.

- 1. 各成分に独立に  $N(0,\sigma_i'^2)$  に従う乱数を生成して e= $(e_1, \dots, e_n)^T$  を作る.
- 2. 各  $lpha_{ij}'$  に対して回転変換を表す行列  $R(lpha_{ij}') = \{r_{ij}\}$

$$r_{ii} = r_{jj} = \cos \alpha'_{ij}$$
  
 $r_{ij} = -r_{ji} = \sin \alpha'_{ij}$ 

 $\overline{\phantom{a}}^1\lambda$  ファジィ測度の  $\lambda$  と  $(\mu,\lambda)$ – $\mathrm{ES}$  の  $\lambda$  は別物であることに注意 されたい.

として作る.但し,他の成分は対角要素を1,非対角要素を0とする.

3. すべての  $lpha_{ij}'$  に対応する  $R(lpha_{ij}')$  をeに作用させてzを作る .

$$z = \prod_{i=1}^{n-1} \prod_{j=i+1}^{n} R(\alpha'_{ij})e$$

パラメータ  $\tau$ ,  $\tau'$  および  $\beta$  の推奨値として

$$\tau = \left(\sqrt{2\sqrt{n}}\right)^{-1}$$

$$\tau' = \left(\sqrt{2n}\right)^{-1}$$

$$\beta = 0.0873(=5^{\circ})$$

が提唱されている.

#### $3.2 \quad (\mu, \lambda)$ -ES における組換え演算

 $(\mu,\lambda)$ -ES では複数個の親個体を扱うので,子個体の生成に組換え演算を導入することができる.例えば,親の値の中点を子の値とするなどの方法が考えられる.

## 3.3 $(\mu, \lambda)$ -ES のアルゴリズム

 $(\mu,\lambda)$ -ES では,個体aとして,

$$a = (x, \sigma, \alpha)$$

$$x = (x_1, \dots, x_n)$$

$$\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_n)$$

$$\alpha = (\alpha_{1,2}, \dots, \alpha_{n-1,n})$$

を用い,この遺伝子表現をとる個体からなる個体集合 Pを

$$P = \{\boldsymbol{a}^1, \cdots, \boldsymbol{a}^{\mu}\}$$

で定義し,以下のアルゴリズムにより計算を進める.

#### begin

t := 1 (t:世代カウンタ)

初期個体の生成,目的関数値の評価

repeat

組換え

突然変異

各個体の目的関数値の評価 次世代の親個体集合の選択

t = t + 1

until 終了条件 == true

end

# $oldsymbol{4}$ $(\mu,\lambda)$ $-\mathbf{ES}$ による $\lambda$ ファジィ測度の同定

本稿で扱う  $\lambda$  ファジィ測度は ,  $g_{\lambda}(S)=1$  を満たすものとされるので , これを補助目的関数として  $f_1(x)=0$  の形で表す . ここで , x の各成分  $x_i(i=1,\cdots,n)$  を S の各要素  $s_i(i=1,\cdots,n)$  に対する測度  $g_{\lambda}(s_i)$  とする . その他ファジィ測度に対する制約を  $f_2(x)=0,\cdots,f_m(x)=0$ で表し , 主目的関数を

$$f(\boldsymbol{x}) = \sqrt{f_1^2(\boldsymbol{x}) + \dots + f_m^2(\boldsymbol{x})}$$

とすると , S 上の  $\lambda$  ファジィ測度を同定する問題は以下 のように定式化される .

minimize 
$$f(\mathbf{x}) = \sqrt{f_1^2(\mathbf{x}) + \dots + f_m^2(\mathbf{x})}$$
  
subject to  $\mathbf{x} \in [0, 1]^n$  (5)

上記の最小化問題を解くことにより得られる最適解  $x^*$  の各成分  $x_i^*(i=1,\cdots,n)$  を ,同定された S の各要素  $s_i(i=1,\cdots,n)$  に対する測度  $g_\lambda(s_i)$  とする .

# 5 おわりに

進化戦略を用いてファジィ測度を同定する方法を提案 した.数値実験の結果の詳細については大会当日発表 する.

# 参考文献

- [1] Sugeno, M., Theory of fuzzy integrals and its applications, Doctoral Thesis, Tokyo Institute of Technology(1974)
- [2] Bäck, T. and Scherfel, H.-P., "An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization", Evolutionary Computation I(1), pp.1–23(1993)
- [3] 三宮信夫他,遺伝アルゴリズムと最適化,朝倉書店 (1998)

# 連絡先:

若林高明

北海道教育大学旭川校

〒 070-8621 旭川市北門町 9

Phone: 0166-59-1357

Email: wakat@asa.hokkyodai.ac.jp

# 階層的モザイク処理画像を用いた画像比較手法に関する研究

#### Proposal of Image Comparison Method based on Hierarchical Mosaic Images

竹内 健太郎 Kentaro Takeuchi 東京都立科学技術大学

Tokyo Metropolitan Institute of Technology

高間 康史
Yasufumi Takama
東京都立科学技術大学

Tokyo Metropolitan Institute of Technology

Abstract: Huge volume of images exists in the Web site, but it is still difficult for us to search for the images that match what we have in our mind. This paper proposes the method for comparing images flexibly according to the purpose of comparison as well as target images. The method generates the mosaic images of various block sizes, from single image. The image comparison is performed based on the color difference between images with L\*a\*b\* colorimetric system. Experiments are performed to consider the relation between the adequate block size and image contents, in terms of similarity judgment.

#### 1. はじめに

現在、様々なWebサイト内で大量の画像が存在している。画像を検索する手段はGoogleのイメージ検索、類似画像検索[1]などがあるが、前者はファイル名から検索する手法であり、後者はクエリとなる元画像が必要であるため、ユーザが頭の中でイメージした画像をWeb上に分散し存在する画像リソースから検索する事は非常に困難である。本研究ではディレクトリサービス型画像検索システムの実現のために、要素技術となる階層的モザイク処理画像を用いた画像の比較手法を提案する。作成した各階層のモザイク処理画像においてRGB値、L\*a\*b\*表色系を用いて計算した画像間の誤差とユーザによる類似性判定の結果を比較した結果、ブロックサイズによらず被験者の判断に近い類似度判定が行えること、及び対象画像のタイプ毎に適したブロックサイズが異なることを示す。

#### 2. ディレクトリサービス型検索

テキスト情報を対象とした Yahoo!などのディレクトリサービスでは、キーワードによりカテゴリ下にある情報のコンテンツを要約的に表すが、画像の場合も同様な要約的表現ができればクエリ画像を必要としない検索が可能と考える。本研究では適切なブロックサイズを用いたモザイク処理画像が有効であると考え、階層的モザイク処理画像を用いた画像比較手法を提案する.

#### 3. 階層的モザイク処理画像の作成

画像を  $N\times N$  のブロックに分割し、各ブロック内で R(赤)、G(緑)、B(青)のそれぞれの値について平均値をと りそのブロックの RGB 値としたものをモザイク処理画像と呼ぶ。本研究ではブロックを  $16\times 16$ 、 $12\times 12$ 、 $8\times 8$ 、 $6\times 6$ 、 $4\times 4$ 、 $3\times 3$ 、 $2\times 2$  の 7 段階で上記の処理を行い、階層的なモザイク処理画像を作成する。図 2(a)の画

像は図 1 の画像から生成した  $12 \times 12$  ブロックのモザイク処理画像であり、(b)は  $4 \times 4$  ブロックのモザイク処理画像である.

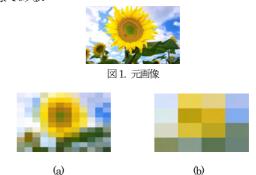


図2. 図1の(a)12×12, (b)4×4ブロックのモザイク処理画像

#### 4. 画像の類似度の比較

画像の類似度比較には光の三原色である RGB 値による誤差と、均等色空間である L\*a\*b\*表色系による誤差を用いた. L\*a\*b\*表色系の各値は明度が L\*、色相と彩度を表す色度が a\*、b\*であり、RGB 値から計算によって変換することができる[2]. RGB 値による誤差は R,G,B 各値において平均二乗誤差を求め全画素の平均値により定義する. L\*a\*b\*表色系は三次元の均等知覚色空間であるため色差は三次元空間上の距離で表現される.

#### 5. ユーザによる比較実験

被験者実験のために10枚からなる画像のグループを7つ作成した.グループごとに1枚を選択し、各階層のモザイク処理画像について残り9枚の中から似ていると思う画像を最大5枚まで選んでもらった.1人の被験者に全て異なる階層・グループからなる7問のアンケートを行い、21人から回答を得た.これによりグループ・階層ごとに3人分の結果を得た.作成した画像セットは以下のとおりである.

- セット1…子供や家族
- セット2…向日葵や椿などの花
- ・セット3…街中
- ・セット4…りんご・栗・トマトなど形状・色ともに似た もの
- ・セット5…海や空などの全体的に青い風景
- ・セット6…桜、森、夕日などの様々な色の風景
- ・セット7…ミカン、レモン、キャベツなど形の似 たもの

#### 6. 実験結果

被験者実験において、各問題について3人中2人以上のユーザが「似ている」と判断した画像をユーザが選んだ類似画像とする. RGB 値による平均二乗誤差及びL\*a\*b\*表色系における色差を用いてそれぞれ求めた上位5つの画像と、ユーザが選択した類似画像を比較しその再現率を計算したところ、RGB値による平均二乗誤差の場合、再現率の平均値は0.80、L\*a\*b\*表色系による色差の場合、再現率の平均値は0.86といずれも精度の高い結果が得られた. また画像毎に似ていると回答したユーザ数を集計し、各セットの各階層における分散を計算したところ、階層による変化の傾向により大きく3つに分けられた. ここで、画像が判別しやすいときは回答が特定の画像に集中するため分散は大きくなり、画像が判別しにくいときは結果がばらつくため分散は小さくなるといえる.

タイプ A(セット 1,2,3)…図 3 はセット 2 の被験者実験 の結果による分散のグラフである。モザイク処理画像の ブロックサイズが小さいほど分散が大きく、大きいほど 分散は小さくなる。これよりこのセットは全体的に類似した画像が多いため、ブロックサイズが大きいほど画像 の判別が難しくなると考える。

タイプ B(セット 4,7)…図 4 はセット 4 の被験者実験の結果による分散のグラフである。モザイク処理画像のブロックサイズが小さいほど分散が小さく、大きいほど分散が大きくなっている。これはこのセットが全体的に形状に特徴をもつものであり、大きなブロックほどその特徴が顕著に表れたためだと考えられる。

タイプ C(セット5,6)…図5はセット6の被験者実験の結果による分散のグラフである。モザイクのブロックサイズに関わらず分散が一定となっている。セット6は画像にばらつきが多く、被験者実験の結果もブロックサイズに関わらずほぼ一定のものとなった。セット5も同様の結果が得られたが、これは全体的に似た画像ばかりだったため、ブロックサイズに関わらずユーザの類似性判定の結果がバラバラであり分散が一定となった。

また全体を通して 3×3 の場合のみ分散が低くなる傾向があるが、このサイズのみ画像の中心を含むブロックが存在しており、これが被験者の類似度判定に影響を与えたと考えられる.

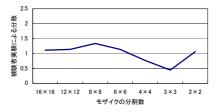


図3. セット2の被験者実験の結果による分散

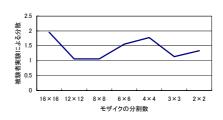


図4. セット4の被験者実験の結果による分散

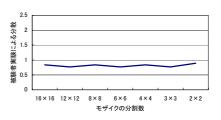


図5. セット6の被験者実験の結果による分散

#### 7. まとめ

ディレクトリサービス型画像検索システム実現のための要素技術として、階層的に作成したモザイク処理画像を用いた画像比較手法を提案した. RGB 値、L\*a\*b\*表色系 2 通りの方法を用いて誤差を比較した結果、いずれの場合もユーザの類似性判定とほぼ同様の結果が得られた. 本研究で得られた結果を元として適切な集約情報を提供可能なディレクトリサービス型画像検索システムを構築することが今後の課題である.

#### 参考文献

- [1] 宇佐見 仁英:文書/画像の類以検索技術, 富士通ジャーナル, No.249, Vol.27, No.1, pp.30-34,2001
- [2] 小屋夕介,中西崇文,北川高嗣:

L\*a\*b\*表色系を利用した静止画像からのメタデータ自動抽出方式、第14回データ工学ワークショップ、2003

#### 連絡先

#### 高間康史

東京都立科学技術大学大学システム基礎専攻

#### $\overline{\top}191\text{-}0065$

東京都日野市旭が丘6-6

#### 電話/FAX:042-585-8629

E-mail:ytakama@cc.tmit.ac.jp

# ビジュアルキーに基づく効率的な画像検索手法の提案

Proposal of an Efficient Image Retrieval Method based on a Concept of Visual Keys

世良田 学 延原 肇 吉田 真一 川本 一彦 廣田 薫
Manabu Serata Hajime Nobuhara Shin-ichi Yoshida Kazuhiko Kawamoto Kaoru Hirota 東京工業大学

Tokyo Institute of Technology

**Abstract:** A new query method, using tree structure, is proposed for easy operation of users and for increasing query candidate sub-images. The tree structure is constructed based on hierarchical clustering, used for the construction of representative regions called visual keys, and the visual keys are constructed for efficient and user-friendly image retrieval. The tree structure is compressed to keep depth and width in balance. Experimental results show that the constructed tree structure is compressed moderately (The maximum depth of leaf decreases from 53 to 11, and the rate of nodes having 10 and under children is more than 97%.)

#### 1. はじめに

不特定多数のユーザを対象とした大規模画像検索システムでは、ユーザの操作性の向上および検索負荷の軽減が重要な課題となっている。これに対し、ビジュアルキーと呼ばれる、画像データベースにおける代表部分画像群に基づいた検索システム(VKS)がSerata[1]によって提案されている。このVKSの場合、対象画像群の規模が大きくなるに従い、ユーザが検索に利用できるビジュアルキーの数が増加する。本研究では、ビジュアルキー生成時に用いるクラスタリングに基づき木構造を構築し、階層的にクエリ候補部分画像群をユーザに提示することで、ユーザの負担の増加を抑え、また、柔軟にクエリを作成する手法を提案する。

#### 2. クエリ作成のための木構造の生成

VKS[1] におけるビジュアルキーは以下の i) ~ iii) に基づき生成される。

- i) セグメンテーションにより、画像データベー ス中の画像から部分画像群を生成
- ii) 各部分画像から特徴量を算出
- iii) ii) の特徴空間上で、階層型クラスタリングを用い、得られた各クラスタ中心に最も近い特徴ベクトルを持つ部分画像をビジュアルキーとして選定
- iii) のクラスタリングでは、システム設計者の設定したビジュアルキーの数になるまでクラスタリングを行う。

一方、提案手法では、クラスタ数が1になるまでクラスタリングを行い、その過程を木構造で表現することで、ユーザにトップダウンでクエリ候補部分画像群を提示する(図1参照)。その際、各節を代表する部分画像として、その節に属する部

分画像群の平均特徴ベクトルに最も近い特徴ベクトルを持つ部分画像を用いる。

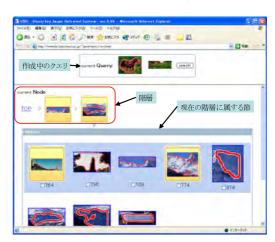


図 1: クエリ作成用インターフェイス

ただし、階層型クラスタリングの過程は二分木で表されるため、そのままでは階層の深い木構造となり、クエリ作成におけるユーザの操作性は良いとは言えない。よって提案手法では、階層構造における親子の節を以下の条件

$$\bar{\sigma_c}/\bar{\sigma_p} > \alpha,$$
 (1)

を満足したときに統合する (図 2 参照)。ここで  $\bar{\sigma}_c$  と  $\bar{\sigma}_p$  はそれぞれ、子と親の節に属する部分画像の特徴空間上における平均標本標準偏差値、 $\alpha$  は閾値を表す。

#### 3. 木構造を利用した類似度計算

クエリベクトルを  $\mathbf{q} = [q_1 \quad q_2 \quad \cdots \quad q_n]^T$  とする。ここで  $q_i$  はユーザによってクエリとして選ばれた節あるいは葉であり、n はその個数である。検索対象の画像を  $I_1, I_2, \cdots, I_N$  とし、画像  $I_j$  をセグメンテーションによって  $m_j$  個の部分画像  $s_{ij}$  に分割し、 $\mathbf{i}_j = [s_{1j} \quad s_{2j} \quad \cdots \quad s_{m,j}]^T$  なるベク

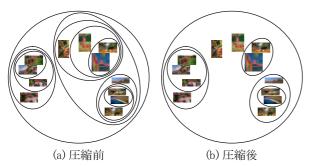


図 2: 木構造 (領域的表現) と圧縮

トルと、各部分画像  $s_{ij}$  の画像  $I_j$  における重み  $tf_{ij}$ からなるベクトル $\mathbf{tf}_j = [tf_{1j} \ tf_{2j} \ \cdots \ tf_{m_ij}]$ で表現する。 $tf_{ij}$  はテキスト検索における拡大正 規化索引頻度 [2] である。節  $n_i$  に属する全ての 葉を

$$\mathbf{L}_{n_i} = \{l | l \in \mathbf{L}_c \text{ for } ^\forall c \in n_i\}, \tag{2}$$

で表現する。クエリベクトル  $\mathbf{q}$  と画像  $I_i$  間の類 似度 Q を、コサイン尺度をベースに、

$$Q(\mathbf{i}_{j}, \mathbf{tf}_{j}, \mathbf{q}) = \frac{\sum_{q \in \mathbf{q}} \sum_{l \in \mathbf{L}_{q}} \sum_{i=1}^{m_{j}} H(s_{ij}, tf_{ij}, l)}{\sqrt{\sum_{tf_{ij} \in \mathbf{i}_{j}} tf_{ij}^{2}} \sqrt{|\mathbf{q}|}}, (3)$$

$$H(s_{ij}, tf_{ij}, l) = \begin{cases} tf_{ij} (s_{ij} \in l) \\ 0 \text{ (otherwise)} \end{cases}, (4)$$

$$H(s_{ij}, tf_{ij}, l) = \begin{cases} tf_{ij} (s_{ij} \in l) \\ 0 \text{ (otherwise)} \end{cases}, \tag{4}$$

で計算し、この値が高いほどクエリ q と対象画 像  $I_i$  が類似しているとする。

#### 4. 画像検索実験

提案システムを Pentium4@1.5GHz の PC にお いて Java 言語で実装し、COREL データベース から選定した 1000 枚 (10 画像カテゴリ×100 枚) の画像を対象データベースとして実験を行う。

木構造の圧縮による結果を図3.4に示す。横軸 はそれぞれ、葉の深度と節が持つ子の数を表し、 縦軸は木構造におけるその頻度を表している。圧 縮条件には $\alpha = 0.845$ を用いた。図3において、 圧縮前は15階層が平均的であるのに対し、圧縮 後は7階層が平均的になっており、また、最大階 層数も53から11に抑えられている。

図4は、階層数の低減に伴って各節が持つ子の 数は増えているが、97%以上の節において子の 数は10以下に留まっており、深さ・子の数の両 点において、ユーザにとって操作性を損なわない 階層構造へ適切な圧縮が行われていることを示し ている。圧縮による検索性能への影響は、平均適 合率 33.6%、平均再現率 21.4%であり、VKS と 同等である。

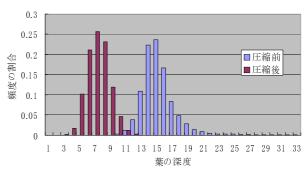


図 3: 木構造における葉の深度のヒストグラム

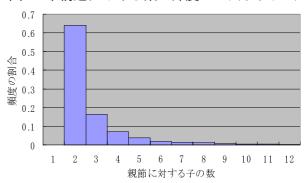


図 4: 木構造の節における子の数のヒストグラム

#### 5. おわりに

VKS におけるクエリ作成補助のために、クラ スタリング過程から作成される階層構造に対し 深さ方向の圧縮を行うことで、ユーザの操作性を 考慮した深さ・幅の階層構造を構築することを提 案している。実験結果から、提案手法が圧縮によ リ適切な階層構造 (葉の最大深度が53から11に 減少、97%以上のノードにおいて子の数が10以 下)を構築することを確認している。今後、適合 フィードバックなどを階層構造に適用することが 必要である。

## 参考文献

- [1] M. Serata, K. Sakuma, Z. Stejic, K. Kawamoto, H. Nobuhara, S. Yoshida, K. Hirota: Efficient and User-Friendly Image Retrieval System Based on Query by Visual Keys, 4th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS2003), pp.451-454, Jeju, Korea. 2003
- [2] 北 研二, 津田 和彦, 獅々堀正幹: 『情報検索 アルゴリズム』, 共立出版, pp.33-36, 2002

#### 連絡先:

〒 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田 4259 東京工業大学 大学院総合理工学研究科

Mail-box G3-49 知能システム科学専攻 廣田研究室 世良田 学

Phone: 045-924-5682 Fax: 045-924-5676

E-mail: sera@hrt.dis.titech.ac.jp

# Multidetector-row CT を用いた生体内における 人工股関節の歪み・折損計測法

An Estimation Method of the Distortion and Breakage of Artificial Hip Joint In-vivo Using Multidetector-row CT

前田 知香†

小橋 昌司†

近藤 克哉†

畑 豊 †

Chika MAEDA 柴沼 均‡

Syoji KOBASHI

Katsuya KONDO Yutaka HATA 黒坂 昌弘‡

Nao SHIBANUMA

Masahiro KUROSAKA

†兵庫県立大学大学院工学研究科 †神戸大学大学院医学系研究科

Graduate School of Engineering, University of Hyogo Graduate School of Medicine, Kobe University

Abstract: The implant used for Total Hip Arthroprasty is distorted and broken due to degradation and a load with time. This paper proposes an automatic measuring method of distortion and breakage of the implant in vivo using MDCT (Multidetector-row CT). MDCT enables us to accurately evaluate distortion and breakage of the implant. The proposed method first extracts the implant from MDCT images using fuzzy object model, which can express a bleary boundary of objects. Comparing the 3-dimensional form data of the implant with the implant extracted from MDCT images, our method quantitatively measures the distortion degree. The comparison is performed with multi-scale matching. As a result on five subjects, we could obtain successfully distortion of the implant in vivo.

#### 1. はじめに

人工股関節全置換手術(THA)で置換された人 工股関節は術後長期経過すると,部品の弛みな いし移動が発生し、それにともなって疼痛や骨 欠損が生じる.そのため人工股関節を再び置換 する必要がある.人工股関節の再置換術[1]は骨 欠損に対して自家骨や人工骨移植によって補填 し、臼蓋補強器具であるサポート用インプラン トで臼蓋を再建[2]する.しかし,人体に埋め込 まれたインプラントは、経年劣化、荷重により 形状の歪み・折損が生じる可能性がある. その ため、インプラントの形状歪みや折損を定期的 に診断することが不可欠となる.

現在,生体内のインプラントの評価は X 線写 真,X線CTで評価する方法などがある.X線写 真による診断[3]では手術後のインプラントの経 過を術後すぐに撮影した X 線写真と, 定期的に 撮影した X 線写真を比較し評価を行っているが, 2次元画像上で診断するため,3次元的な歪みや 折損を診断することは困難である.また,X線 CT で評価する方法[4]では、金属を撮影する際に 生じる金属アーチファクトを考慮しながら、体 内のインプラントを評価しているが,CT画像は 横断面の分解能に対し体軸方向は分解能が劣る 他,2次元断層像の間に不連続部を含むという問 題がある.

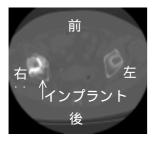
そこで,本研究では MDCT を用いたインプ ラントの形状歪み評価システムを開発する.

MDCT 画像中のインプラントの形状歪みは3次 元形状データから作成したモデル画像と比較す ることで検出される.また,インプラントの形 状歪みは計算機により自動的に定量化し,形状 の歪み具合を可視化することによって医師の診 断を支援できると考えられる.

また,画像処理でMDCT画像中のインプラン ト領域を認識する際、しきい値処理やラベリン グ処理では対処できない箇所が存在する.そこ で,ファジィオブジェクトモデルという物体の 境界をあいまいにしたモデルを用い,インプ ラント領域を自動で認識する方法を提案する.

#### 2. 提案システムの概要

本研究で用いる画像は, TOSHIBA 社製の Aquilion と, GE Medical Systems 社製の LightSpeed Ultra 16 で撮影された水平断層の MDCT 画像である、1 被験者あたりの画像枚数 は 460 枚以上からなり,股関節全体とインプ ラント全体が撮影された 3 次元画像である.ス ライス厚は 0.5mm, 1.25mm, 1 ボクセルあた リの体積は, 0.625×0.625×0.5mm<sup>3</sup>, 0.634×  $0.634 \times 0.5$ mm<sup>3</sup>,  $0.637 \times 0.637 \times 0.5$ mm<sup>3</sup>, <sup>3</sup>,  $0.653\times0.653\times0.5\,mm^3$  ,  $0.441\times0.441\times$ 1.25mm<sup>3</sup>である. MDCT 画像を図1に示す.ま た,3次元形状データはSTL(Stereolithograpy) 形式で表され、物体を多数のポリゴンメッシュ で構成しており、データにはそのポリゴンメッ



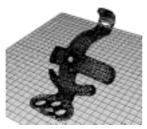


図 1 MDCT 画像

図2 3次元形状データ

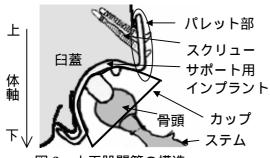


図3 人工股関節の構造

シュの頂点の座標,法線ベクトルが記述されている.メッシュサイズは 0.01mm を用いた.本研究で用いる 3 次元形状データを立体表示したものを図 2 に示す.

人工股関節の構造を図 3 に示す.臼蓋を覆うようにサポート用インプラントが設置され,スクリューで骨盤に固定されている.そしてポリエチレン製のカップをはめこみ,その中に骨頭とステムが埋め込まれている.

本研究の処理の流れとして,まず MDCT 画像 からインプラント領域の抽出を行い,ファジィオブジェクトモデルを用いてインプラントのパレット部を認識する.そして2次元投影図上でのマルチスケールマッチングを行い,歪みの角度の測定を行う.

# 3. ファジィオブジェクトモデルを用いた インプラントのパレット部の認識

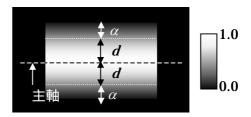
#### 3.1 MDCT 画像からインプラント領域の抽出

MDCT 画像において,インプラントやステムなどの金属器具は約 3000~15000HU という高CT 値を持つので,しきい値処理,ラベリング処理によりインプラント領域のみを抽出する.

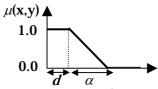
# 3.2 ファジィオブジェクトモデルを用いたイン プラントのパレット部の認識

抽出したインプラント領域にはスクリューが 含まれる.そこで,ファジィオブジェクトモデ ルを用いてインプラント領域からスクリューを 除去し,パレット部の認識を行う.

ファジィオブジェクトモデルとは,物体の境界をあいまいに表現したモデルである.図 4(a)に示すように,物体の主軸から物体の端までの



(a) ファジィオブジェクトモデルの所属度マップ



(b) ファジィメンバーシップ関数 図 4 ファジィオブジェクトモデル

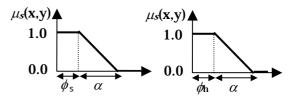
距離を dとし,物体の端から $\alpha$ の距離をあいまいな境界と定義する.そうすることで,境界が鮮明にわからない物体を表現することが出来る.これをファジィメンバーシップ関数で表現したものを図 4(b)に示す.これを用いることで,スクリューとパレット部の接触している箇所を区別する.

まず、画像中のスクリューの主軸を求め、抽出領域中のスクリューの所属度を求める.スクリューのアジィオブジェクトモデルは、スクリューの半径。を底面の半径とした円柱と、スクリューの頭部分は、スクリューのねじ頭部分の半径。1、を底面の半径とした円柱を組み合わせたものとする.このモデルをスクリューに当てはめる.図 5(a)にスクリューである度合いμsの所属度マップとスクリューに関するファジィメンバーシップ関数を示す.

次に,スクリューの主軸上の各ボクセルに対し垂線を考え,垂線上の抽出領域のボクセル数を度数分布化したものをパレット部に関するファジィメンバーシップ関数と定義する.抽出領域中のパレット部である度合いμρを求める.

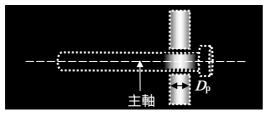


(a)  $\mu_s$ の所属度マップ

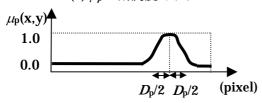


(b) メンバーシップ関数

図 5 スクリューのファジィオブジェクトモデル



(a) μ<sub>p</sub>の所属度マップ



(b) メンバーシップ関数 図 6 パレット部である所属度

図 6 にパレット部である度合い $\mu_p$ の所属度マップとパレット部に関するファジィメンバーシップ関数を示す.ここで, $D_p$ はパレット部の厚みを示す. $\mu_s$ と $\mu_p$ から,抽出領域のボクセルがスクリューとパレット部のどちらに所属するかを以下のように決定する.

 $\mu_s > \mu_p$ のとき スクリューである  $\mu_p > \mu_s$ のとき パレット部である そして,スクリューとみなされたボクセルを除去し,パレット部のみを抽出する.

# 4. 歪みの角度の算出

# 4.1 2 次元投影図上でのマルチスケールマッチング

インプラントの2次元投影図の輪郭線で3次 元形状データとマッチングを行うために, MDCT 画像から抽出したインプラントの2次元 投影図を作成する.ここで , MDCT 画像中の インプラントの座標系を (u,v,w)で定義する.ま ず,インプラントのパレット部を uv 平面と考え る.パレット部の重心を座標系の原点とし,そ の原点からインプラントの長軸の中心を通る軸 を u 軸 , パレット平面に垂直で , フック方向の 軸を w軸 u, w軸に直交する軸を v軸とする . パレット部を最小二乗法により平面推定を行う ことで,画像中のuv平面を求める.次に,イン プラントを MIP 処理によりユーザが指定した任 意平面に投影する. MDCT 画像と同様に,3次 元形状データについても同一平面に対し 2 次元 投影図を作成する.

#### 4.2 歪みの評価方法

マルチスケールマッチング[5]を 2 次元投影図に適用することにより,3 次元形状データとMDCT 画像のインプラントの輪郭線上の対応点が求まる.この対応点と,ユーザが定義するランドマークにより関心角度が決定される.

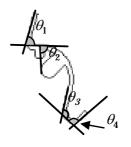


図7 角度の定義

ランドマークで指定する箇所は,医師が指定した疫学的に歪みやすいとする部分である.そして3次元形状データとMDCT画像の関心角度の差を歪みの角度として定義する.

3 次元形状データ上の関心角度の指定方法について述べる.ユーザが,定義した 1 方向の任意平面における3次元形状データの輪郭線上に, 歪みを算出したい角度を,ランドマークを用いて定義する.

これにより求まる 3 次元形状データの角度を $\theta$ c, MDCT 画像の角度を $\theta$ m, 歪みの角度を $\Delta\theta$ とし,式(1)で表される.

$$\Delta \theta = \theta_c - \theta_m \tag{1}$$

#### 5. 実験結果

本実験では、インプラントとして、株式会社神戸製鋼所製の KT プレートを用いた.また、1方向からの任意投影平面をwu平面と定義した.次に、wu平面におけるインプラントの歪みを評価する角度を医師の疫学的判断から定義した.図7に定義した角度 $\theta \sim \theta$ を示す.

# 5.1 シミュレーション実験

提案する歪みの角度算出方法の精度を評価するため、シミュレーション実験として、計算機上で、図7の $\theta$ の角度を2.10°曲げたテストデータと3次元形状データとを比較した.歪みを算出した結果、 $\Delta\theta$  =2.96°となった.よって 0.86°の誤差で歪みの角度を算出することが出来た.

# 5.2 ファントム実験

MDCT 画像と 3 次元形状データを比較可能かを検討するため,ファントム実験として人為的に定義の $\theta$  の角度を 31.4°曲げたインプラントを MDCT で撮影したものと,3 次元形状データを用いて比較した.歪みを算出した結果, $\Delta\theta$ =34.6°と算出できた.よって 3.2°の誤差で歪みの角度を算出することが出来た.この誤差の原因として,MDCT 装置のボクセル化によるパーシャルボリューム効果による影響だと考えられる.

#### 5.3 実際の患者のデータに適用した結果

実際に被験者のMDCT画像と3次元形状データとを比較し,歪みを算出した.本研究で使用した MDCT 画像は術後 4 ヶ月以上経過

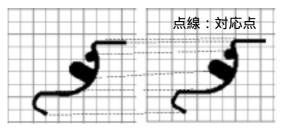


図8 マッチング結果





図 9 抽出結果 図 10 パレット部表 1 被験者データの歪みの角度

被験者	$\Delta \theta_1$	$\Delta\theta_2$	$\Delta \theta_3$	$\Delta\theta_4$
Α	2.7	4.8	9.3	-4.4
В	-0.8	4.8	1.7	16.3
С	3.0	2.4	2.5	5.2
D	3.9	5.3	4.8	-2.2
E	0.6	4.0	0.6	3.7

した 5 名の被験者から取得した.まず被験者のデータからしきい値処理,ラベリング処理によりインプラントとスクリューの領域を抽出した.抽出したインプラントとスクリューの領域を 3 次元表示したものを図 9 に示す.また,ファジィオブジェクトモデルを用いてパレット部のみ抽出した結果を 3 次元表示したものを図 10 に示す.そして,ユーザが定義した歪みの角度  $\theta_{\alpha} \sim \theta_{\alpha}$ を算出した.そして,3 次元形状データと MDCT 画像の角度の差から歪みの角度を算出した.表 1 に求めた歪みの角度を示す.同表より,すべての被験者に対し,歪みを定量化することができた.

また,被験者 5 名のうち,被験者 B は臨床所見によると,体内で,インプラントを固定するスクリューが折損しており,インプラントに過剰な負荷がかかっているとされた.本システムでの $\alpha$  の推定値が,  $\Delta \alpha = 16.3^{\circ}$ と大きな値であるため,臨床所見と一致している.

## 6. まとめ

本文ではMDCTを用いたインプラントの非侵襲自動評価システムについて述べた.本手法は,実際に人体を切開せずに生体内でインプラントの状態を詳細に知ることができるため,術後の定期的な予後診断に有効な方法である.まず,シミュレーション実験を行うことで,歪みの角度を誤差 0.86°という精度で算出できた.次に,ファントム実験として,人為的に曲げたインプ

ラントを撮影した MDCT 画像と 3 次元形状データを比較した.その結果,誤差 3.20°という精度で歪みを算出できた.そして,実際に被験者データと 3 次元形状データを比較する際,インプラントと接触していたスクリューを,ファジィオブジェクトモデルを用いて除去することができた.その結果,自動で全ての被験者に対し歪みの角度を算出することが出来た.さらに,臨床所見と一致する大きな歪みを検出できた.

今後の課題として,折損の評価,歪み角度の 推定精度の向上,そして多くの被験者に本方法 を適用し,本システムの有効性を検証すること があげられる.

#### 謝辞

本研究で用いたMDCT画像を提供して頂いた 医療法人仁寿会石川病院,医療法人社団白眉会 画像診断クリニックに深く感謝いたします.な お,本研究の一部は医療法人仁寿会石川病院の 援助を受けた.

# 参考文献

- [1] 越智隆弘,菊池臣一,股関節外科,13巻,金原出版株式会社,2003.
- [2] 田中千晶, "閉鎖孔フックつき十字プレートを用いた臼蓋再置換," MB Orthopedic, pp. 7-17, 1998.
- [3] J. Allain, F. Roudot-Thoraval, J. Delecrin, P. Anract, H. Migaud, D. Goutallier, "Revision total Hip Arthroplasty Performed After Fracture of a Ceramic Femoral Head. A Multicenter Survivorship Study," Journal of Bone and Joint Surgery American Volume, vol. 85-A, no.5, pp.825-830, 2003.
- [4] C. Zannoni, M. Viceconti, L. Pierotti, and A. Cappello, "Analysis of Titanium Induced CT Artifacts in the Development of Biomechanical Finite Element Models," Medical Engineering and Physics, vol. 20, no.9, pp.653-659, 1998.
- [5] H. Sakou, H. Yoda, and M. Ejiri, "An Algorithm for Matching Distorted Waveforms using a Scale-based Description," Proc. IAPR Workshop on Computer Vision, pp.329-334, Tokyo, Oct. 1988.

#### 連絡先:

前田 知香

兵庫県立大学大学院工学研究科 畑研究室 〒671-2201 兵庫県姫路市書写 2167

Phone + Fax: 0792-67-4986

E-mail: maeda@comp.eng.himeji-tech.ac.jp

# 柔軟な解像度変換処理を併用した JPEG 符号化方式

JPEG Based Codec with Two-stage Image Size Conversion

小川 正裕 Masahiro Ogawa 武蔵工業大学 田口 亮 Akira Taguchi 武蔵工業大学

Musashi Institute of Technology

Musashi Institute of Technology

**Abstract:** It is well known that the standard JPEG algorithm causes visually disturbing blocking effects when high quantization parameter is used to obtain a high compression ratio. In order to obtain a better compression performance, we propose the JPEG compression method with two-stage image size conversion. The proposed method is superior to the standard JPEG in the case of low bit-rate condition, since, we can realize smaller quantization parameter than the standard JPEG. In the proposed method, we change JPEG method to the JPEG method with image size conversion depend on the bit-rate of the compression images. Moreover, the proposed method consists of two-stage image size conversion. We study how to change the compression methods. The proposed method archives high quality image compression adding the small system to JPEG.

#### 1. まえがき

ディジタル画像のデータ量は膨大であるために,データの転送,蓄積の際にそのデータ圧縮が不可欠となる.静止画像に対するデータ圧縮を目的とする国際標準符号化方式として JPEG(Joint Photographic Experts Group)符号化方式が広く普及している.この JPEG 符号化によるデータ量の削減は広い圧縮率で良好な画質を保つことが知られている[1],[2].

しかしながら,JPEG 符号化においても極端に低ビットレート(高圧縮)時には復号画像にJPEG 符号化特有のブロック歪みという画像劣化が生じるため,JPEG 復号画像の画質改善が必要となる.

極端な低ビット時におけるブロック歪みは,量子化の みによるデータ量削減に起因することから,筆者らは文 献[3]において解像度変換を JPEG 符号化方式に併用して 低ビットレート時の画質改善を図った.具体的には, JPEG 符号化の前段にハーフバンドパスフィルタ処理と 間引き処理により水平,垂直両方向のサイズを2分の1 にし,その後,JPEG 符号化を行う方法である.画像サ イズは 1/4 となり,既にその時点でデータ量の削減が行 われているために、その後の JPEG 符号化における量子 化ファクタを小さくすることができ、ブロック歪みの回 避が成される . そして , この方法では , 0.3 ~ 0.4[bit/pixel] 以下で JPEG 復号画像を上回ることになる. しかしなが ら ,0.3~0.4[bit/pixel]付近の JPEG 復号画像には既に軽度 のブロック歪みが生じているため,できればより高ビッ トレートから JPEG 復号画像の画質を上回ることが望ま れる.

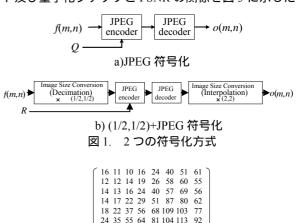
文献[3]では,水平,垂直方向ともに 2分の 1,すなわち(1/2,1/2)倍解像度変換を前提としていた.(1/2,1/2)倍解像度変換では失われる高周波数成分が多大であることが問題となる.そこで本稿では一気に(1/2,1/2)倍解像度変換を行うのではなく,符号化対象画像の性質に応じて水平方向のみに 2分の 1((1/2,1)倍解像度変換),または垂直方向のみに 2分の 1((1,1/2)倍解像度変換)解像度変換を挿入することで比較的高いビットレートから JPEG 復号画像の画質を上回る符号化方式を明らかにする.

# 2. JPEG 符号化に基づいた解像度変換を伴う 符号化方式

#### 2.1 (1/2,1/2)倍解像度変換を伴うJPEG符号化 方式[3]

(1/2,1/2)倍解像度変換を伴う JPEG 符号化方式につい て説明を行う .図 1 に示すように(1/2,1/2)倍解像度変換を 伴う JPEG 符号化は符号化器の前に画像縮小器,復号化 後に画像拡大器を付加する、このことにより離散コサイ ン変換(Discrete Cosine Transform: DCT)領域における量 子化によるデータ量の削減のみではなく,画像サイズを 縮小によるデータ量の削減も成されるため同じビット レートを際の量子化の度合いを制御する量子化ファク タはJPEG符号化の量子化ファクタQより(1/2,1/2)倍解像 度変換を伴う JPEG 符号化の量子化ファクタ R は小さな 値に設定することが可能となり量子化誤差により発生 するブロック歪みの軽減が期待される. JPEG 符号化で は量子化テーブルも自由に設定できるが、広く知られた 典型的なテーブルとして図2のテーブル[4]が挙げられる 以下の議論は量子化テーブルを図2のものに固定されて いることを前提とする.

解像度変換を伴う JPEG 符号化の有効性について実例を通じて説明を行う. 圧縮画像の評価は Peak Signal to Noise Ratio(PSNR)[5]を用いて行う. JPEG 符号化と(1/2,1/2)倍解像度変換を伴う JPEG 符号化のビットレート及び量子化ファクタと PSNR の関係を図 3 に示した.



し72 92 95 98 112 100 103 99 ↓ 図 2. 使用する量子化テーブル

49 64 78 87 103 121 120 101

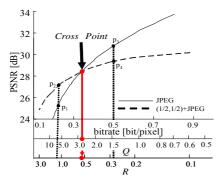


図 3. 2 つの符号化方法の特性 (boat)



a) original





PSNR 24.19 [dB] *Q*=7.630 b) p<sub>1</sub>; JPEG

PSNR 26.63 [dB] *R*=1.360 c) p<sub>2</sub>: (1/2,1/2)+JPEG

図 4 . 符号量 0.2[bit/pixel]の復号画像



PSNR 30.75[dB] Q=1.500 a) p<sub>3</sub>: JPEG



PSNR 29.40[dB] *R*=0.273 b) p<sub>4</sub>: (1/2,1/2)+JPEG



c) p<sub>3</sub>:JPEG



d) p4:(1/2,1/2)+JPEG







f) p<sub>4</sub>:(1/2,1/2)+JPEG

図 5. 符号量 0.5[bit/pixel]の復号画像

JPEG 符号化はビットレートの減少により単調に PSNR が低下し、0.3[bit/pixel]以下においては Q を急激に大きくする必要があるため、特に急激な画質の低下がおこる・一方、解像度変換を伴う JPEG 符号化では画像サイズの縮小によるデータ量の削減を伴うため量子化ファクタ R を大きくする必要がないのでビットレートの減少に伴う PSNR の低下は緩やかである・

実際に復号画像を示し2つの符号化方法の特徴を主観的に明らかにしておく. JPEG 符号化と(1/2,1/2)倍解像度

変換を伴う JPEG 符号化のビットレートと PSNR の関係を示す曲線は交点を持つが,その交点をクロスポイントと称した.このクロスポイントより小さいビットレートである 0.2[bit/pixel]と,大きいビットレートである 0.5[bit/pixel]と,大きいビットレートである 0.5[bit/pixel]における 2 つの方式の復号画像をそれぞれ図 4 ,図 5 に示した.0.2[bit/pixel]では特に図 4 中のマーキングした部分における JPEG 符号化による復号画像の劣化が激しく,2 つの符号化方法の復号画像の差は明らかである. 0.5[bit/pixel]においては,図 5(a),(b)の比較から JPEG 復号画像と解像度変換を伴う JPEG 復号画像の優劣は決定しにくい.図 5(c),(d)のマスト部分の拡大図ではブロック歪みが生じ,JPEG 復号画像が解像度変換を伴う JPEG 符号化よりも劣っている.一方,図 5(e),(f)から,解像度変換を伴う JPEG 符号化のぼけが問題であることがわかる.

## 2.2 水平または垂直方向のみの解像度変換を 伴う JPEG 符号化方式

2.1 に示したように , JPEG 符号化の前にあらかじめ (1/2,1/2)倍解像度変換を行うことはデータ量の削減は大 きいものの, 失われる高周波数成分も大きく急激な画像 の劣化を招く.そこで,最初から(1/2,1/2) 倍解像度変換 を行うのではなく段階的に解像度変換を行うことを考 える (1/2,1/2)倍の解像度変換に至るまでの中間的な解像 度(画像サイズ)は種々考えられるが,本稿では水平も しくは垂直方向にのみに 1/2 倍を行う(1,1/2)倍もしくは (1/2,1)倍解像度変換を中間的な解像度として追加する. 例えば,図6に示す画像 boat について離散フーリエ変換 (DFT)によって得られた振幅スペクトルをみると, <sub>1</sub>方 向は・~ まで周波数成分をもっているが, /2 までにほとんどの周波数成分が集中して いる.このことから,(1,1/2)倍解像度変換を用いること で失う周波数成分を少なく,データ量の削減が成され有 効に作用することが期待される.

画像 boat について(1,1/2)倍解像度変換を伴う JPEG 符号化のビットレート及び量子化ファクタと PSNR の関係を図 3 に追加したものを図 7 に示した.JPEG 符号化と(1/2,1/2)倍解像度変換を伴う JPEG 符号化のクロスポイントである  $CP_0$  よりも JPEG 符号化と(1,1/2)倍解像度変換を伴う JPEG 符号化のクロスポイント  $CP_1$  が高ビットレートにあらわれ,高いビットレートから JPEG 符号化方式よりも PSNR 評価においても優れた結果を導くことになる.しかしながら,0.2[bit/pixel]程度までビットレートを低下させると,量子化ファクタ S も増加するために(1/2,1/2)倍解像度変換を伴う JPEG 符号化と(1,1/2) 倍解像度変換を伴う JPEG 符号化の優劣が入れ替わる.この点を  $CP_2$  とする.

図 5 と同様に 0.5[bit/pixel]の JPEG 符号化と解像度変換を伴う JPEG 符号化の主観評価を図 8 において行う. JPEG 符号化において問題となっていたボートのマスト部におけるブロック歪みは(1,1/2)倍解像度変換を伴う JPEG 符号化では量子化ファクタ8 が 0.685 と抑えられて

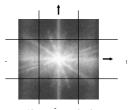


図 6. 画像 boat の振幅スペクトル

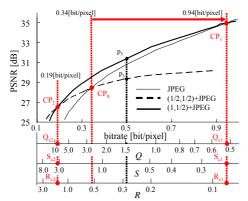


図 7. 片方向解像度変換の適用例 (boat)



PSNR 30.75[dB] *Q*=1.500 a) p<sub>3</sub>: JPEG



PSNR 31.39[dB] S=0.685 b) p<sub>5</sub>: (1,1/2)+JPEG



c) p<sub>3</sub>: JPEG



d) p<sub>5</sub>: (1,1/2)+JPEG

図 8. 符号量 0.5[bit/pixel]の復号画像

いるために発生していない.また,ボートに書かれている文字もぼけることなく JPEG 符号化よりも形状が保たれている.

以上から  $CP_1$  において JPEG 符号化と(1,1/2)倍解像度変換を伴う JPEG 符号化を切り換え,さらに  $CP_2$  において (1/2,1/2)倍解像度変換を伴う JPEG 符号化に切り換えることにより効果的な符号化が実現される.

## 3 柔軟な解像度変換処理を併用した JPEG 符号化方式

#### 3.1 提案する符号化方式

提案する符号化方式の符号器を図 9 に示す.符号器は入力画像ごとに片方向解像度変換方法として,(1/2,1)倍解像度変換と,(1,1/2)倍解像度変換のどちらを選択するかを判断する必要がある.2.2 で示した画像 boat の例からわかるように,帯域制限を行う際に,失う周波数成分の少ない解像度変換を用いることが適当であることは明らかである.そこで,水平方向の高周波数成分の量  $A_h$ ,垂直方向の高周波数成分の量  $A_v$  の小さい方が実際に片方向解像度変換の際に失われる高周波数成分の量であり  $A_{1/2}$  と記述する.すなわち,

$$A_{1/2} = \min\{A_{\nu}, A_{h}\}$$
 であり,

$$A_{h} = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ f(m,n) - f_{v}(m,n) \right\}^{2}}$$
 (2)

$$A_{v} = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{n=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \{f(m,n) - f_{h}(m,n)\}^{2}}$$
 (3)

とする  $f_h(m,n)$ は非圧縮画像 f(m,n)を DFT 領域で垂直方

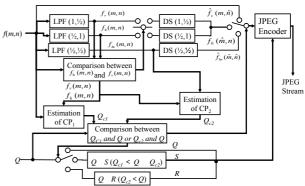


図 9. 柔軟な解像度変換を伴う符号化方式の ブロック図(符号器)

向に 1/2 帯域制限を  $f_v(m,n)$ は同様に水平方向に 1/2 帯域制限したものである  $A_{1/2}=A_h$ のときは(1/2,1)倍解像度変換を  $A_{1/2}=A_v$  のときは(1,1/2)倍解像度変換を選択する .式(1)より非圧縮画像に対して有効な片方向解像度変換方法が決定されたら  $CP_1$  と  $CP_2$  を与えるビットレートにおいて符号化方法を切り換えるために  $CP_1$  と  $CP_2$  を与える量子化ファクタ  $Q_{c1}$  と  $Q_{c2}$  をあらかじめ推定しておく必要がある . さらに  $Q_{c1}$  Q  $< Q_{c2}$  では Q から S への変換を  $Q_{c2}$  では Q から S への変換を  $Q_{c2}$  の推定  $Q_{c1}$  と  $Q_{c2}$  の関係を  $Q_{c2}$  で明らかにする .

復号する際には復号画像のサイズをどのように拡大する必要があるかどうかを判断する必要がある。その判断のために符号器側で画像のサイズ変換を行ったことを記し,復号側に伝える必要がある。その方法の1つとして (1/2,1/2)倍解像度変換を用いたときには解像度変換後の画像の水平,垂直両方向にそれぞれ値が128からなる1ラインを挿入し,垂直方向に解像度変換された画像には垂直方向に,水平方向に解像度変換された画像には垂直方向にが128からなる1ラインを挿入する。復号器側では復号画像に対して128の値を挿入した可能性のある1番下の1ラインと1番右の1ラインの画素値を調べることで符号器側において解像度変換が行われたか否かの判断が可能となる。

#### 3.2 符号化方式の切り換え

提案する符号化方式の  $CP_1$  の推定方法は,筆者らが提案した JPEG 符号化と(1/2,1/2)倍解像度変換を伴う JPEG 符号化を切り換える符号化方式[3]で明らかにしている方法と同じとする.つまり, $CP_1$  を与える量子化ファクタ  $Q_{c1}$  は片方向解像度変換によって失われる高周波数成分  $A_{1/2}$  との相関を利用する方法である.図 10 に示す 9 つの画像に対して  $Q_{c1}$  と  $A_{1/2}$  の関係を図 11 に示した  $A_{1/2}$  と  $Q_{c1}$  の関係は 1 次関数で近似可能であり,最小二乗法を用いて近似関数を求めると,

$$Q_{c1}$$
= $0.370A_{1/2}$ ・ $0.099$  (4) となる . すなわち , 入力画像から  $A_{1/2}$ を算出すれば式(4) により  $CP_1$  における量子化ファクタ  $Q_{C1}$  がわかる . JPEG 符号化は  $Q$   $Q_{C1}$  の範囲のみで用いることになる .

 $Q_{c1}$  Q <  $Q_{c2}$ の領域では片方向解像度変換を伴う JPEG 符号化となるから JPEG 符号化の量子化ファクタ Q から 片方向解像度変換を伴う JPEG 符号化の量子化ファクタ S への変換を行う必要がある. 利用者は Q によってビット制御を行うことから,  $Q_{c1}$  Q <  $Q_{c2}$  において与えた Q と同じビットレートを与える S を知る必要がある.その











(a) boat (b) airplane (c) building (d) lighthouse









(f) girl

(g) Lenna (h) woman 図 10. テスト画像

(i) Barbara

o 2 • Barbara

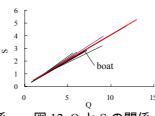
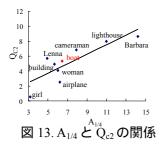
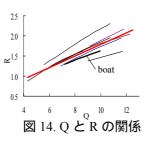


図 11. A<sub>1/2</sub> と Q<sub>c1</sub> の関係

図 12. Q と S の関係





ために,  $Q_{c1}$  Q <  $Q_{c2}$  の領域で同ビットレートを得る JPEG 符号化の量子化ファクタ Q と片方向解像度変換を 伴う JPEG 符号化の量子化ファクタ S の関係をここでも 図 10 に示す 9 つの画像すべてについて実験的に求めて, 図 12 に示した .図 12 より全ての画像に対する Q と S の 関係はほぼ同一となり,QからSへの変換式は,

次に片方向解像度変換を伴う JPEG 符号化から,両方 向解像度変換を伴う JPEG 符号化への切り換え点 CPっを 与える量子化ファクタ Qcoの推定を行う.この場合は, 水平方向に帯域制限された画像 fh(m,n)もしくは垂直方向 に帯域制限された画像  $f_{v}(m,n)$ から両方向帯域制限によっ て失われる高周波数成分 A<sub>1/4</sub> を用いて量子化ファクタ  $Q_{c2}$  の推定を行う.両方向帯域制限された画像を  $f_{hv}(m,n)$ とし 片方向解像度変換からの(1/2,1/2)倍解像度変換に切 り換える際に失われる高周波数成分 A<sub>1/4</sub> は,

$$A_{1/4} = \begin{cases} A_{\hat{h}} & \text{if} \quad A_h < A_v \\ A_{\hat{v}} & \text{if} \quad A_h > A_v \end{cases} \tag{6}$$

と与えられる.ここで,

$$A_{\hat{v}} = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ f_h(m,n) - f_{hv}(m,n) \right\}^2}$$
 (7)

$$A_{\hat{h}} = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{M-1} \{ f_{\nu}(m,n) - f_{h\nu}(m,n) \}^2}$$
 (8)

である.CP2における切り換えの際に失われる高周波数 成分 A<sub>1/4</sub> と CP<sub>2</sub> のビットレートを与える量子化ファクタ Qcoの関係についても CP」における検討と同様に求める と図 13 より A<sub>1/4</sub> と Q<sub>c2</sub> の関係は,

$$Q_{c2} = 0.637 A_{1/4} + 0.526$$
 (9)

となる.

Q Q<sub>C2</sub>の領域では(1/2,1/2)倍解像度変換を伴う JPEG 符号化を用いることになるが,ここでも JPEG 符号化の 量子化ファクタ Q から(1/2,1/2)倍解像度変換を伴う JPEG 符号化の量子化ファクタ R に変換する必要がある.Q  $Q_{c2}$  においても  $Q_{c1}$   $Q < Q_{c2}$  同様 , 利用者の指定した Qと同じビットレートを与える R を知る必要がある JPEG 符号化の量子化ファクタ Q と(1/2,1/2)倍解像度変換を伴 う JPEG 符号化の量子化ファクタ R の関係については文 献[3]で求めているが, CP2は CP0よりも量子化ファクタ が大きく, Qc2 が文献[3]で求めた Q と R の関係が有効で ある Q 10 の範囲を超えている場合があり,量子化ファ クタQがQ>10のときも考慮してQとRの関係を求める 必要がある .そこで図 10 の 9 つの画像すべてに対して Q Qcの範囲における Q と R の関係を求め,図示したも

のが図 14 である.図 14 より 9 つの画像における Q と R の特性は多少のばらつきがある.しかしながら,Q Q におけるビットレートは〇の増加に対するビットレート の減少の度合いが Qc1 Q < Qc2 に比べて低くなるビット レートであるため,多少のばらつきは問題ないと考え, 最小二乗法を用いて近似を行う. QとRの変換式は,

R = 0.143Q + 353(10)

となる.

以上の検討より,利用者は従来の JPEG 符号化の場合 と同様に量子化ファクタ Q のみを与えることにより JPEG 符号化,片方向解像度変換を伴う JPEG 符号化, (1/2,1/2)倍解像度変換を伴う JPEG 符号化が適切に切り 換えられることになる.

### むすび

本稿では筆者らが文献[3]において明らかにした JPEG 符号化と(1/2,1/2)倍解像度変換を伴う JPEG 符号化方式 を拡張した新しい符号化方式の提案を行った、新たに (1/2,1)倍 ,(1,1/2)倍の解像度変換を追加することで画像サ イズ縮小による効果がある程度高いビットレートから あらわれる.段階的な解像度変換の切り換えにおいても 従来の JPEG 符号化同様に量子化ファクタを決定するだ けで画像の種類に依存せずに使用可能とした.

## 参考文献

- [1] 小野文孝,渡辺 裕,国際標準画像符号化の基礎技 術,コロナ社,1998.
- [2] 安田 浩,藤原 洋監,デジタル放送・インターネ ットのための情報圧縮技術,共立出版,1999.
- [3] 小川正裕,嶋内和博,田口 亮,"解像度変換を伴 うJPEG符号化,"信学技報, vol.103, no.52, pp.69-74, May 2003.
- [4] CCITTRec.T.81/ISO/IEC10918-1:"Informa-tionTechnol ogy-Digital compression and coding of continuous-tone stillimages-RequirementsandGuidelines"1992.
- [5] 酒井喜則,吉田俊之,映像情報符号化,オーム社, 東京,2001.

#### 連絡先:

小川 正裕

武蔵工業大学大学院工学研究科

〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1

Phone + Fax: 03-5707-2215

E-mail: ogawa@sp.ee.musashi-tech.ac.jp

## 適応時空間 -フィルタによる圧縮動画像の画質改善

# Improvement of Image Quality for Compressed Video by Adaptive Time and Spatial -Filter

久光 秀明

荒川 董

Hideaki HISMITSU

Kaoru ARAKAWA

明治大学理工学部

Dept. of Computer Science, Meiji University

## **ABSTRACT**

We present a method for improving the video quality depleted by DCT motion compensated coding by extending an -filter, a nonlinear digital filter, to time dimension. Before this, we show that the time and spatial motion compensated -filter from which distortion produced in the video previously compressed by the direction frame prediction coding of order is effectively removed in the comparatively few amount of calculation. This paper shows the effectivity of this system to the bi-directional frame prediction coding generally used, such as MPEG.

## 1. はじめに

DCT 動き補償符号化の圧縮により劣化した動画像の画質改善を効果的に行う適応時空間動き補償 -フィルタを提案する。著者らは先に、DCTフレーム間予測符号化された動画像に生じる圧縮歪みの除去を比較的少ない計算量で効果的に行う時空間動き補償 -フィルタ(略して時空間 -フィルタ)を提案した [2]。本稿では、このフィルタを動画像の局所的性質に応じて適応的に動作させる方式を提案し、これにより圧縮歪を十分除去しながら、先の手法では平滑されすぎた微細変化成分を鮮明に保持できることを示す。

## 2. -フィルタの原理

- フィルタは次式のような入出力関係を有する非線形ディジタルフィルタである[1]。

$$y(n) = x(n) + \sum_{k=-N}^{N} a_k F(x(n-k) - x(n))$$
 (1)

ここに、x(n) は第n 時点での入力信号、y(n) は出力信号であり、 $a_k$  は総和が1 なる低域通過フィルタ係数、関数 F(x) が図1 のような非線形関数であり、以下の条件を満たす。

$$|F(x)| \le \varepsilon : -\infty \le x \le \infty$$
 (2)

これにより - フィルタの入力信号と出力信号 の差は以下のようにある値 '以下に制限される。

$$|y(n)-x(n)| \le \sum_{k=-N}^{N} |a_k| \varepsilon \equiv \varepsilon'$$
 (3)

よって、振幅の大きな変化成分を維持しながら振幅が小さな高周波成分を除去することができる。

## 3. 時空間動き補償 -フィルタの原理

時空間 -フィルタは空間領域において二次元的に -フィルタ処理された画像系列に対し、時間軸方向に一次元 -フィルタ処理を行うものであり以下のような入出力関係式で表される。

$$z_{k,i,j} = x_{k,i,j} + \sum_{n=-N}^{N} \sum_{m=-M}^{M} a_{n,m} F(x_{k,i-n,j-m} - x_{k,i,j})$$
 (5)

$$y_{k,i,j} = z_{k,i,j} + \sum_{l=-L}^{L} b_l F(z_{k-l,i,j} - z_{k,i,j})$$
 (6)

ここに、 $x_{k,i,j}$  は入力動画像の第k フレームの画素 (i,j) の画素値、 $z_{k,i,j}$  はそれに対する二次元 -フィルタの処理結果、 $y_{k,i,j}$  は最終的に得られる時空間 -フィルタの処理結果である。 $a_{n,m},b_l$  はそれぞれ総和が 1 になる低域通過フィルタ係数であり、F(x) は式(2)のような非線形関数である。

-フィルタと同様、時空間 -フィルタの入力出力信号の差 | XK、 j. j. jK、 j. j | は、 で定まるある微小な値以内に制限される。すなわち、本フィルタは時空間領域における急激な変化に影響されることなく三次元入力信号の平滑を行うので、動画像の各フレームをぼかすことなく、小振幅のランダム変化成分を除去することができる。

-フィルタは比較的演算量の少ないフィルタではあるが、画素数の多い画像や低速のプロセッサで実現する場合は、少しでも演算量を減らす必要がある。そこで考えられたのが動き補償動画像-フィルタである。

このフィルタは、動き補償予測符号化で圧縮された動画像の空間領域における処理に適用されるもので、I フレームを含む一定間隔のフレームは

式(5)なる二次元 -フィルタ処理を全画素に施すが、その間に存在する P 及び B フレームに対しては、予測誤差がある一定の閾値より大きな画素の周辺のみ式(5)なる二次元 -フィルタ処理を行い、それ以外の箇所は、動き補償予測画像の画素値をそのまま採用するものである。これと式(6)の時間軸方向 -フィルタを組み合わせたものが、時空間動き補償 -フィルタである。

## 4. 適応時空間動き補償 -フィルタの原理

圧縮歪の除去能力を強化すると画像の微細成分が平滑されすぎ、一方微細成分を維持すると、圧縮歪が十分除去されない。そこで、時空間 -フィルタでは 大 平滑力が大、 小 平滑力小となることを利用し、画像の局所的性質に応じての値を適応的に変化させて特性の向上を図る。

## 4.1 モスキート雑音の除去能力の強化

モスキート雑音が顕著な強い輪郭付近では を大きくすることにより、画像の細部を維持しながらモスキート雑音を十分除去することができる。 具体的には、16×16画素の範囲ごとに、上下左右の隣接画素同士の差分値がある閾値を越える個所を輪郭部と判別し、その個所に大きな値のを適用する。

## 4.2 画像の微細成分の維持

画像の非輪郭の個所で高周波数成分が比較的大きなブロックは画像の微細成分が含まれると見なされるので、 -フィルタの の値を小さくし、微細成分が平滑されすぎることを防ぐ。ここでは、8×8の DCT ブロックで、低周波数領域(図2の )の DCT 係数の総和を F1、高周波数領域(図2の )の DCT 係数の総和を F2 とし、 F2 > S かつ F1/F2 < T (S T: 関値)

F2>S かつ F1/F2<T (S、T:閾値) なら、 =0とする。

以上の適応化は空間領域及び時間軸方向の - フィルタ夫々に対して適用することが考えられる。

## 5. 計算機シミュレーション結果

二種類の動画像を圧縮-伸張した結果の一フレームを図3(a)、図4(a)(0.23bit/pixel)に示す。これを前回の時空間 -フィルタで処理した結果を同図(b)、今回の適応時空間 フィルタで処理した結果を同図(c)に示す。なお、空間 フィルタの窓サイズは7×7、非輪郭部で =20、輪郭部で=50、時間軸方向処理の窓サイズは5、=15、輪郭部で=50とし、4・2の制御は空間領域-フィルタのみに適用した。本提案方式により、輪郭部のモスキート雑音を十分除去しながら、髪の毛のような微細成分の劣化を抑制できることが

わかる。

#### 6. むすび

動画像の局所的性質を考慮した適応時空間 - フィルタを提案し、さらに画質の改善を行うことができることを示した。今後の課題としてはさらに効果的な制御法の構築、各閾値の画像依存性の検討などが挙げられる。

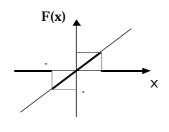


図1 非線形関数 F の例

図2 DCT ブロックの低 周波部分と高周波部分







(a)圧縮伸張後

(b)従来法

(c)提案法

図3 他の画像に対する輪郭処理結果





(a)圧縮伸張後

(b)従来法処理結果





(c)提案法処理結果

(d)原画像

図4 画像処理結果

#### 参考文献

[1]原島他:信学論(A)、 J-65-A、 4、 pp.297-304、 Apr.1982.

[2]荒川、相原:第17回ディジタル信号処理シンポジウム、D3-5、Nov.2002.

#### 連絡先:

荒川 薫 明治大学理工学部情報科学科 Tel 044-934-7445 Fax 044-934-7912 E-mail:arakawa@cs.meiji.ac.jp

## ウェーブレット変換による劣化画像の評価

## **Evaluation of Blurred Images by Wavelet Transform**

松田充夫

Nobuo MATSUDA 国立大島商船高専

Oshima National College of Maritime Technology

宮武 直樹 Naoki MIYATAKE

Hosei University

法政大学

櫛田 直規 Naoki KUSHIDA 国立大島商船高専

Oshima National College of Maritime Technology

佐藤 秀昭 Hideaki SATO 杏林大学

**Kyourin University** 

但馬文昭 Fumiaki TAJIMA 横浜国大

Yokohama National University

**Abstract:** Many studies have been conducted on image restoration as accurately as possible from a blurred and noisy image. From the amount of features in the image, the image restoration requires accurately evaluating the blurred amount and range. Therefore, this paper describes a new method for evaluating the blurred amount. The proposed method consists of several statistical quantities which are estimated with the coefficients decomposed into multi-class resolution levels by wavelet transform. The estimated quantities are those such as angular second moment, contrast and

Key Words: Blurred amount, Blurred image, Texture characteristics, Multiresolution analysis

## 1.はじめに

有限の開口径をもつカメラやCCDカメラで撮像した 画像には奥行きに関する情報がぼけとして表れる。この ぼけや焦点ずれにより劣化した画像から元画像に近い 画像を求める画像復元の研究が盛んに行われている。

画像復元の方法には、一枚の劣化画像から劣化関数 の逆関数によるウィナーフィルタや最大エントロピに よる復元手法、逆関数を必要としない遺伝的アルゴリズ ムによる復元手法などの画像復元する方法と特開平 3-80676 や特開 2001-298657 のように複数の画像から、 区分した領域の高周波成分を利用して元の画像を推定 し合成する合成して復元する場合とがある。また多重フ ォーカス距離画像から DFF 法や DFD 法により合焦判定 を行う方法がある。さらに劣化画像をウェーブレット変 換によって復元する研究もあるがまだデータ圧縮のよ うに共通する基本原理が確立されているとはいえない。

いずれの復元手法を選択するにしても、適切な特徴量 から劣化画像のぼけ量やぼけ範囲の正確な評価ができ なければ、精密な画像復元をするのは困難である。

そこで本論文では、劣化画像を複数の階層化解像度レ ベルに分解したウェーブレット展開係数のテクスチャ 特徴量から劣化画像のぼけ量の評価することを提案し、 その評価方法の有効性について検討した。

## 2. ウェーブレット変換

ウェーブレット変換とは、実数 $a,b \in \mathbf{R}$  に対すアナ ライジング(マザー)ウェーブレット $\psi$  と関数 f(t) と の積分をいう凹。

$$(W_{\psi}f)(b,a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbf{R}} f(t) \overline{\psi(\frac{t-b}{a})} dt \quad (\text{Eq.1})$$

ただしは複素共役を表す。

## 3. 劣化画像の評価方法

評価対象となる画像にウェーブレット変換による多 重解像度解析を施し、複数の階層化解像度レベルの成分 に分解する。次に分解した複数の階層化解像度レベルの 成分の同時共起行列から算出したテクスチャ特徴量か らぼけ量を評価する。代表的なテクスチャ特徴量として 角2次モーメント(エネルギー)、コントラスト(運動 量)、エントロピ、相関、分散など種々のテクスチャ特 徴量を選択することができる。一般的な画像の場合は角 2次モーメント、コントラスト、エントロピを選択すれ ばよい。

角2次モーメントは式2、コントラストは式3、エン トロピは式4から計算される。各々の特徴量は共起行列 の要素値の変化の乏しい度合い、局所的な変化が大きい 度合い、複雑さの測度を表している。

$$f_1 = \sum_{i} \sum_{j} M_d^2(i, j)$$
 (Eq.2)

$$f_2 = \sum_{i} \sum_{i} (i - j)^2 M_d(i, j)$$
 (Eq.3)

$$f_{1} = \sum_{i} \sum_{j} M_{d}^{2}(i, j)$$
(Eq.2)
$$f_{2} = \sum_{i} \sum_{j} (i - j)^{2} M_{d}(i, j)$$
(Eq.3)
$$f_{3} = \sum_{i} \sum_{j} M(i, j) \log M_{d}(i, j)$$
(Eq.4)

ここで $M_d(i,j)$ は同時生起行列の要素値を表す。

## 4.解析結果とまとめ

図 1 の上段の(a)から(d)のぼけ画像は標準画像 (MADRIL)をPhotoshop Ver.6.0 のガウス型ぼかし

のフィルタ処理により作成した。ぼけの程度は右にいくほど大きくなっている。中段の(e)から(g)はそれぞれ上段の(a)から(c)の画像の多重解像度のLL成分とその白線位置のテクスチャ特徴量をあらわしている。下段の(e)から(g)はそれぞれ上段の(a)から(c)の画像の多重解像度の HL 成分とその白線位置のテクスチャ特徴量をあらわしている。これらのテクスチャ特徴量は下の方からエントロピ、コントラスト、角2次モーメントになっている。図からわかるようにLL成分およびHL成分のいずれの場合もコントラスト特徴量がぼけ量に最も対応しているのがわかる。なお、多重解像度解析に用いた基底関数は N=2 の Daubechies の離散型ウェーブレットである<sup>[3]</sup>。

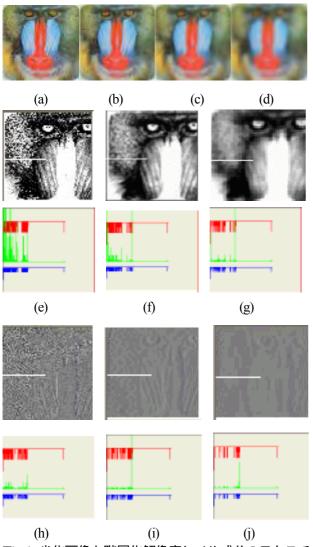
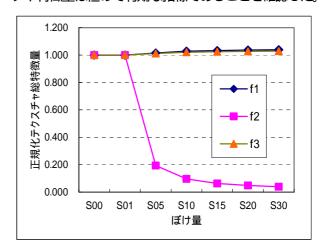


Fig.1 劣化画像と階層化解像度レベル成分のテクスチャ特徴量

Fig.2 は図1の(a)から(d)の階層化解像度レベルのウェーブレット展開係数から3つのテクスチャ特徴量 f<sub>1</sub>、f<sub>2</sub>、f<sub>3</sub>それぞれの合計を正規化し、ぼけ量の大きさに対してプロットしたものである。図から、ぼけ量が増加するにつれ角2次モーメントf<sub>1</sub>とエントロピf<sub>3</sub>は増

加し、一方、コントラスト f2 は合焦した位置から急速に減少することが読み取れる。また図 2 の下段は局所的な位置でのコントラスト値の分布を表しているが、局所的なぼけ量が大きな位置ではそこのコントラスト値も大きく、ぼけ量に相応している。なお紙面の関係上省略したが、ぼけ領域を一部に含んだ劣化画像を同様な方法で評価した場合、ぼけ領域を容易に区別することもできる。

以上の結果から、劣化画像のぼけ量の評価値として階層化解像度レベルのウェーブレット展開係数のテクスチャ特徴量は極めて有効な指標であることを確認した。



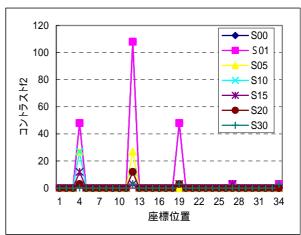


Fig.2 正規化したテクスチャ特徴量 f 2とぼけ量 **参考文献** 

[1]中野ら: ウェーブレットによる信号処理と画像処理, 共立出版, pp.15-159, 2000.

[2]高木ら:画像解析ハンドブック,東京大学出版,1992 [3] Daubechies: Comm. Pure and Appl. Math 41.pp. 909-996.1988.

## 連絡先

〒742-2193 山口県大島郡大島町小松 1091-1 大島商船高等専門学校 情報工学科 TEL/FAX 0820-74-5581 e-mail:matsuda@oshima-k.ac.jp

## PHD フィルタの逐次モンテカルロ実装を用いた動画像における特徴点追跡

## Tracking of feature points in dynamic image by sequential Monte Carlo implementation of PHD filter

内野 毅 生駒 哲一 前田 博
Tsuyoshi Uchino Norikazu Ikoma Hiroshi Maeda
九州工業大学 工学部

Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract: We represent motion of multiple feature points in dynamic image by state space model having structure and motion in its state, and we track the feature points by Sequential Monte Carlo (SMC) implementation of Probability Hypothesis Density (PHD) filter. Objects in dynamic image here may have occlusion and appearance in general, so the feature points may born and disappear in dynamic image. Furthermore they may observed with missing, false detection, and clutter. PHD filter represents multiple targets as finite random sets and can deal with birth, disappearance, missing, false detection, and clutter. SMC implementation of PHD filter is applied to estimate of the state. An advantage of the method is that dimension of the state does not increase when the number of feature points becomes large. So its computational costs is less than that of conventional particle filtering methods. Results of numerical simulation and real image experiment show performance of feature points tracking by proposed method.

Keywords: tracking, dynamic image, sequential Monte Carlo, PHD filter.

#### 1. はじめに

機械に人間と同じような視覚認知能力を持たせるというコンピュータビジョンの研究分野において,画像からシーンの三次元情報を復元することは重要な課題であり,様々な研究が行われている[1,2,3,4,6,7,9,10].

既存の研究の1つに,動画像からボトムアップに三次元情報を復元するものがある.これにはオプティカルフローを用いる方法[9]と,画像中の輝度値の変化などからコーナー,クロス等を抽出して得られる特徴点を用いる方法[1,2,3,4,6,7,10]とがある.後者の方法において,特徴点の抽出方法には,主として2通りが考えられる.

1つめは、フレーム間で特徴点の対応のついた「特徴点軌跡」を用いるものである・特徴点軌跡は、最初のフレームで特徴点を抽出し、引き続くフレームではその近傍における類似点を探索し得られる・得られた特徴点軌跡から 3 次元復元を行う方法としては、特異値分解を用いた運動分割[2,7]、物体の構造と動きを状態空間モデルにより表す方法[1,6,10]がある・この方法では、フレーム間での特徴点の対応が既知という利点があるものの、その対応づけは局所的な処理で行われるため必ずしも正しいとは限らない・また最初のフレームでの特徴点抽出においても必ずしもコーナーやクロスを抽出するとは限らず、欠損、誤検出を生じ得る・また、物体の出現や隠れに対処するのは必ずしも自明とは言えず、難しい・

2 つめは,毎フレームごとに特徴点を抽出しこれを観測とするものである.毎フレームごとに特徴点を抽出するため,隠れや出現にも対応しやすいという利点があるが,毎時刻の特徴抽出にて欠損と誤検出を独立に生じ得るという問題がある.また,フレーム間の特徴点の対応は未知であり,引き続くアルゴリズムにてこれを決定する必要がある.この状況では,ターゲット追跡の研究において,特徴点と観測との対応未知を考慮した非線形状態空間モデルにより,注目した特徴点に関して欠損,誤検出に適応した方法[3,4]が提案されている.

これら既存の方法は、(1)特徴点軌跡を用いた場合、隠れや出現への対処が困難である。(2)毎フレームごとに特徴点を抽出する場合も、欠損、誤検出を考慮した隠れや出現への対処は困難である。また、(3)複数特徴点追跡の状態推定に用いられる従来の粒子型フィルタは、仮に粒子数が一定であっても、計算量は特徴点数の増加と共に指数関数的に増えるという問題がある。

本研究では,複数の物体が独立に移動し,隠れや出現を含む シーンを想定し,欠損,誤検出を含む観測で得られた特徴点を 正しく追跡することを目的とする. 状態を特徴点位置の集合, 観測を画像中の特徴点座標の集合とし, 状態と観測をそれぞれ 有限ランダム集合(FRS)で表現した状態空間モデルを提案する. 提案モデルに基づき状態推定することで, 特徴点の追跡を行う ことができる.

状態推定には、PHD(確率仮説密度)フィルタ[5]の逐次モンテカル口実装[8]を用いる。PHD フィルタは、複数存在する特徴点の同時事後分布の代わりに、特徴点空間上の FRS で全特徴点を表し、そのPHD を用いる。PHD とは、連続型確率変数の場合の期待値に相当するもので、領域 Sで積分すると Sに含まれる特徴点数の期待値を得るものとして定義される。FRS による表記は、誕生、消滅、欠損、誤検出を含んだ複数特徴点の追跡に適している。また、特徴点数が増加しても状態の次元が上がらないという利点があり、従来の粒子型フィルタに比べ計算量を抑えることが可能である。PHD フィルタは解析的に解けない積分を伴うが、[8]で提案されている逐次モンテカルロ実装により、実用的な近似推定を行うことができる。

本文では,まず.2節でモデルを定義し,次に3節でPHDフィルタの逐次モンテカルロ実装による状態推定について述べる.4節では,数値シミュレーション及び実画像実験にて,提案法の特徴点追跡の性能を示す.5節でまとめと今後の課題を述べる.

## 2.モデル

対象とするシーンは , 複数物体が独立に動き , 隠れや出現を含むものとする .まず ,離散時刻  ${m k}$  での ${m j}$ 番目の特徴点の位置を

$$\mathbf{x}_{k,j} = [x_{k,j}, y_{k,j}] \tag{1}$$

と表記する . シーン中の特徴点数を M(k)とすると , 時刻 k での特徴点位置の集合は次で表される .

$$\mathbf{X}_{k} = \left\{ \mathbf{x}_{k,1}, \dots, \mathbf{x}_{k,M(k)} \right\} \subseteq E_{s}$$
 (2)

これが我々の推定したい「状態」である.次に,時刻 k で観測される画像中の特徴点座標を

$$\mathbf{z}_{k,j} = [X_{k,j}, Y_{k,j}]$$
 (3)

と表記する . N(k)個の特徴点が観測されたとすると , 時刻 k での観測の集合は次で表される .

$$\mathbf{Z}_{k} = \left\{ \mathbf{z}_{k,1}, \dots, \mathbf{z}_{k,N(k)} \right\} \subseteq E_{o} \tag{4}$$

隠れや出現を含む動画像中の特徴点は,誕生,消滅が起り得る.またそこから観測される特徴点の集合は欠損,誤検出を一般に含む.よって,複数特徴点の状態と観測が時間的に推移す

るとき、状態の特徴点数 M(k)、観測の特徴点数 M(k)は時間的に 変化し得る.この状況を, Es, Eの有限ランダム集合(FRS) により表す.まず状態遷移を,次のシステム方程式で表す.

$$\Xi_k = S_k(\mathbf{X}_{k-1}) \cup B_k(\mathbf{X}_{k-1}) \cup F_k \tag{5}$$

ここで $S_k(\mathbf{X}_{k1})$ は,時刻kに $\mathbf{X}_{k1}$ から引き続いて存在する特徴点 の FRS ,  $B_k(\mathbf{X}_{k:1})$ は  $\mathbf{X}_{k:1}$  から分岐した特徴点の FRS , そして  $F_k$ は時刻kで新たに誕生する特徴点のFRSを表す.次に観測の過 程は,観測方程式

$$\Sigma_k = E_k(\mathbf{X}_k) \cup C_k(\mathbf{X}_k) \tag{6}$$

で表される.ここで, $E_k(\mathbf{X}_k)$ は,特徴点集合 $\mathbf{X}_k$ から得られた観 測のFRS、Ck(Xk)は誤検出のFRSを表す上述した2つのFRS,

k , kは ,それぞれ条件付き確率密度  $f_{k|k}(\mathbf{X}_k|\mathbf{X}_{k})$   $g_{k}(\mathbf{Z}_k|\mathbf{X}_k)$ により,次で表される.

$$\Xi_k \sim f_{k|k-1} (\mathbf{X}_k | \mathbf{X}_{k-1}) , \qquad (7)$$

$$\Sigma_k \sim g_k(\mathbf{Z}_k|\mathbf{X}_k) \ . \tag{8}$$

## 3. 状態推定

## 3.1. PHD フィルタ

状態推定とは,観測系列  $\mathbf{Z}_{1:k}$ が与えられた下で状態  $\mathbf{X}_k$ を推定 する, すなわち条件付き分布  $p(\mathbf{X}_k|\mathbf{Z}_{1:k})$ を求めることである. PHD(確率仮説密度)フィルタでは, 状態推定を, 分布の特性値 の 1 つである期待値に基づいて行う.これは連続型確率変数の 場合には,カルマンフィルタの平均ベクトルのみを用いたもの

PHD は次で定義される.まず, x(y)を,中心がxのディラ ックデルタ関数とする. すなわち,

$$\int_{S} \delta_{\mathbf{x}}(\mathbf{y}) d\mathbf{y} = \begin{cases} 1 & \mathbf{x} \in S \\ 0 & \mathbf{x} \notin S \end{cases}$$
 (9)

である.次に有限集合 X の密度を

$$\delta_{\mathbf{X}}(\mathbf{y}) = \sum_{\mathbf{y} \in \mathbf{Y}} \delta_{\mathbf{x}}(\mathbf{y}) \tag{10}$$

と定義する.これを領域Sで積分すると,Sに含まれる $\mathbf X$ の点 の数を得る.

PHD は, FRS の密度の期待値として

$$D_{\Delta}(\mathbf{x}) = E[\delta_{\Delta}(\mathbf{x})] = \int \delta_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) P_{\Delta}(d\mathbf{X})$$
 (11)

と定義される . これを Sで積分すると , 領域 S内で  $\mathbf{x} \in \Delta$  を満 たす点xの個数の期待値を得る.

条件付き分布 $p(\mathbf{X}_k|\mathbf{Z}_{1:k})$ のPHD を , 観測が与えられるごとに 逐次更新する PHD フィルタが[5]で提案されている. アルゴリ ズムは,カルマンフィルタと同様,一期先予測とろ波からなる.

 $D_{k|k-1}(\mathbf{x}|\mathbf{Z}_{0:k-1}) = \gamma_k(\mathbf{x}) + \int \phi_{k|k-1}(\mathbf{x},\xi) D_{k-1|k-1}(\xi|\mathbf{Z}_{0:k-1}) \lambda(d\xi)$  (12) となり,各記号は次を意味する。

$$\phi_{k|k-1}(\mathbf{x},\xi) = e_{k|k-1}(\xi)f_{k|k-1}(\mathbf{x}|\xi) + b_{k|k-1}(\mathbf{x}|\xi)$$
(13)

 $e_{k|k^1}(\mathbf{X}_{k^1})$ : 時刻 kで  $\mathbf{X}_{k^1}$  から引き続いて特徴点が存在する確 率.

 $b_{k|k1}(\cdot|\mathbf{X}_{k1}):\mathbf{X}_{k1}$ から分岐した特徴点のランダム集合のPHD.  $k(\mathbf{x})$ : 新たに誕生するランダム集合の PHD.

ろ波は 
$$D_{k|k}(\mathbf{x}|\mathbf{Z}_{0k}) = \begin{bmatrix} \mathbf{v}(\mathbf{x}) + \sum_{\mathbf{z} \in \mathbf{Z}_k} \frac{\psi_{k,z}(\mathbf{x})}{\mu_k c_k(\mathbf{z}) + \left\langle \psi_{k,z}, D_{k|k-1}(\mathbf{x}|\mathbf{Z}_{0k-1}) \right\rangle} \end{bmatrix} D_{k|k-1}(\mathbf{x}|\mathbf{Z}_{0k-1}) \quad L_k \mathbf{\hat{c}} , \mathbf{\mathbf{2}} \mathbf{\hat{g}} \mathbf{\hat{g}}_{k|k} \mathbf{\hat{c}} \mathbf{\mathbf{1}} \mathbf{\mathbf{5}} \mathbf{\hat{g}}_{k|k} \mathbf{\hat{c}} \mathbf{\mathbf{1}} \mathbf{\mathbf{5}} \mathbf{\hat{c}} \mathbf{\hat{$$

となる.ここで,  $\langle \mathbf{a}(\mathbf{x}), \mathbf{b}(\mathbf{x}) \rangle$ は,  $\int a \cdot b dx$  を表す. 各記号は次

を意味する.

$$v(\mathbf{x}) = 1 - p_D(\mathbf{x}) \tag{15}$$

$$\psi_{k,z}(\mathbf{x}) = p_D(\mathbf{x})g_k(\mathbf{z}|\mathbf{x}) \tag{16}$$

pn(x):検出の確率.

gk(z|x):個々の特徴点の尤度.

ck (x): 誤検出の確率.

 $\mu_k(\mathbf{x})$ : 観測に含まれる誤検出点の平均個数.

#### 3.2 . PHD フィルタの逐次モンテカルロ実装

PHD フィルタは, ろ波に複数積分を含むため解析的に解くこ とは困難である. そこで, 数値的に解くことを可能にする粒子 型フィルタのテクニックを用いる方法が[8]で提案されている. そこでは PHD を , 多数の重み付き粒子  $\left\{ \mathbf{x}_{0:k}^{(i)}, \omega_{k}^{(i)} \right\}_{i=1}^{L}$  により 近似する . ここで ,  $\mathbf{x}_{0k}^{(i)}$  は特徴点の位置の粒子を表し ,  $\omega_k^{(i)}$  は 正規化重みで ,  $\omega_k^{(i)} \geq 0$  ,  $\sum_{i=1}^L \omega_k^{(i)} = 1$  を満たす . この粒子 と重みに対して, 予測, 更新, リサンプリングの3 ステップを 適用し,状態推定の逐次更新を行う.

予測ステップでは,まず,FRS,Sk(Xk1),Bk(Xk1)について粒 子を生成し,重みの計算を行う:

$$\widetilde{\mathbf{x}}_{k}^{(i)} \sim q_{k} \left( | \mathbf{x}_{k-1}^{(i)}, \mathbf{Z}_{k} \right), i = 1, \dots, L_{k-1}$$
 (17)

$$\omega_{k|k-1}^{(i)} = \frac{\phi_{k}\left(\widetilde{\mathbf{x}}_{k}^{(i)}, \mathbf{x}_{k-1}^{i}\right)}{q\left(\widetilde{\mathbf{x}}_{k}^{(i)} \middle| \mathbf{x}_{k-1}^{(i)}, \mathbf{Z}_{k}\right)} \omega_{k-1}^{(i)}, \ i = 1, \dots, L_{k-1}$$
 (18)

ここで, $q_k(|\mathbf{x}_{k-1}^{(i)}, \mathbf{Z}_k)$ は,「プロポーザル分布」と呼ばれ,選択に 自由度がある.次にFRS,  $F_k$ について,新たに粒子を生成し, 重みの計算を行う:

$$\widetilde{\mathbf{x}}_{k}^{(i)} \sim p_{k}(|\mathbf{Z}_{k})$$
,  $i = L_{k-1} + 1, \dots, L_{k-1} + J_{k}$  (19)

$$\widetilde{\omega}_{k|k-1}^{(i)} = \frac{\gamma_k(\widetilde{\mathbf{x}}_k^{(i)})}{J_k p_k(\widetilde{\mathbf{x}}_k^{(i)} | \mathbf{Z}_k)}, \quad i = L_{k-1} + 1, \dots, L_{k-1} + J_k$$
 (20)

ここで, $p_k(\cdot|\mathbf{Z}_k)$ は $q_k(\cdot|\mathbf{z}_{k-1}^{(i)},\mathbf{Z}_k)$ とは異なるプロポーザル分布で あり、時刻 k で誕生する特徴点の粒子を生成する、 $J_k$ は時刻 kで新しく生じる特徴点数に対応する .1 特徴点あたりの粒子数を とすると, $J_k$ =  $\times$ (の質量)となる.

更新ステップでは,重みの更新を次式で行う.

$$\widetilde{\omega}_{k}^{(i)} = \left[ v \left( \widetilde{\mathbf{x}}_{k}^{(i)} + \sum_{\mathbf{z} \in \mathbf{Z}_{k}} \frac{\psi_{k,\mathbf{z}} \left( \widetilde{\mathbf{x}}_{k}^{(i)} \right)}{\kappa_{k} \left( \mathbf{z} \right) + C_{k} \left( \mathbf{z} \right)} \right] \widetilde{\omega}_{k|k-1}^{(i)}$$
(21)

ここで $C_k(\mathbf{z}_k)$ は, $\mathbf{z}_k \in \mathbf{Z}_k$  それぞれについて,次の通り計算

$$C_{k}\left(\mathbf{z}_{k}\right) = \sum_{j=1}^{L_{k-1}+J_{k}} \psi_{k,\mathbf{z}_{k}}\left(\widetilde{\mathbf{x}}_{k}^{(j)}\right) \widetilde{\omega}_{k|k-1}^{(j)}$$
(22)

粒子の数  $L_k$ は ,特徴点数が増えない場合も  $L_k=L_{k+1}+J_k$ のよう に増加するが、これは非効率的である。また $L_k$ を固定した場合、 特徴点数の変化と共に 1 特徴点あたりの粒子数も変化し,推定 が不安定となる. リサンプリングステップでは, まず, 特徴点 数の推定値である全質量 $\hat{N}_{k|k}$ を計算する.

$$\widehat{N}_{k|k} = \sum_{j=1}^{L_{k-1} + J_k} \widetilde{\omega}_k^{(j)}$$
 (23)

$$L_k \cong \rho \hat{N}_{k|k} \tag{24}$$

とすることにより,計算の効率を上げる.

最後に, $\left(\widetilde{\mathbf{x}}_k^{(i)},\widetilde{\omega}_k^{(i)}\middle/\widehat{N}_{k|k}\right)_{i=1}^{L_{k-1}+J_k}$  よりリサンプリングを行う.

$$\mathbf{x}_{k}^{(i)} = \begin{cases} \widetilde{\mathbf{x}}_{k}^{(1)} & \text{確率} & \widetilde{\omega}_{k}^{1}/\widehat{\mathbf{N}}_{k|k} \\ \vdots & \\ \widetilde{\mathbf{x}}_{k}^{(L_{k-1}+J_{k})} & \text{確率} & \widetilde{\omega}_{k}^{(L_{k-1}+J_{k})}/\widehat{\mathbf{N}}_{k|k} \end{cases}$$
(25)

 $\omega_k^{(i)}$ は i によらず一定の値を ,  $\sum_{j=1}^{L_{k-1}+J_k}\omega_k^{(j)}=\hat{N}_{k|k}$  を満たすようにセットする .

## 4.実験

数値シミュレーション及び実画像実験にて,提案法の 特徴点追跡の性能を示す.

## 4.1.数値シミュレーション

複数物体が独立に移動し,隠れや出現を含むシーンを想定する.観測過程では,欠損,誤検出があるものとする.この状況では,特徴点は誕生,消滅し,欠損,誤検出を含んで観測される.この状況の 2 次元シミュレーションデータを,次の条件で生成した.初期特徴点数は 2 とし,誕生,消滅はそれぞれ強度 0.5 のポアソン分布に従い生じるものとする.観測条件としては,欠損は強度 0.5 ,誤検出は強度 2.0 のポアソン分布に従い起こるものとし,各特徴点に独立に正規分布 N(0,1)に従う観測ノイズを加えた.シミュレーションデータを図 1 に,このうち×成分の時間変化を図 2 に示す.

推定の条件を示す 1 特徴点あたりの粒子数 を 500 とした . 新たに誕生するランダム集合の PHD  $_{k}$ を一定値 0.9 ,時刻  $_{k}$ で  $\mathbf{X}_{k1}$  から引き続いて存在する特徴点  $e_{k|k1}$ を一定値 0.9  $\mathbf{X}_{k1}$  から分岐した特徴点のランダム集合の PHD  $b_{k|k1}$ を一定値 0.0 誤検出の確率  $c_{k}$  を 0.4 ,観測に含まれる誤検出点の平均個数  $_{k}$  を 1.0 ,検出の確率  $p_{D}$  を 0.9 とした .

推定の結果得られた, x成分の位置についての粒子の分布を図3に, x成分の位置についてのPHDを図4に示す.

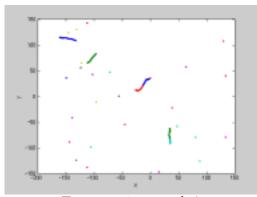


図1. シミュレーションデータ

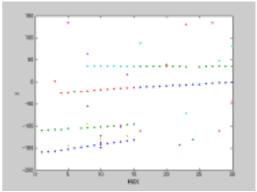


図2.シミュレーションデータ(x 成分)の時間変化

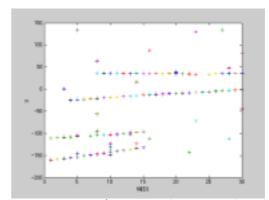


図3.シミュレーションデータの位置(x 成分)についての粒子の分布

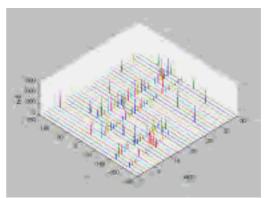


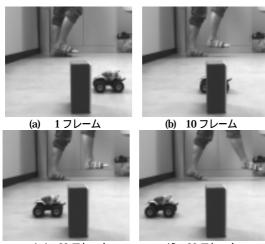
図4.シミュレーションデータの位置(x 成分)についての PHD

## 4.2. 実画像実験

人と模型車が異なる方向に動くシーンを , フレーム間隔約 0.1 秒で , 30 フレーム撮影した . 各フレームにて , 独立に特徴抽出の処理を行った . その結果 , 14 個  $\sim$  22 個の特徴点を観測として得た . 動画像の 1,10,20,30 フレーム目の画像を図 5 に示す . 動画像から得られた特徴点データのプロットを図 6 に ,このうち x 成分の時間変化を図 7 に示す .

推定の条件としては 1 特徴点あたりの粒子数 を 300 とし , 観測に含まれる誤検出点の平均個数  $_{\it k}$  を 1.1 とした以外は ,数値シミュレーションと同じとした .

推定の結果として,図 8 に x 成分の位置の粒子の分布を,図 9 に x 成分の位置の PHD を示す.



(c) 20 フレーム (d) 30 フレーム 図5.実験に使用した動画像

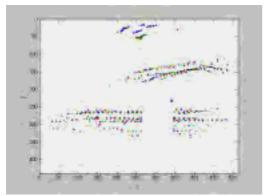


図6.動画像から得られた特徴点データ

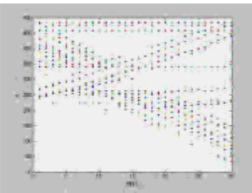


図7.特徴点データ(x 成分)の時間変化

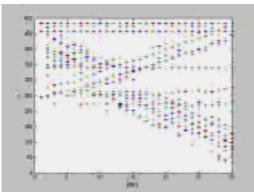


図8.特徴点データの位置(x成分)についての粒子の分布

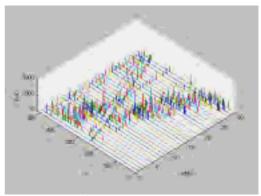


図9.特徴点データの位置(x 成分)についての PHD

### 5.おわりに

複数物体が独立に動き,隠れや出現を含むシーンを想定し, 特徴点は欠損,誤検出を含んで観測されるものとする.この状 況における状態と観測を有限ランダム集合で表現した状態空間 モデルを提案し,PHDフィルタの逐次モンテカルロ実装を用い て状態推定し,特徴点の追跡を行った.数値シミュレーション と実画像実験により,提案法の性能を調べた.

今後の課題として,[8]の方法は欠損を扱っていないため,欠損を考慮した方法の開発が挙げられる.また,3次元空間中の物体の動きの復元と追跡が挙げられる.これには,カメラの射影を考慮したモデルの構築が必要である.さらに,ステレオ画像等にも対応できるよう複数のカメラを用いることも検討したい.

謝辞 本研究は統計数理研究所共同利用研究(15-共研-2017)による.

## 参考文献

[1] A.Chiuso, P.Favaro, H.Jin, and S.Soatto, "Structure from Motion Causally Integrated Over time", *IEEE trans. on pattern analysis and machine intelligence*, vol.24, no.4, pp.523-535 (2002)

[2] J.Costeira, T.Kanade, "A Multi-body Factorization Method for Motion Analysis", Tech. Rep. CMU-CS-TR-94-220, Carnegie Mellon Univ. (1994)

[3] N.Ikoma and S.Godsill "Extended object tracking with unknown association, missing observations, and clutter using particle filters, *Proc. of the 2003 IEEE Workshop on Statistical Signal Processing*, pp.485-488 (2003)

[4] W.Ito, N.Ikoma, and H.Maeda, "On association problem for sensor fusion in dynamic situation using particle filters", Proc of -*The 30*th Anniversary of the Information Criterion (AIC)- Science of Modeling, pp.414-415 (2003)

[5] R.Mahler, "A theoretical foundation for the Stein-Winter Probability Hypothesis Density (PHD) multitarget tracking approach", Proc. 2002 MSS Nat. Symp. On Sensor and Data Fusion, vol. 1 (2002)

[6] Y.Miyahara, T.Uchino, N.Ikoma, and H.Maeda, "Structure from motion for multiple objects by Rao-Blackwellized particle filters", Proc of -the 30<sup>th</sup> Anniversary of the Information Criterion (AIC)- Science of Modeling, pp.376-377 (2003)

[7] C.Tomasi and T.Kanade, "Shape and motion from image streams under orthography: A factorization method", *International Journal of Computer Vision*, 9(2): 137-154 (1992)

[8] Ba-Ngu Vo - Sumeetpal Singh and A. Doucet, "Sequential Monte Carlo Implementation of the PHD Filter for Multitarget Tracking", Tech. Rep. CUED/F-INFENG/TR 451, Cambridge Univ. (2003)

[9] 出口光一郎,「ロボットビジョンの基礎」, コロナ社, 第5章, pp.56-78 (2000)

[10] 宮原、内野、生駒、前田、「複数剛体を含む動画像におけるラオ-ブラックウェル化粒子型フィルタを用いた特徴点追跡と物体識別」、第 19回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 pp.383-386 (2003)

**連絡先** 〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1

九州工業大学工学部 生駒 哲一 E-mail:ikoma@comp.kyutech.ac.jp

## 自己組織化マップに基づくテンプレートマッチングによる障害物認識

Obstacle recognition by template matching using the SOM(Self Organizing Map)

菅野 祥伸中島 直樹宮野 智之大木 誠大北 正昭Yoshinobu SuganoNaoki NakashimaTomoyuki MiyanoMakoto OhkiMasaaki Ohkita

## 鳥取大学

Tottori University

**Abstract** - This paper proposes a method of obstacle recognition using a SOM-based template matching approach. In this method, the SOM is used to train several images taken from the working environment of the robot and the resulting image database is called the template image set. The query image taken from the environment is compared with the template images using a simple matching algorithm in order to select the template image associated with it. In learning the query image by the SOM, various template images can be produced easily and various changes of the obstacle situation can be treated reasonably. As a result, by carrying out the template matching, we can determine the presence and the location of an obstacle. Our approach is proved by a number of experimentations in an indoor environment setting.

## 1. はじめに

現在、病院や福祉施設では介護者の人手不足が問題になっている。そこで、我々は、介護者の負担を軽減し、身障者や高齢者の移動・散策補助のために、安全性を重視し環境マップを搭載した屋内用の車椅子型自律移動ロボットの民AM-3の開発を行っている。この自律移動ロボットの走行では、障害物認識・回避の機能が重要である。移動ロボットを目的地に安全に到達させるには、障害物認識の精度の向上が望まれる。

障害物検知システムには、通常、超音波センサーや 赤外線センサ、レーザなどの距離測定の可能なセンサ が使用されるがその適応において一長一短がある。そ のため上記の目的達成のためにカメラを用いた視覚 的な障害物認識手法が提案されている.

また、ロボットに自己組織化マップ(SOM)を利用した手法として、実際の環境中で視覚的な情報を用いてロボットの行動の学習を行なう手法[1]や、SOM により視覚情報によりロボットの状態を分類するなどの手法[2]が提案されている。我々もこれまで SOM を用いて障害物のテンプレートを作成し、マッチングにより障害物認識を行なう手法を提案してきた[3].

本稿では、これまでの手法に距離情報などを加え障害物テンプレートとして生成し、その障害物テンプレート情報をデータベースとする障害物認識手法を提案する。 SOM によりあらかじめ学習を行ない障害物テンプレート情報を生成するため、本手法では自律移動ロボットが走行中に取得した画像と障害物テンプレート情報をマッチングするだけで障害物の距離情報などが取得できるという特徴がある。また、SOM を用いることにより種々の障害物テンプレートが作成でき、障害物の多様な変化に対応できる。

## 2. 障害物認識

本手法の流れを図1に示す.まず,カメラより取得した画像から消失点を検出し,消失点の位置より画像中の障害物存在領域を設定し領域抽出画像を決定する.次に,領域抽出画像をソーベルフィルタ,二値化によりエッジを検出,このエッジの検出パターンによりエッジ判断を行う.エッジ判断は,どのようなエッジ検出パターンか判断することでマッチングする障害物テンプレートを限定し,そのテンプレート画像と領域抽出画像をテンプレートマッチングにより選択されたテンプレートの持つ障害物の位置・幅情報を取得する.最後に,取得した障害物情報を搭載されている環境マップに書き込む.

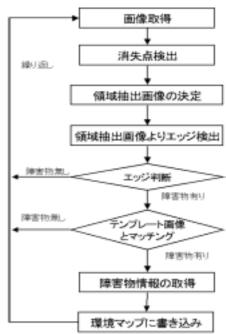


図1 本手法の流れ

## 2.1 障害物の存在領域

カメラにより撮影された画像は壁,天井,窓等の情報も含まれているため,認識目標となる障害物だけを分離することは難しい.したがって,障害物の存在する領域として図2に示す四角形の領域に限定し用いた.この障害物の存在領域内の画像を抽出した領域抽出画像をテンプレート画像生成のための学習用の入力画像.マッチング用の領域抽出画像として用いた.



図2 障害物のテンプレート領域

## 2.2 環境マップ上での障害物領域

本手法を適応する DREAM-3 には環境マップが搭載されている.環境マップは,環境情報を書き込み,地図の形状に合わせて行動パターンを切り替えることのできる地図情報である.図2に示す障害物の存在領域が,環境マップ上ではどのような範囲であるかを図3に示した.この時カメラの位置を自己位置と考え水平方向と前方方向より障害物までの距離を表す.図3における環境マップ上の台形形状で囲まれた領域を障害物領域とした.この領域は障害物の存在領域のサイズと対応しておりこのサイズの大きさにより障害物領域の範囲も変化する.また,領域抽出画像とテンプレート画像が同サイズであるためテンプレート画像のサイズも領域抽出画像のサイズと同様の障害物領域の範囲を示す.

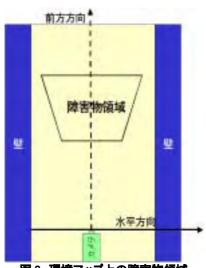


図3 環境マップ上の障害物領域

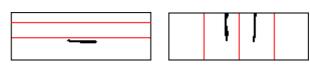
## 2.3 消失点検出

消失点は三次元空間内で奥行き方向に伸びる平行線が一点に収束した点で,本論文ではグレイスケール画像をソーベル・フィルタ,二値化,細線化,八フ変換により画像中において壁と床のエッジ部分である左右一本ずつの直線を検出した.その直線を延長して交わった点を消失点とした.この X 軸の消失点位置を中心として領域抽出画像の範囲を決定した.

## 2.4 障害物情報

本手法で用いた障害物情報はマッチングを行なう時の領域抽出画像とテンプレート画像の画像情報,障害物の大きさや位置の目安となるエッジ情報,障害物の前方,水平方向位置・幅情報を使用した.SOM の学習用入力ベクトルと参照ベクトルは同次元であるので学習用の入力情報と障害物テンプレート情報は同次元の情報を持つ.

障害物テンプレート情報はテンプレート画像,エッジ情報,障害物の位置・幅情報を,比較する入力情報は領域抽出画像とエッジ情報を持つ. 障害物の前方,水平方向位置,幅情報は,実際に配置した障害物の情報を用いた.画像情報は,消失点検出により障害物の存在領域を決定し,その領域内の画像を用いる.エッジ情報は画像処理により水平エッジ,垂直エッジを検出し,そのエッジの位置を領域に応じて分類したもので,領域はそれぞれ分類番号で表す.例として図 4 に画像サイズ 140×50(pixel)の場合を示し,分類の基準となる位置に線を引き,各領域に分類した.この領域ごとの分類例を表 1,表 2 にエッジ情報として示した.



(a)水平エッジ

(b)垂直エッジ

図4 エッジ情報例

表1 水平エッジの分類番号表

24 : 31 I - 22 : 32 I - 22 : 32 I						
分類番号	水平エッジ位置	障害物領域中の 前方位置範囲				
0	なし	障害物なし				
1	0(pixel) ~ 25(pixel)	2.6m 以下				
2	25(pixel) ~ 40(pixel)	2.6m ~ 3.3m				
3	40(pixel) ~ 50(pixel)	3.3m 以上				

表 2 垂直エッジの分類番号表

夜~ 亜直エッンの万瀬田与衣							
分類番号	垂直エッジ位置	障害物領域中					
刀积笛写	単国エック位員	の水平位置範囲					
0	なし	障害物なし					
1	31(pixel) ~ 107(pixel)	±30cm 以内					
2	69(pixel)の左右	±0cm の左右					
3	69(pixel)より左	± 0cm より左					
4	31(pixel)より左	-30cm より左					
5	69(pixel)より右	± 0cm より右					
6	107(pixel)より右	+30cm より右					

## 2.5 SOM による障害物テンプレート情報の生成

SOM アルゴリズム[4]はコホネンが生物の神経細胞, 主として脳の情報処理のしかたを以下のような簡単な式にまとめたもので,入力データの類似度に応じて,類似する入力データをネットワーク上に配置する,といった特徴がある.今回はマップ層を 2 次元配列でなく 1 次元配列により SOM の学習を行ない,マップ層における各ノードを障害物テンプレート情報として生成した.その一次元配列における SOM の 2 層ネットワーク構造を図 5 に示す.

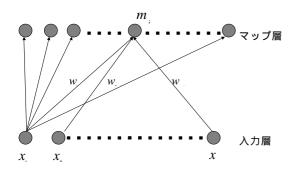


図 5 SOM のネットワーク構造

一次元配列による SOM アルゴリズムを以下に示す.

STEP1:ネットワークの初期化

マップ層における各ノードの初期値を乱数を用いて設定する.

STEP2:入力ベクトルの入力

入力層に入力ベクトルとして学習用の入力障害物情報  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i\}$  を入力する.

STEP3:ユークリッド距離の計算

マップ層における各Jードの参照ベクトルと入力ベクトルとのユークリッド距離を計算する。マップ層のj番目のJードと入力ベクトルとの距離は次式で与えられる.

$$d_{ij} = \left\| x_i - m_{ij} \right\| \tag{1}$$

ここで $m_i$ はマップ層の参照ベクトルである.

STEP4: 勝者ノードの決定

 $d_{ij}$ が最小となる、つまり入力ベクトルと参照ベクトルのユークリッド距離が最小になるノードを選択する。このノードを勝者ノードという、勝者ノードを中心に近傍領域を設定し、その領域内のノードを近傍ノードとする、STEP5:学習

──勝者ノードを中心に近傍ノードを次式によって学習 させる

$$m_i(t+1) = m_i + h_{ic}(t)[x(t) - m_i(t)]$$
 (2) このときを  $h_{ic}(t)$  は学習係数で、以下の式を用いて減少させた.

$$h(t) = h_0 \left( 1 - \frac{t}{T} \right) \tag{3}$$

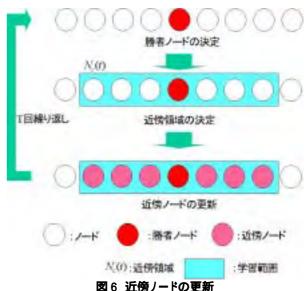
この時の t は現在の学習回数,T は行なうべき学習の全学習回数を示す.また,学習をおこなう際に勝者/ー

ドと近傍ノードを学習させるが、その近傍範囲は学習初期では広く取り、学習が進むにつれ範囲をせまくする.図6に近傍ノードの更新の様子について示す.

そのときの式を次式に示す.

$$N_c = N_0 \left( 1 - \frac{t}{T} \right) \tag{4}$$

ここでは $N_0$ 初期値である.



STEP6: 処理の繰り返し

終了条件を満たすまで STEP2~STEP5 を繰り返す. 以上の処理より,あらかじめ前処理した学習用の入力 障害物情報に類似する障害物テンプレートが生成で きる.

## 2.6 テンプレートマッチング

エッジ情報をもとにエッジ分類番号が同じテンプレートとマッチングを行なうことで、テンプレート数を限定し、テンプレート画像と領域抽出画像をマッチングする。 領域抽出画像  $p_i$  と、SOM の学習によって生成された障害物のテンプレート画像  $m_{ij}$  をそれぞれ式(5)により比較し、dが最小になる障害物のテンプレート画像を選ぶ。

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (p_i - m_{ij})^2}$$
 (5)

選ばれたテンプレート画像の持つ障害物の位置情報から通路上における障害物の位置・幅情報を取得する.

## 2.7 環境マップへの書き込み

DREAM-3 は各種センサにより環境マップ上での自己位置座標(X,Y),姿勢角 は決定されている。そのため本手法により得られた障害物情報は,自己位置を中心として障害物までの前方方向距離 V[cm],水平方向距離 H[cm],幅 W[cm]を環境マップに書き込む.

## 3. 実験

本手法の有効性を検討するために鳥取大学工学 部演算制御工学研究室の前の通路でダンボール箱, 人を障害物として認識実験を行なった.

テンプレートの生成のための学習用入力情報として障害物画像を計 146 枚用いて SOM の学習を行った. 画像サイズ 360×280[pixel]における画像中のテンプレートサイズを 140×50[pixel]とした.この場合,実環境での障害物領域は,前方方向 2.5m~4.0m,水平方向±60cm の範囲となる.学習条件は,初期学習係数 0.3,学習回数 500 回,ノード数を 500 で学習し,障害物テンプレート情報を生成した.

実験ではカメラ前方に障害物を配置し撮影した領域抽出画像 100 枚から,障害物の有無を判断する認識率,前方方向距離,水平方向距離,障害物幅について誤差を算出し,その平均誤差と平均処理時間[sec]を算出した.

また,実験のマッチング手法として,手法 1:垂直,水平エッジ情報によるテンプレート限定後マッチング,手法 2:水平エッジ情報によるテンプレート限定後マッチング,手法 3:テンプレートマッチングのみ,として行なった.障害物幅の平均誤差についてのみ,テンプレート画像に障害物の幅が分かるように撮影されたほぼ正面の場合のみの誤差を表示した.実験結果を表3に示し,図7に環境マップに障害物情報を書き込んだ例を示した.図7の障害物は前方方向距離 300[cm],水平方向距離 10[cm]の位置に配置した幅 36[cm]の障害物である.この場合,本手法により得られた障害物情報は,障害物の前方方向距離 293.67[cm],水平方向距離 11.33[cm],幅 25[cm]であった.

表3 障害物検知の検討結果

	1-71 1-1h -1-	平	平均処			
手法	認識率 [%]	前方 方向	水平 方向	幅 情報	理時間 [sec]	
手法 1	89	9.25	4.87	3.26	0.054	
手法 2	89	9.26	4.99	3.38	0.077	
手法 3	83	9.73	4.49	4.13	0.182	

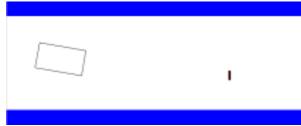


図7 環境マップへの書き込み例

次に,配置した障害物の各位置での認識率,平均誤差を表4,表5に示した.表4は水平方向の各位置,表5は前方方向の各位置とする.今回は主に障害物を前方方向250[cm]~320[cm]の範囲に配置した.この時,カメラ近くでは高い認識率をもち確実に認識できるが,カメラから離れた350[cm]付近に障害物を配置した場

合には、領域抽出画像に写る障害物の特徴部分が少ないため、障害物が無いと判断する場合があり認識率が低く、誤差に安定性がなくばらつきが目立った.

表4水平方向の各距離における誤差

K 1311 / J   O   DEFEICO   O   DEFE							
水平方向	認識率[%]	平均語	吴差[cm]				
距離[cm]	ni心nBX2平[/0]	前方方向	水平方向				
0	90.9	5.57	3.02				
20	81.8	11.87	5.89				
30	90.9	8.73	2.55				
40	100	8.13	3.27				
-10	100	11.14	3.15				
-30	72.7	7.31	7.54				
-40	90.9	12.69	9.37				

表 5 垂直方向の各距離における誤差

垂直方向	認識率[%]	平均語	吴差[cm]			
距離[cm]	100 000 44 [ // ]	前方方向	水平方向			
2.5	100.00	13.27	5.81			
2.6	100.00	5.29	4.45			
2.7	100.00	7.66	4.54			
2.8	100.00	11.66	3.84			
2.9	100.00	11.26	4.42			
3	100.00	8.26	5.24			
3.1	100.00	6.96	5.83			
3.2	97.14	12.88	6.65			
3.3	80.00	17.56	11.15			
3.4	42.86	5.77	8.01			
3.5	22.86	4.75	3.90			

## 4. おわりに

本論文では障害物認識の手法として、SOM を用い障害物のテンプレートを生成、マッチングにより障害物認識を行なう手法を提案し実験を行なった、生成するテンプレート情報に画像だけでなくエッジ情報を含むことでマッチングを行なうテンプレートを限定でき障害物の位置、幅情報が求められ、また、処理時間の短縮につながった。

### [参考文献]

[1] 川端邦明,石川達也,藤井輝夫,浅間一,遠藤勲: "見え様を用いた移動ロボットの行動獲得",電気学会誌 C, Vol.121-C, No.4, pp.762--768(2001). [2] 山田誠二,室田盛道: "自己組織化マップを用いた移動ロボットによる行為系列からの環境認識",日本ロボット学会誌, Vol.17, No.6, pp.101--110(1999).

[3] 菅野祥伸,G.N.Nyakoe,大木誠,大北正昭: "パターンマッチングによる障害物の検知~SOM による障害物画像の生成~",第 18 回ファジィシステムシンポジウム公園論文集,3-029,pp.345-348

[4] 徳高平蔵 岸田悟 藤村喜久郎:自己組織化マップの応用,海文堂(1999)

#### 連絡先

〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4 丁目 101 番地鳥取大学工学部電気電子工学科 大北正昭

TEL: 0857-31-5699 FAX: 0857-31-0880

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

## エッジ情報とオプティカルフローを組み合わせた移動物体の検出

Detection of moving objects based on optical flow and edge information

## 川本一彦,廣田薫

Kazuhiko Kawamoto and Kaoru Hirota

## 東京工業大学

Tokyo Institute of Technology

Abstract: A method for detecting moving objects in dynamic scenes is proposed, based on motion and edge information in images. This method consists of simple image processings, which do not include geometric computation such as depth estimation and 3-D reconstruction, thus being simple and suitable for real-time processing. Furthermore, the combination of edge and motion information leads to robustness against environmental changes. An experiment with a real image sequence, in which a moving toy car appears, is conducted to evaluate the performance of the method. The experimental result shows that the method successfully detects the moving object with 1.7 msec per frame.

## 1 はじめに

対象物体だけでなくカメラ自身も動き回る動的環境での動画像からの物体検出は、高度な視覚情報処理のための初期処理として重要である.カメラが静止した環境では、背景差分法が有効であるが動的環境には直接には適用できない.オプティカルフローからの領域分割 [1] や因子分解法による物体分離 [2] は、厳密な幾何計算に基づくが、三次元復元や剛体運動の判定は、一般に時間がかかり、特別なハードウェアなしでは実時間処理に向いていない.そこで、これらの幾何計算を行わない簡便で高速な手法として、動きに基づくテンプレート照合法 [3] が提案されている.

この動きに基づく手法 [3] に,照明変化に比較的頑健なエッジ情報を組み合わせて,環境変化に対して頑健な物体検出法を提案する.エッジ情報として用いる濃度勾配の大きさは,単純な差分処理で求まるため,実時間性を失うほど全体の処理時間を大きくしない.さらに,オプティカルフローおよびエッジは,画像上の局所的演算で算出でき,それぞれ独立であるため,これらの並列化により,処理時間の増大を抑えた高速化も可能である.移動物体シーン動画像に対する実験では,オプティカルフロー計算を除いた平均処理時間で,毎フレーム 1.7 ミリ秒で,動きに基づく手法 [3] よりも,詳細に物体の形状が抽出できることを示している.

## 2 エッジ情報と動き情報の重ね合わせによる 移動物体の検出

## 2.1 オプティカルフローに基づく領域分割

オプティカルフローに基づく動画像の領域分割法 [3]では,あらかじめ撮影した地面シーン動画像に対するオプティカルフローの時系列データ  $oldsymbol{u}_i^{(g)}(t) \in oldsymbol{R}^2, \ t=$ 

 $1, \ldots, T$ , の標本共分散行列

$$\boldsymbol{V}_{i} = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^{T} (\boldsymbol{u}_{i}^{(g)}(t) - \overline{\boldsymbol{u}}_{i}^{(g)}) (\boldsymbol{u}_{i}^{(g)}(t) - \overline{\boldsymbol{u}}_{i}^{(g)})^{\top},$$
where 
$$\overline{\boldsymbol{u}}_{i}^{(g)} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n} \boldsymbol{u}_{i}^{(g)}(t), \tag{1}$$

の逆行列を計量とするマハラノビス距離に基づいて,観測オプティカルフロー  $u_i,\ i=1,\dots,N,$  の「地面らしさ」を表わす確信度

$$C_i = e^{-(\boldsymbol{u}_i - \overline{\boldsymbol{u}}_i^{(g)})^{\top} \boldsymbol{V}_i^{-1} (\boldsymbol{u}_i - \overline{\boldsymbol{u}}_i^{(g)})} \in [0, 1], \tag{2}$$

を導入し,動画像を地面とその他の領域 (障害物領域) に分割する.ただし,地面」とは,撮像系が移動する平面であり,確信度  $C_i$  が 1 に近いほど,対応する画素は地面と見なされる.

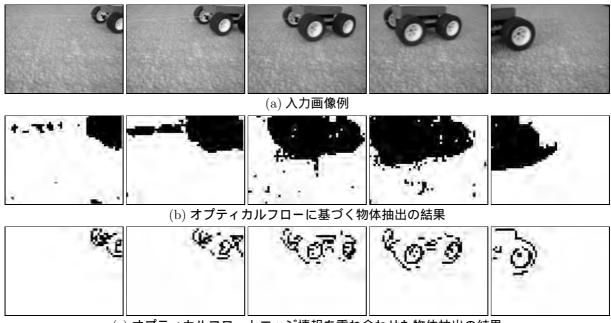
2.2 エッジ情報の重ね合わせによる移動物体の抽出 オプティカルフローに基づく確信度  $C_i$  に,入力画像 のエッジ情報を重ね合わせ移動物体の境界を抽出する 手法を提案する.エッジ情報として,最大値が 1 になるように正規化した,入力画素  $x_i$  の濃度勾配の大きさ

$$E_i = c \|\Delta \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_i)\| \in [0, 1], \tag{3}$$

を導入する.ただし,c は画像の濃度階調から決まる正規化のための定数であり, $\Delta f(x)$  は Sobel 作用素による x での濃度勾配である.この  $E_i$  は,物体境界の候補である濃度値の変化が大きい画素ほど 1 に近くなる.これら二つの評価値  $C_i$  と  $E_i$  に対して,与えられた画素  $x_i$   $i=1,\ldots,N$ , が,

$$(C_i < T_C) \cap (E_i > T_E) \tag{4}$$

を満足すれば,画素  $x_i$  を物体領域と見なす.ただし, $T_C,T_E\in {m R}$  は,それぞれ, $C_i$  と  $E_i$  に対する閾値である.



(c) オプティカルフローとエッジ情報を重ね合わせた物体抽出の結果

図1 移動物体シーンに対する実験結果

## 3 移動物体シーン動画像に対する実験

地面に対して移動している車の模型が現れるシーン (図 1(a)) について実験を行った.ここでは,市販のディ ジタルカメラで撮影した,160×120画素,150フレーム からなる動画像を利用している . 図 1(b) にオプティカル フローに基づく手法の結果,および図1(c)に提案手法の 結果を示す.これらの図の黒画素は, $T_C = \exp(-4.0)$ および  $T_E=0.1$  と設定したときに , 物体として抽出さ れた領域である.エッジ情報を重ね合わせることによ り、オプティカルフローを単独に用いた手法に比べて、 より詳細に物体の形状が抽出できていることが確認で きる.図1(c)の結果に,直線や円を当てはめることに より,オブジェクト単位の動画像処理に向いたコンパク トな物体記述が可能になる. Pentium 4 (2.0GHz) 搭 載コンピュータで,3画素間隔に行った処理の時間は, オプティカルフロー計算を除いて,総フレームの平均 で毎フレーム 1.7 ミリ秒である.

#### 4 まとめ

オプティカルフローとエッジ情報を組み合わせた動画像からの物体検出法を提案している.提案手法は,3次元復元や剛体運動の判定は行わず,動きに基づくテンプレート照合とエッジ情報による照合結果の補正により,環境変化に対して頑健かつ高速な物体検出を実現している.カメラ自身と対象物体が移動している動的環境の動画像に対して,オプティカルフロー計算を除いた平均処理時間で1.7ミリ秒/フレームで,動きに基づく手法[3]よりも,詳細に物体の形状が抽出できる

ことを示している.

オプティカルフローおよびエッジの算出は,画像上で局所的で,それぞれ独立であるため,提案手法は並列化に向いており,実時間アプリケーションに適している.さらに,このような性質により,さらに別の画像特徴の組み合わせることが容易にできるため,提案手法は拡張性に優れている.独立な情報の統合により全体の性能を向上させていく戦略は,対象とする環境に応じてアルゴリズムを柔軟に適応させることができ,実際的であるため,視覚情報処理の方法として重要であると考える.

## 参考文献

- [1] G. Adiv: Determining Three-Dimensional Motion and Structure from Optical Flow Generated by Several Moving Objects, *IEEE Trans. on Pat. Anal. Mach. Intell.*, Vol.7, No.4, pp.384–401 (1985).
- [2] J. P. Costeira and T. Kanade: A multibody factorization method for independently mving objects, *Int. J. Comput. Vision*, Vol.29, No.3, pp.159–179 (1998).
- [3] 川本一彦, 井宮淳, ラインハルト・クリッダ, 廣田薫: 幾何学的 拘束条件を必要としない動画像の領域分割, 第19回ファジィ システムシンポジウム講演論文集, pp.391-394 (2003).

#### 連絡先:

〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259

東京工業大学 大学院総合理工学研究科

Mail-Box: G3-49

知能システム科学専攻

廣田研究室 川本 一彦

電話:045-924-5682

FAX:045-924-5676

Email:kawa@hrt.dis.titech.ac.jp

## X 線透視画像における人工膝関節の動作機能評価システム An Evaluation System of Kinematics of the Artificial Knee Joint in X-ray Fluoroscopy Images

友定 俊彦†

小橋 昌司<sup>†</sup>

近藤 克哉†

畑 豊

Toshihiko TOMOSADA†

Syoji KOBASHI†

Katsuya KONDO<sup>†</sup>

Yutaka HATA†

高野 恭寿‡

村中 昭雄‡

柴沼 均\*

Yasuju TAKANO<sup>‡</sup>

Akio MURANAKA<sup>‡</sup>

Nao SHIBANUMA\*

吉矢 晋一\*

黒坂 昌弘\*

Shinichi YOSHIYA\*

Masahiro KUROSAKA\*

\*神戸大学大学院工学研究科 \*\*神戸大学大学院医学系研究科

†Graduate School of Engineering, University of Hyogo <sup>‡</sup>Kobe Steel, Ltd

\*Graduate School of Medicine, Kobe University

**Abstract:** The X-ray fluoroscopy images are widely used for evaluation of kinematics of an artificial knee joint *in vivo* after the total knee arthroplasty. However, it is difficult for a doctor to evaluate a flexion and rotation angle quantitatively from X-ray fluoroscopy images. This paper proposes a method to quantify the motion function of the artificial knee joint by using X-ray fluoroscopy images and the three-dimensional form data of the artificial knee joint. Our method recognizes automatically the position and pose of the artificial knee joint *in vivo*, and quantifies the motion function by matching the model generated from three-dimensional form data and the artificial knee joint on X-ray fluoroscopy images. As the result of applying to the simulation image, the image which the artificial knee joint *in vivo* is projected onto, we could confirm that the proposed method was effective in evaluation of kinematics of the artificial knee joint.

#### 1. はじめに

変形性膝関節症は、関節軟骨が擦り減ること で関節が損傷する病気であり、膝の痛みをはじ め、膝の変形や炎症、曲げ伸ばしが不自由にな るなどの症状が見られる. 関節の損傷が著しい 場合,強い疼痛や膝の可動域制限により日常生 活に支障をきたす. これらの病気の治療法とし て, 近年, TKA(Total Knee Arthroplasty, 人工 膝関節置換手術)が注目されている. TKA は、損 傷した膝関節の表面を型通りに骨切りして人工 膝関節と置換し, 痛みを伴わない安定した関節 を再建する術式である.人工膝関節は、主に、 大腿骨コンポーネント, 脛骨インサート, 脛骨 トレイの 3 種類から構成されている.手術後, 人工膝関節の形状が膝の動作機能を決定するた め、人工膝関節の形状設計の際には、生体内の 人工膝関節の動作機能を定量的に評価すること が重要となる.

従来の評価方法として、**X** 線透視装置を用いた方法[1,2]が提案されている.文献[1]では、**X** 線光源と人工膝関節の投影輪郭とを結んででき

る錐体状立体を仮想空間に再現し、その錐体状立体の表面と人工膝関節の3次元形状モデル表面間の距離総和を最小化することで人工膝関節の位置・姿勢の推定を行う。また文献[2]では、人工膝関節の3次元形状データの2次元投影図とX線透視画像とのマッチングを行うことで、人工膝関節の位置・姿勢の推定を行う。これらの研究では、大腿骨コンポーネントと脛骨トレイが互のでは、大腿骨コンポーネントと脛骨トレイが重なっている状態)画像への適用はあまりなされておらず、Occlusionが発生している画像に対する精度評価も行われていない。しかし、生体内の人工膝関節を撮影する際、Occlusionが発生しないようにするのは困難である。

そこで、本研究では X 線透視装置より撮影された X 線透視画像と人工膝関節の 3 次元形状データを用い、ファジィイメージマッチングにより各人工膝関節の位置・姿勢認識を行い、Occlusion が発生している画像にも適用でき、人工膝関節の屈曲角度などの動作機能の定量化を

行うシステムを開発する. また, 本提案システ ムの性能を評価するため、シミュレーション画 像、ジグ(冶具)を用いたファントム画像、TKA 患者のデータに本手法を適用する.

## 2. 準備

本研究では、日立社の X 線透視装置 (SX-VA30/DFA-100)を用いて撮影した動画像か ら1秒1フレームでキャプチャした静止画像を 処理対象画像として用いる. 解像度 640× **480[pixel]**, 濃度階調 **256** 階調(グレースケール) の Bitmap 画像である. X 線透視画像の一例と撮 影座標系を図1に示す. 大腿骨コンポーネント と脛骨トレイは金属製であり、X 線透視画像上 では軟部組織に比べて黒く写る. また, 脛骨イン サートはポリエチレン製であり, X 線透視画像 上では、軟部組織と同等のコントラストで写る. また,位置・姿勢認識を行う際,入力画像は原 画像の濃度値を反転させたものを用いる.

## 3. ファジィイメージマッチングによる位 置·姿勢認識

X 線透視画像中の人工膝関節の位置・姿勢認 識は、X線透視画像と人工膝関節の3次元形状 データを平面に透視投影して作成した投影画像 とのマッチングにより行う. 位置・姿勢認識で の3次元形状データは,6自由度(x 軸, y 軸, z 軸での回転・移動)において回転・移動し、それ に伴い投影画像も変化する.

まず,手動による初期位置合わせを行う.初 期位置合わせは、x,y,z軸での回転角度・移動量 を手動で与える.

次に、初期位置合わせで決定した 6 自由度の パラメータに基づいて、細かな位置合わせ(自動 フィッティング)を行う. 自動フィッティングで は,式(1)より求めるマッチングスコアμを評価し 位置・姿勢の推定を行う.

$$\mu = \frac{1}{2}(\mu_{intensity} + \mu_{contour})$$
 (1)

但し,
$$\mu_{intensity} = \frac{\sum G(x, y)H(x, y)\{1.0 - \mu_b(x, y)\}}{\sum H(x, y)\{1.0 - \mu_b(x, y)\}}$$

$$\mu_{contour} = \frac{\sum J(x, y)K(x, y)\{1.0 - \mu_b(x, y)\}}{\sum K(x, y)\{1.0 - \mu_b(x, y)\}}$$

ここで、µintensityはX線透視画像と投影画像との 重なり具合を、μcontour は X 線透視画像の輪郭抽 出画像と投影画像の輪郭抽出画像の重なり具合 を表す. また, G(x,y)は座標(x,y)における入力画 像(図 2(a))の濃度値, *H(x,y)*は投影画像(図 3(a)) の濃度値, J(x,y)は X 線透視画像の輪郭抽出画像 (図 2(b))の濃度値、K(x,y)は投影画像の輪郭抽出 画像(図 3(b))の濃度値を表し、G(x,y)、H(x,y)、 J(x,y), K(x,y)は0から1までの値に正規化する. μ<sub>b</sub>(x,y)は大腿骨コンポーネントと脛骨トレイの 境界である所属度を表し,手動で与えた大腿骨 コンポーネントと脛骨トレイの境界線からの距 離 d(x,y)を用い、図 4 に示すメンバーシップ関数 から求める. Thaは大腿骨コンポーネントと脛骨 トレイの重なり具合に応じて、任意の値を与え るものとする. Th<sub>d</sub>=50(pixel)として求めたファ ジィ所属度マップを図5に示す.

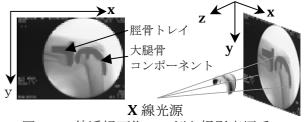
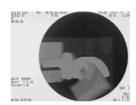


図1 X線透視画像の一例と撮影座標系



(a) 入力画像

(b) 輪郭抽出画像 図2 X線透視画像





(a) 投影画像

(b) 輪郭抽出画像

図3 3次元形状データの投影画像

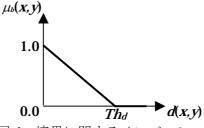
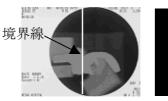


図4 境界に関するメンバーシップ関数





(a) 入力した境界線

(b)所属度マップ

図5 境界である所属度マップ

境界である所属度が高いところでは、マッチングスコア $\mu$ の計算をする際、境界部分の濃度値があまり反映されず、境界以外の部分でのマッチングが大きく反映されるようになり、**Occlusion** が発生している場合でも位置・姿勢認識が可能となる.

マッチングスコア $\mu$ は0から1までの値をとり、よくマッチしている程高い値をとる。そこで、マッチングスコア $\mu$ が最も高いときの3次元形状データの位置・姿勢をX線透視画像中の人工膝関節の位置・姿勢として認識する。

## 4. 動作機能の定量値算出

前節で述べた位置・姿勢認識を大腿骨コン ポーネント、脛骨トレイに適用し、それぞれの 相対的な位置・姿勢から,人工膝関節の動作機 能を定量化する. 本研究では, 臨床応用に用い られる回転角度(屈曲角度,回旋角度,内外反角 度)について定量化を行う. 角度算出法は、膝の 運動解析においてよく用いられる Grood らによ り定義された座標系[3]を用いる. Grood の座標 系では、大腿骨、脛骨の骨形状から推定される 骨軸に基づいて屈曲角度,回旋角度等を定義し ている. しかし、本研究で用いる X 線透視画像 からでは骨軸の推定が困難であるため, 大腿骨 コンポーネント,脛骨トレイのローカル座標系 に基づいて屈曲角度, 回旋角度, 内外反角度の 算出を行うことにする. それぞれのローカル座 標系(u 軸, v 軸, w 軸)は, 3 次元形状データ読 み込み時のワールド座標系(x 軸, y 軸, z 軸)と 一致するものとし、回転・移動に伴い、それぞ れのローカル座標系も回転・移動するものとす る.

本研究で用いた角度の算出方法を図 6 に示す。まず,大腿骨コンポーネントのローカル座標系  $\mathbf{u}_{\mathbf{f}}$  軸,  $\mathbf{v}_{\mathbf{f}}$  軸,  $\mathbf{v}_{\mathbf{f}}$  軸,  $\mathbf{v}_{\mathbf{f}}$  軸において単位ベクトル $\vec{e}_{uf}$ ,  $\vec{e}_{vf}$ ,  $\vec{e}_{vf}$  を,同様に脛骨トレイのローカル座標系  $\mathbf{u}_{\mathbf{t}}$  軸,  $\mathbf{v}_{\mathbf{t}}$  軸,  $\mathbf{v}_{\mathbf{t}}$  軸,  $\mathbf{v}_{\mathbf{t}}$  軸において単位ベクトル $\vec{e}_{ut}$ ,  $\vec{e}_{vt}$ ,  $\vec{e}_{vt}$  を定義する。大腿骨コンポーネントの  $\mathbf{w}_{\mathbf{f}}$  軸を屈曲軸,脛骨トレイの  $\mathbf{u}_{\mathbf{t}}$  軸を回旋軸とし,これらの軸と互いに直交するような内外反軸を考える。内外反軸方向の単位ベクトルを $\vec{e}$  とし,式 (3)により求める。

$$\vec{e} = \frac{\vec{e}_{ut} \times \vec{e}_{wf}}{\left| \vec{e}_{ut} \times \vec{e}_{wf} \right|}$$
 (3)

単位ベクトル $\bar{e}$ と大腿骨コンポーネントの  $v_f$  軸 方向の単位ベクトルとのなす角度を屈曲角度  $D_{flexion}$  とし、式(4)より求める。また、単位ベクトル $\bar{e}$  と脛骨トレイの  $v_t$  軸方向の単位ベクトルとのなす角度を回旋角度  $D_{rotation}$  とし、式(5)より求める。内外反角度  $D_{varus}$  は、式(6)より求める。

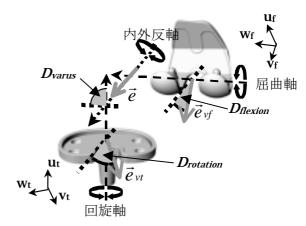


図 6 Grood の定義に基づいた角度算出法

$$D_{flexion} = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{e} \cdot \vec{e}_{vf}}{|\vec{e}| |\vec{e}_{vf}|} \right)$$
 (4)

$$D_{rotation} = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{e} \cdot \vec{e}_{vt}}{|\vec{e}| |\vec{e}_{vt}|} \right)$$
 (5)

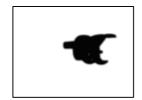
$$D_{varus} = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left( \frac{\vec{e}_{wf} \cdot \vec{e}_{ut}}{|\vec{e}_{wf}||\vec{e}_{ut}|} \right)$$
 (6)

## 5. 実験結果及び考察

3 次元形状データを Occlusion が発生している状態になるように投影し、ガウス関数を畳み込みして作成したシミュレーション画像(図7(a))に本手法を適用した。その一例として、屈曲角度0°、回旋角度0°、内外反角度0°の位置・姿勢で作成した画像に適用した結果を図7(b)、表1に示す。同表より、小さな誤差で解析でき、本手法が有効であることが確認できた。誤差の原因としては、初期位置合わせ時のずれが考えられる。

次に、ジグにより人工膝関節を固定し撮影したファントム画像に本手法を適用した。その一例として、屈曲角度  $60^\circ$ 、回旋角度  $0^\circ$ 、内外反角度  $0^\circ$ の位置・姿勢で固定して撮影した画像(図 8(a))に適用した結果を図 8(b)、表 2 に示す。同表より、良好に解析できていることが確認できた。誤差の原因としては、撮影画像の画質、ジグで固定する際の目測による設定値とのずれが考えられる。

最後に、患者(63 歳、女性)の膝を仰臥位・Passive の状態で伸展・屈曲させた様子を撮影した画像を解析した結果を図9に示す。同図より、回旋角度、内外反角度に若干ばらつきが見られたが、屈曲角度においては良好に解析できていることが確認できた。また、従来困難であったOcclusion が発生している画像においても良好に位置・姿勢認識ができ、動作機能の定量化が行えることも確認できた。





(a) 入力画像

**(b)** 認識結果

図7シミュレーション画像に対する結果の一例

表1 シミュレーション画像に対する解析結果

		- P4** / 4 /	30 /31 DIVIDA
	$D_{\mathit{flexion}}$	Drotation	Dvarus
解析結果	0.05	0.08	0.00
誤差(deg)	0.05	0.08	0.00





(a) 入力画像

**(b)** 認識結果

図8 ファントム画像に対する結果の一例

表2 ファントム画像に対する解析結果

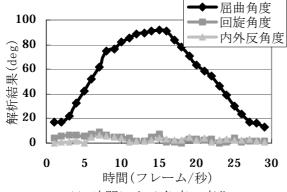
	<b>D</b> <sub>flexion</sub>	Drotation	<b>D</b> varus
解析結果	60.79	0.20	0.38
誤差(deg)	0.79	0.20	0.38





(a) 入力画像の一例

**(b)** 認識結果



(c) 時間による角度の変化 図 9 患者データの解析結果

## 6. むすび

本論文では、**X** 線透視画像と人工膝関節の **3** 次元形状データを用いて、人工膝関節の動作機能を定量化する手法を提案した. また、

Occlusion の発生している画像へ適用できる ファジィイメージマッチングも提案した. 本手 法では、 X 線透視画像と人工膝関節の 3 次元形 状データを投影した投影画像とマッチングを行 うことで人工膝関節の位置・姿勢を認識した. 本手法を大腿骨コンポーネントと脛骨トレイに 適用し、それぞれの相対的な位置・姿勢から屈 曲角度,回旋角度,内外反角度の定量化を行っ た. シミュレーション画像, ジグを用いたファン トム画像に適用した結果, 本手法が有効である ことが確認できた.また,生体内の人工膝関節 の解析では,回旋角度,内外反角度にばらつき が見られるものの、従来困難であった Occlusion が発生している画像においても膝の動作機能を 良好に解析できていることが確認でき, 臨床へ の応用が期待できる. 今後の課題としては、解 析精度の向上, 屈曲角度, 回旋角度, 内外反角 度以外の動作機能の定量化などが挙げられる.

## 謝辞

本研究において X 線撮影にご協力頂いた明和病院に深く感謝致します.

## 参考文献

- [1] T. Yamazaki, T. Watanabe, Y. Nakajima, K. Sugamoto, T. Tomita, Y. Sato, H. Yoshikawa. and S. Tamura. System Fluoroscopy-based for 3-D Kinematic Analysis of Total Knee Arthroplasty and its Clinical Application," Medical Imaging Technology, vol. 22, No.1, pp. 41-50, Jan. 2004.
- [2] M. R. Mahfouz, W. A. Hoff, R. D. Komistek, and D. A. Dennis, "A Robust Method for Registration of Three-Dimensional Knee Implant Models to Two-Dimensional Fluoroscopy Images," IEEE Trans. Med. Imaging, vol. 22, pp. 1561-1574, Dec. 2003.
- [3] E. S. Grood, and W. J. Suntay, "A Joint Coordinate System for the Clinical Description of Three-Dimensional Motions: Application to the Knee," Biomechanical Engineering, vol. 105, pp. 136-144, 1983.

## 連絡先:

友定 俊彦

兵庫県立大学大学院工学研究科 畑研究室

〒671-2201 兵庫県姫路市書写 2167

Phone + Fax: 0792-67-4986

E-mail: tomosada@comp.eng.himeji-tech.ac.jp

## YUV4:2:0 フォーマットカラー画像の色差信号補間法

## **Chrominance Signal Interpolation Of YUV4:2:0 Format Color Images**

杉田 博司 Hiroshi Sugita 武蔵工業大学 工学部 Musashi Institute of Technology

田口 亮
Akira Taguchi
武蔵工業大学 工学部
Musashi Institute of Technology

**Abstract:** In this paper, we propose a method for the chrominance signal interpolation in the YUV4:2:0 format. The conventional method of interpolation is bilinear interpolation. In the YUV4:2:0 format, the chrominance signal is lost its high-frequency components. The lost high-frequency components can't be recovered by the bilinear interpolation.

The proposed method aims at the recovery of high-frequency component of the chrominance signal using the luminance signal (i.e., Y signal). Because, the luminance signal is invariable for the YUV4:2:0 format. Simulation results show the superior performance of the proposed approach, which respect to the bilinear interpolation.

## 1. まえがき

近年、ディジタルカメラの普及やインターネット環境の整備、地上波ディジタルテレビ放送の開始に伴い、ディジタル画像・映像を取り扱う機会が増加している。ディジタルカメラでの撮影画像やインターネット等での静止画、動画の伝送時にはそれら画像データを圧縮必要があり、その圧縮方法として国際標準符号化方式のJPEG,MPEG等が広く普及している[1]。

MPEG, JPEG等の標準符号化方式において、カラー画像を取り扱う場合、標準的な色空間であるRGB色空間で符号化をせず、輝度成分(Y)と色差成分(U,V)から成るYUV色空間に変換してから各成分ごとに符号化を行うことが一般的である。YUV色空間の特徴として、輝度成分Yに画像情報を集中させることができるため、色差成分U,Vの周波数帯域の削減が可能である。帯域制限は画像サイズの画素数の削減を意味するものであり、そのことによりデータの圧縮が行われる。YUV色空間での画像フォーマットが定義されている。YUV色空間での画像フォーマットが定義されている。YUV色空間での画像フォーマットにおいて代表的かつ高圧縮なフォーマットがYUV4:2:0フォーマットであり、輝度成分に対して色差成分を水平・垂直に1/2に圧縮したフォーマットである。

YUV4:2:0 フォーマットはその高圧縮性から様々な用途で用いられており、地上波ディジタルテレビにも採用されている。しかしながら、YUV4:2:0 フォーマットでは比較的高いビットレートで符号/復号化された画像においては、符号化によって生じる画像劣化よりも色差成分の画素数削減による画像劣化(彩度の低下、色滲み)の方が強くなる。よってフォーマット変換による劣化を補う処理が必要となる。補間法で最も一般的に用いられる方法は双線形補間であるが、双線形補間の欠点は急峻なエッジ部においてその不連続性を満たした補間値が得られないことである。よって、YUV4:2:0 フォーマットにおける失われた色差成分の補間に対して双線形補間を適用した場合、元のサイズに戻った色差成分にも色滲みや彩度の低下が生じる。

本稿では、YUV4:2:0 フォーマットでのエッジ部等の急峻な変化部分において、色差成分の補間に、帯域制限されていない輝度成分の情報を用いる方法を提案する。提案法は輝度成分の変化形状を色差成分の補間に利用することで、フォーマット変換によって失われた色差成分の高域成分の回復を目指す。しかしながら、輝度成分の方が、元来、色差成分より高周波数域に多くの成分を持つため、輝度成分が必要以上に急激に変化している場合

は、その情報をそのまま利用することは好ましくない。 提案法においては輝度情報の色差成分への補間に考慮する程度をパラメータ $\epsilon$ によって制御する。そして、そのパラメータ $\epsilon$ を画像の種類に応じて適切に可変させる必要があり、実験的な検討から画像情報を用いたパラメータ $\epsilon$ の決定法を導出する。さらに、提案法と双線形補間を客観評価、主観評価の双方から比較することで、提案法の有効性を明らかにする。

## 2. 方法

## 2.1. YUV4:2:0 フォーマット

MPEG, JPEG 等の標準符号化方式において、カラー画像は標準的な色空間である RGB 色空間で符号化をせず、明るさを表す輝度成分(Y成分)と色を表す色差成分(U,V成分)から成る YUV 色空間に変換してから符号化が行われる。 YUV 色空間に変換した後、それぞれの成分ごとに符号化を行う。

YUV 色空間では Y 成分に画像情報を集中させることができるため、色差成分の帯域の削減、すなわち、画素数の削減が可能となる。ITU-R BT601 勧告で定義されている代表的なフォーマットである YUV4:2:0 フォーマットは色差成分 U,V を水平/垂直方向とも 1/2 にダウンサンプリングするフォーマットである。

YUV フォーマットは符号化に対して図1に示されるように色空間変換器とアップサンプラーとダウンサンプラーを付加した構成となる。符号化前処理として入力画像のRGB空間をYUV空間に色空間変換してから帯域制限フィルタと間引きによるダウンサンプリングを行い符号化される。受信側では復号化後に色差成分の補間を伴うアップサンプリングを経てYUV空間をRGB空間に再び色空間変換を行い、出力画像を得る。

YUV4:2:0 フォーマットはその高圧縮性から様々な用途で用いられているが、比較的高いビットレートで符号/復号化された画像では、符号化によって生じる画像劣化よりも色差成分の画素数削減による画像劣化(彩度の低下、色滲み)の方が強くなる。よってフォーマット変換による劣化を補う処理が必要となる。本論文では、YUV4:2:0 フォーマットにおいて色差成分のサイズを戻す際の補間法に工夫を加え、色差成分の帯域を広げるような工夫を行い、フォーマット変換による画像劣化の復元を行う。

## 2.2. 従来の色差成分に対する補間法

YUV4:2:0 フォーマットでは色差成分は水平・垂直方向に 1/2 にダウンサンプリングされている。YUV4:2:0 フォ

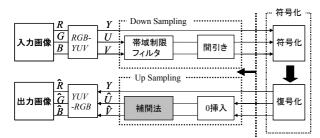


図1 YUVフォーマットの手続き

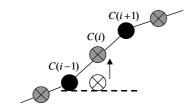


図2 双線形補間による色差成分の補間

ーマットで規定されている SIF(352×240)や CIF(352×288)などのフォーマットでは色差成分は近傍 2×2 画素が同じ値をとる最近隣型の補間がなされる。この場合、色差成分の解像度はサイズの小さい画像と全く変わらない。補間法でもっとも一般的に用いられる方法に双線形補間があり、その方法を色差成分の補間に適用した場合の説明図を図 2 に示す。図 2 は補間で得る必要のある色差成分 C(i)を前後の間引かれていない色差成分 C(i-1)及び C(i+1)から次式のように平均を取ることで算出する方法である。

$$C(i) = \{C(i-1) + C(i+1)\}/2$$
 (1)  
また格子点に囲まれた色差成分  $C(i,j)$ の補間は4つの斜め方向成分の平均値、すなわち

$$C(i,j) = \frac{C(i-1,j-1) + C(i-1,j+1) + C(i+1,j-1) + C(i+1,j+1)}{4} (2)$$

となる。双線形補間の欠点は急峻なエッジ部においてその不連続性を満たした補間値が得られないことである。 そのことによって色滲みや彩度の低下を生じてしまう。

## 2.3. 輝度成分を用いた色差成分の補間法

YUV4:2:0 フォーマットの特徴は U,V のみが水平、垂直方向に 1/2 帯域制限を受けていて、Y 成分は、帯域制限を受けていない点である。よって U,V のサイズを元に戻すための補間処理において、帯域制限を受けていない Y 成分の情報を利用することが考えられる。Y 成分と U 成分および V 成分は必ずしも相関が強いとは言えないが、画像のエッジ部等の急峻な変化部分においては、輝度成分、色差成分共に急峻な変化となっている場合も多い。そのことに着目して、帯域制限されていない輝度成分の情報を色差成分の補間に利用することで、特にエッジ部等において急峻な変化の再現を試みる。提案法の考えを示したものを図 3 に示す。アップサンプリング時において帯域制限による劣化の生じていない輝度成分を色差成分の補間法に利用する。

ここでは輝度成分の情報を用いた色差成分の補間法について説明を行う。色差成分 C(i-1)と C(i+1)を用いて補間により色差成分 C(i)を算出することを考える。輝度成分はすべての点で存在しているため、当然 i 点の信号、Y(i)も存在している。そこで、輝度成分の Y(i-1),Y(i),Y(i+1), 3 点の変化形状を模倣して C(i)の算出を行う。つまり

$$C(i) = C(i-1) + \{C(i+1) - C(i-1)\} \times w(i)$$
(3)

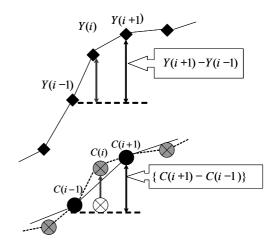


図3 提案法における色差成分の補間

と *C*(*i*)を求める。ここで、輝度成分の変化形状に対して 各色差成分の符号を考慮して

$$w(i) = \frac{Y(i) - Y(i-1)}{Y(i+1) - Y(i-1)}$$
(4)

と定義する。図3に示すようにエッジ部等では輝度成分の不連続に近い変化を色差成分にもコピーすることができる。

しかしながら、本来、輝度成分は色差成分より高周波数域に成分を多く持つため、式 (4) の重みをそのまま適用した場合、色差成分に不要な変化成分が生じ、インパルス雑音が重畳されたようになる。そこでその弊害を回避するために、必要以上に大きな変化を起こさせないように重みw(i)に上限を設定し、色差成分に過度の変化成分が生じることを防ぐことにする。重みw(i)は次式のように与える。

$$w(i) = \begin{cases} w(i) & \text{if} \quad w(i) < \varepsilon \\ \varepsilon & \text{if} \quad w(i) \ge \varepsilon \end{cases}$$
 (5)

ここで、 $\epsilon$ は重みの上限を設定するパラメータである。 パラメータ  $\epsilon$  は画像ごとに適切に決定する必要がある。

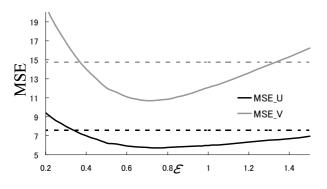
## 3. パラメータ $\epsilon$ の決定と性能評価

## 3.1. パラメータ $\epsilon$ の導入の効果

2.3 節で明らかにした提案法における重みの上限を設定するパラメータ  $\epsilon$  の導入の有効性とその決定法について検討する。パラメータの導入の効果と有効性を定量化するために各色差成分に対する平均 2 乗誤差(Mean Square Error: MSE)を用いる。MSE は、

$$MSE = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (S(i,j) - X(i,j))^2$$
 (6)

で定義される。ここで、S(i,j)が原画像における色差成分 U 又は V を、X(i,j)は補間によって求められた色差成分 U 又は V を示す。パラメータ  $\epsilon$  を可変として色差成分の MSE の変化を画像 Pepper を例として求め、図 4 に示す。図 4 では双線形補間を用いて色差成分 U、V を元のサイズに戻した時の MSE も点線で併せて示している。図 4 からパラメータ  $\epsilon$  を可変することで色差成分 U 及び V の補間性能の向上が図られることがわかる。また Pepper に対してはその適切なパラメータ  $\epsilon$  が 0.75 付近で色差成分 U 及び V でほぼ同じ値である。他の多くの画像に対するシミュレーションも総合してパラメータ  $\epsilon$  は同一画像であれば、2 つの色差成分に対して同一の値を用いることが可能であることがわかった。



パラメータ ε と MSE との関係

各画像に対する適切な ε

双 1 日四家(C/)	) D m 37.5 C
画像	ε
Colorful	0.85
Milkdrop	0.83
Pepper	0.75
Balloon	0.75
Sailboat	0.75
Airplane	0.74
Mandrill	0.65
Bike	0.60

ここで R.GB 成分各 8 ビットでサイズ 256×256 画素の 8 つのカラー画像を用いて、εの適切な値を実験的に求 めた結果を示す。8つの画像は多種多様(人物画、風景画、 パターン画像)な画像群であり、よって8つの画像を用い た検討は広範なカラー画像に対する検討とみなすこと ができよう。8 つの画像に対して適切なパラメータ  $\epsilon$  の 値を求めた結果を表1に示す。表1から明らかなように 適切な  $\epsilon$  の値は画像によって異なることがわかる。よっ て、εの値を画像から得られる情報から決定する方法を 明らかにする必要がある。

## 3.2. パラメータ ε の決定法

パラメータ ε は画像ごとに適切に決定する必要があ る。輝度情報を色差信号に反映させる度合いが ε の大き さと考えられる。輝度成分は色差成分よりも帯域が広く、 高域の成分が必要以上に強い時は、色差信号の補間の情 報として用いることに好ましいことではない。輝度成分 の高域のパワースペクトル量を定量化するために輝度 成分の自己相関関数を採用する。水平方向、垂直方向の 自己相関関数  $C_H(k)$ 、 $C_v(k)$ は次式で表される。

$$C_H(k) = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} \{x(i,j) - m\} \cdot \{x(i+k,j) - m\}$$
 (7)

$$C_{V}(k) = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} \{x(i,j) - m\} \cdot \{x(i,j+k) - m\}$$
 (8)

ここで、x(i,i) はサイズが  $M \times N$  のカラー画像の輝度成 分、m は画像全体の輝度成分の平均値とする。自己相関 関数は種々の信号を同一に取り扱うため  $C_H(0)$ (又は  $C_v(0)$ )の値を基準とすることが一般的であり

$$\overline{C}_H(k) = C_H(k) / C_H(0) \tag{9}$$

$$\overline{C}_{V}(k) = C_{V}(k) / C_{V}(0) \tag{10}$$

を定義する。このとき $0 \le \overline{C}_V(k), \overline{C}_H(k) \le 1$ となる。

本論文では、色差成分の補間に輝度成分の情報を用い ることを考えている。色差成分は 1 画素おきに

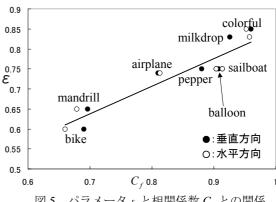


図 5 パラメータ  $\epsilon$  と相関係数  $C_f$  との関係

間引かれていてその補間に輝度成分の情報を用いるこ とを考えている。よって k=2 とした  $\overline{C}_H(2)$ ,  $\overline{C}_V(2)$  の値を ε 設定に用いたい。 $\overline{C}_H(2)$  と $\overline{C}_V(2)$  を $C_f$  としてパラメ ータ ε との関係が明らかになれば処理対象の輝度成分 のみからパラメータをが推定されることになる。ここで も8つのカラー画像を用いて輝度成分の自己相関係数C  $_f$ とパラメータ ε との関係を調べた結果を図 5 に示す。 水平方向の補間には $\overline{C}_{\nu}(2)$ を、垂直方向の補間には  $\overline{C}_{H}$ (2)を用いることは言うまでもない。図 5 からパラメ ータ $\epsilon$ と自己相関関数  $C_f$ との間に直接関係が見られ最 小二乗法で一次関数近似すれば

$$\varepsilon = 0.691C_f + 0.154 \tag{11}$$

となる。自己相関関数  $C_f$ が小さいときはそのフーリエ 変換で得られるパワースペクトルの高域成分が大きい と判断され、その時、€の値は確かに小さくなっている。 よって自己相関係数  $C_f$ を輝度成分から計算し、その係 数を用いて式(11)より色差成分の補間に必要なパラメー  $g \epsilon$ が得られることになる。

## 3.3. 性能評価

式(11)で導出されるパラメータを用いた提案法の性 能評価を双線形補間との比較を通じて行う。性能評価は 客観評価と主観評価の双方から行う。客観評価は各色差 成分の MSE と色差成分のサイズを元に戻して得られた カラー画像の RGB 色空間および L\*a\*b\*色空間における 原画像とのベクトル間距離に基づく誤差指標 NMSE、 NCD を用いて行う。NMSE は

$$NMSE = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} \left\| Y(i,j) - S(i,j) \right\|^2}{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} \left\| S(i,j) \right\|^2}$$
(12)

で定義される。ここで Y(i,j)は 4:2:0 フォーマットから元 のサイズに戻した復号画像であり、S(i,j)は原画像である。 NMSE は RGB 空間で表示された原画像と復号画像との ベクトル間距離(2乗誤差)を評価している。RGB空間内 の距離と人間の視覚特性の距離は対応していないこと から国際照明委員会(CIE)では視覚と均等な尺度をもつ 色空間として L\*a\*b\*色空間を推奨している。L\*a\*b\*色空 間での誤差評価量は NCD(Normalized Color Difference)[3] と呼ばれ

$$NCD = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} \Delta E_{L^*a^*b^*}}{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} E_{L^*a^*b^*}^*}$$
(13)

と定義される。ここで、

$$\Delta E_{L^*a^*b^*} = \sqrt{\frac{(L_o(i,j) - L_i(i,j))^2 + (a_o(i,j) - a_i(i,j))^2}{+(b_o(i,j) - b_i(i,j))^2}}$$
(14)

$$E_{L^*a^*b^*}^* = \sqrt{(L_i(i,j))^2 + (a_i(i,j))^2 + (b_i(i,j))^2}$$
 (15)

である。 $L^*a^*b^*$ 色空間における L は明度で、a, b, は彩度であり、 $L_i(i,j)$ 、 $a_i(i,j)$ 、 $b_i(i,j)$ は RGB 空間における原画像を  $L^*a^*b^*$ 色空間に変換したものである。また、 $L_o(i,j)$ 、 $a_o(i,j)$ 、 $b_o(i,j)$  は RGB 空間における 4:2:0 フォーマットを戻した画像を  $L^*a^*b^*$ 色空間に変換したものである。

表 2 に双線形補間と輝度成分の変化の情報を導入した 提案法の各色差成分の MSE と NMSE、NCD での評価結 果を示した。提案法は MSE、NMSE、NCD 評価において 8 つの画像すべてに対して双線形補間より優れた結果を 導いている。各色差成分の MSE が改善されたことで提案 法は YUV4:2:0 フォーマットにおける失われた色差成分 の補間に対して有効な性能を示していることが明らか になった。また、NMSE及びNCD評価においても優れた 結果が示されたことで、色差成分の質改善はカラー画像 としての質改善を成し遂げていることがわかる。この評 価結果を用いて提案法の性能向上の度合いを明らかに する。評価量としては NCD 比(「提案法における NCD」 /「双線形補間における NCD」)を用いる。NCD 比はより 小さいほど提案法が優れていることを意味する。図6に 各画像における NCD 比と相関係数  $C_f$ との関係を示す。 提案法の向上率は相関係数  $C_f$ に対しても直接関係が見 られ、最小2乗法を用いて一次関数近似すれば

$$NCD \not = -0.313C_f + 1.166 \tag{16}$$

となる。このことから提案法は輝度成分の相関係数が高い画像、つまり輝度成分の変化が緩やかな画像に対して有効であるということが分かる。さらに、対象とする画像信号が与えられると提案法が有効に作用するか否かが判断されることになる。

最後にフォーマット変換後に元のサイズに戻した復 号画像における主観評価を行う。画像 Pepper における V 成分の双線形補間および提案法における補間結果を比 較したものが図 7 である。双線形補間の結果は全体的な 彩度の低下(ボケ)や輪郭部における滲みといった劣化が 生じているが、提案法による補間処理ではエッジ部の滲 み、全体的な彩度の点で改善が見られる。提案法の有効 性は主観評価からも明らかにされた。

## 4. むすび

本稿では、YUV4:2:0 フォーマットにおいてダウンサンプリングにより劣化した色差成分の改善を行うために、輝度成分の情報を用いた色差成分の補間を提案した。提案法は輝度成分の変化形状を重みとして、その重みを用いて色差成分の補間を行う。このことにより、フォーマット変換によって失われた高周波数成分を復元しようとするものである。しかしながら、輝度成分のほうがより多くの情報を持つため、重みに対して上限を設定するパラメータ  $\epsilon$  を導入することで色差成分の質改善が可能となった。

提案法におけるパラメータ  $\epsilon$  の決定を実験的に行い、パラメータ  $\epsilon$  が輝度成分の自己相関係数  $C_f$  から導出されることを示した。これにより、パラメータ  $\epsilon$  は画像の種類に応じて変化させることが可能となった。また、提案法が有効となるか否かも判断可能であることを明らかにした。最後に提案法の有効性を客観、主観評価から明らかにした。

表 2 性能評価(MSE,NCD,NMSE)

画像	補間法	MSE_U	MSE_V	NCD	NMSE
Colorful	Bilinear	9.32	12.00	0.0257	0.0183
Coloriui	Proposed	7.44	7.65	0.0223	0.0160
Milkdrop	Bilinear	2.89	9.40	0.0306	0.0249
Willkulop	Proposed	2.28	5.41	0.0264	0.0217
Pepper	Bilinear	7.59	14.80	0.0566	0.0306
Террег	Proposed	5.73	10.71	0.0498	0.0277
Balloon	Bilinear	3.60	2.16	0.0195	0.0167
Danoon	Proposed	3.25	1.85	0.0176	0.0153
Sailboat	Bilinear	4.12	9.74	0.0380	0.0251
Samouat	Proposed	3.79	6.85	0.0338	0.0223
Airplane	Bilinear	7.90	3.94	0.0215	0.0164
Airpiane	Proposed	6.07	3.34	0.0191	0.0147
Mandrill	Bilinear	25.13	24.68	0.0617	0.0438
Mandilli	Proposed	23.39	23.22	0.0601	0.0428
Bike	Bilinear	7.11	8.93	0.0475	0.0309
DIKE	Proposed	6.17	8.26	0.0449	0.0296

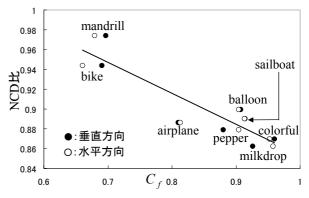


図 6 相関係数  $C_f$ と NCD 比の関係



4

形補間 (b)提案法 図 7 V 成分拡大画像(Pepper)

## 猫文

- [1] 酒井善則,吉田俊之,"映像情報符号化"才一厶社, 2001
- [2] Recommendation ITU-R BT.601, "Studio Encoding Parameters of Digital Television for Standard 4:3 and Wide-screen 16:9 Aspect Ratios"
- [3] 濱田 敬, 田口 亮, 木村誠聡, "ファジー推論を用いた混合雑音が重畳したカラー画像の復元手法"信学論(A), vol.J83-A, no.1, pp.106-116, Jan. 2000.

## 連絡先

武蔵工業大学大学院工学研究科 電気工学専攻= 158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 Phone + Fax 03-5707-2215

E-mail: sugita@sp.ee.musashi-tech.ac.jp

## 眼底診断のための画像解析

## (1)乳頭部の擬似3次元画像とその局所平面勾配画像への変換

Analysis of Eyeground Images for Diagnosis of Eyeground Diseases (1)Pseudo Three Dimensional Image of Optic Nerve Nipple Part and its Conversion to Locally Planar Inclination Image

宮武 直樹 佐藤 秀昭 松田 充夫 但馬 文昭 陳 遠斌 Hideaki SATO Nobuo MATSUDA Fumiaki TAJIMA Yuanbin CHEN Naoki MIYATAKE 横浜国大 横浜国大院 法政大 杏林大 大島商船高専 Yokohama Nat.Univ. Yokohama Nat.Univ. Hosei Univ. Kyorin Univ. Oshima Nat.Coll.

Abstract Color eyeground images, which were composed of B, G and R ones, were separately analyzed, and the diagnosis of the excavatio papillae nervi optici was attempted. It revealed that R-images corresponded to optic nerve nipple part. An optic nerve nipple part extracted from a R-image sample was converted into a pseudo three dimensional image. Moreover, it was converted into a locally planar inclination image. As a result, the feature of the image enabled us to improve the rate of correctly diagnose of the optic nerve nipple part.

Key Words eyeground image, diagnosis, eyeground diseases, locally planar inclination

## 1.はじめに

緑内障等の眼疾患早期診断を目的として,眼底画像解析の研究は広く行われている[1].

従来,このような目的で行われている研究には,乳頭部及びそこから伸びる血管の状態に着目したものが多い.しかし,眼底画像から血管部を抽出することは容易でなく,画像処理による診断が困難であった.

一方,我々は血管部だけでなく,血管を含めた主として乳頭部全体の画像解析により診断する新たな手法について検討行ってきた[2].この場合,診断率を改善するためには,原画像から診断率向上に寄与する特徴パラメータを見出すことが重要なカギとなる.そのために,これまでに,カラー眼底画像の青画像が乳頭陥凹部に,赤画像が乳頭部に対応していることを明らかにし,正常者異常者判別の診断を試みてきた[3].今回は,赤画像の擬似3次元画像及びその局所最小2乗近似平面の傾きの画像化(以下,局所平面勾配画像とする)について検討し,それを利用した診断支援を示す.

#### 2. 画像解析の方法

## 2.1 前処理

正常者サンプル 52 名, 異常者 39 名のサンプルカラー画像を 3 色に分離し, 赤画像についてメディアンフィルタ処理 2 回によりノイズを除去した.

## 2.2 乳頭部赤画像の擬似3次元画像化

抽出した赤画像乳頭部について,x,yには画素の位置座標,zには輝度を対応させて,(x,y,z)の座標空間に擬似 3 次元表示することで診断への適用を考える.

## 2.3 局所平面勾配画像

擬似3次元画像について次の方法により局所 平面勾配画像に変換する.

擬似 3 次元画像上の任意の点 O の座標を (x,y,z) とする.但し z は輝度を表す.O の  $n^2-1(n=3,5,\cdots,2N+1)$  近傍の画素の集合を とし, $O_i\in\Omega$ について,次式の最小 2 乗平面 S を求める.

$$ax_i + by_i + cz_i + d = 0$$

ここで ,  $O_i = (x_i, y_i, z_i)$  である . S と x y 平面

のなす角 (< /2), すなわち  $(S \circ n^2)$  近傍の 最小 2 乗近似平面の傾き を次式により求める .

$$\theta = \cos^{-1} \left( \pm \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right)$$
 (1)

得られた を3段階に分け,その値の大きい順に赤,緑,青色を対応させる.さらにそれぞれの色についても を輝度に対応させて画像表現する.

## 3.結果と考察

## 3.1 乳頭部赤画像の擬似3次元画像

擬似3次元画像例(正常者,異常者)を図1に示す。(a),(b)は元の画像であり,(c),(d)はそれぞれに対応する擬似3次元画像である。これに基づいて両者を比較する。異常者は正常者に比べると輝度の大きい部分(図の底面付近)で丸みがあり,輝度が小さい乳頭辺縁部付近では分布面の傾きが大きい。このような特徴は他の多くのサンプル画像に当てはまる。そこで,次節ではこのような特徴を式(1)に基づいて画像化した。

## 3.2 局所平面勾配画像

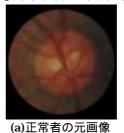
図1(e),(f)に乳頭部赤画像の正常者,異常 者の局所平面勾配画像の例を示す.これは, n=13の場合の例である .(e) ,(f)の矢印は(a) , (b)の最も輝度が高い部分に対応すると共に (c),(d)の底面付近に対応する部分でもある. (e),(f)を比較すると,(e)には低勾配領域を表 す赤画素が矢印の箇所にほとんど現れていない が、(f)には低勾配領域を表す赤画素が矢印の箇 所に大きな塊となって現れていることがわかる. 他の例では,正常者の場合は赤画素が比較的多 く現れている場合でも大きな塊が現れず、小さ い塊が点在している例や辺縁部の青画素が少な い例があった.図では分かりにくいが,乳頭辺 縁部に対応する円形状の部分は勾配が大きい箇 所で、その大小を輝度に対応させて表現してい る.

以上の結果から,擬似3次元画像が有する正常異常の判別に有用な特徴量の一部は局所平面 勾配画像も有していると考えられ,医師の診断 支援に適用可能であると考えられる.

## 4. おわりに

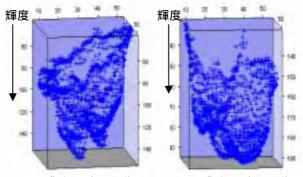
眼底画像から眼疾患の診断を行う支援システムを開発するために眼底画像解析の基礎的研究として,眼底画像の乳頭部の擬似3次元画像と眼疾患の関係について検討し,その局所的勾配に着目した画像変換を試みた.その結果,勾配に対応した画素の分布の特徴と正常者異常者との対応が明らかにされ,それに基づく眼診断の可能性が示された.

今回は提案手法の有用性を試行的に確認することが目的であったため,局所平面勾配画像への変換の閾値等は必ずしも最適値ではない.今後,この点も含めて医師の診断に対応する結果を与えるアルゴリズム等について検討する.



R

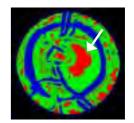
(b)異常者の元画像



(c) (a)の擬似 3 次元画像

(d) (b)の擬似 3 次元画像





(e) (c)の変換結果

(f) (d)の変換結果

図1 乳頭部赤画像の処理結果例

### (参考文献)

[1]富岡芳文,田中稔,田中幸吉,田村進一:血管構造に基づく眼底写真の貼合せ,情報処理学会論文誌,19,2,1978.

[2] 陳遠斌,但馬文昭,宮武直樹,佐藤秀昭,松田充夫:"視神経乳頭陥凹の診断のための眼底画像の解析(3)",第13回ソフトサイエンスワークショップ講演論文集,pp.5-6,2003.

[3]陳遠斌,但馬文昭,宮武直樹,佐藤秀昭,松田充夫:" 視神経乳頭陥凹の診断のための眼底画像の解析",バイオメディカルファジィシステム学会第16回大会講演論文集,pp.101-102,2003.

但馬文昭:横浜国立大学教育人間科学部 〒220-0046 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-2

TEL 045-339-3448

E-mail: tajima@ynu.ac.jp

## ラフ集合論を用いた画素の連結関係に基づく 画像領域分割法の検討

Rough Sets Based Image Segmentation with Connectedness

小橋昌司

近藤克哉

畑豊

Syoji Kobashi

Katsuya Kondo

Yutaka Hata

兵庫県立大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, University of Hyogo

**Abstract:** This paper introduces a rough sets based image segmentation method with respect to connectedness between pixels or voxels. In this method, an image is an information system, and a pixel in the image is a datum of the information system. With respect to connectedness, the proposed method extracts alpha-tolerance relation, which is an extended concept of rough sets, from the information system. The categories of the alpha-tolerance relation mean regions in the image. Consequently, we obtained regions in which pixels have high connectedness with other pixels in the same region. To evaluate the performance of the proposed method, it was applied to MR images produced by the BrainWeb computer simulation.

## 1. はじめに

従来、Fuzzy C-means (FCM)、Bayesian Classification 法などの様々なソフトコンピューティング技術に基づくクラスタリング法が画像の領域分割に適用されてきた[1,2]。一般的にそれらの手法においては、画像の各画素を1つのデータ、各データの属性値を画素値とし、画像全体をひとつのデータ集合とみなすことで、クラスタリング法の画像領域分割への適用を可能とする。

一方、文献[3][4]ではラフ集合論に基づく画像領域分割法として、関心画像を複数回 K-means クラスタリングし、得られたクラスタラベルを画素の属性値としたα-同値関係を算出し、その各カテゴリを画像中の領域とみなすことで領域分割を行う手法を提案した。これにより K-means による複数のクラスタリング結果が、任意のあらさ(roughness index)で統合できることが確認された。しかし、同手法は属性値を K-means クラスタリング結果は、 K-meansのクラスタリング結果に依存し、画素の連結関係

を考慮しないものであった。

本文では、画素の連結関係を定量化する分離度を定義し、その分離度に基づくラフ集合論の $\alpha$ -同値関係を求めることで、新しい領域分割法を提案する。これにより $\alpha$ -同値関係の各カテゴリは、画素の連結関係が強いオブジェクトの集合となり、領域分割結果においては、画素の連結関係が強い画素をまとめた領域が得られる。実験では、BrainWeb[5][6]による計算機によりシミュレーション生成した頭部 MR 画像に適用し、本提案手法の有効性を評価する。

## 2. ラフ集合論のα-同値関係[3,4]

 $\alpha$ —同値関係とは、ラフ集合論における同値関係を、オブジェクト間の非類似度を用いて同値関係を定義したものである。オブジェクトの全体集合を  $U=\{x_1, x_2, ..., x_n\}$ としたとき、オブジェクト  $x_1$ に基づく $\alpha$ —同値関係は式(1)で定義される。

$$U/R_i(\alpha) = \left\{ \left\{ x_j \middle| d_P(x_i, x_j) \le \alpha \right\}, \left\{ x_j \middle| others \right\} \right\}$$
 (1) ここで  $d_P(x_i, x_i)$ は、 $x_i$ 、 $x_i$ 間の非類似度である。

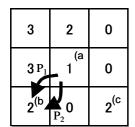
 $\alpha$ -同値関係はオブジェクト  $x_i$  との類似度の知識に基づく関係を表す。特に $\alpha$ =0の時、従来のラフ集合論における同値関係と同義となり、これを 0-同値関係と呼ぶ。また、 $\alpha$ が大きくなれば、よりあらく同値か否かを識別し、 $\alpha$ が最小値0の時、最も詳細に識別することから、 $\alpha$ を roughness index と呼ぶ。次に、 $\alpha$ -同値関係を  $R(\alpha)$ = $\{R_1, R_2,..., R_n\}$ とする時、 $\alpha$ -許容関係を次式で定義する。

$$U/TOL(\alpha) = \bigcup_{1 \le i \le n} [x]_{R_i(\alpha)}$$
 (2)

## 3. 画素連結関係に基づく領域分割法

## 3.1 画素連結関係の定量化

n 次元のハイパーキューブ(以下スペルと呼ぶ)により構成されたデジタル画像空間  $R^n$ について考え



	0	1	2				
	3	4	5				
	6	7	8				
to	<u>ブジェクト</u> 番号						

図1 スペルの分離度

る。ここでスペルとは、n=2 の時ピクセルを、n=3 の時ボクセルを指す。同空間中において、スペル c d の disconnectedness(分離度); $\tau(c,d)$ を次式により定義する。

$$\tau(c,d) = \begin{cases} \sum_{i=th_{\min}+1}^{th_{\max}} w_i & \text{if th}_{\min} \neq \text{th}_{\max} \\ 0.0 & \text{if th}_{\min} = \text{th}_{\max} \end{cases}$$

$$\begin{cases} th_{\max} = \min_{P_i \in P_{cd}} \left[ \max_{t_j \in T_i} \left[ I(t_j) \right] \right] \\ th_{\min} = \max_{P_i \in P_{cd}} \left[ \min_{t_j \in T_i} \left[ I(t_j) \right] \right] \end{cases}$$

$$(3)$$

ここで、スペル c、dを結ぶパスの全体集合を  $P_{cd}$ 、任意のパスを  $P_i \in P_{cd}$ 、パス  $P_i$ 上のすべての点集合  $T_i = \{t_0 = c, \ t_1, \ t_2, \ ..., \ t_i, ..., \ t_k = d\}$ 、点  $t_i$ の濃度値を  $I(t_i)$  とする。また  $w_i$  は濃度値 i の重みで、 $i = 0, \ 1, \ ..., \ N$  のとき、重み行列を  $W = \{w_0, \ w_1, \ ..., \ w_N\}$ と定義し、その総和を 1 とする。なお、disconnectedness は 以下の性質を持つ。

- 1.  $\tau(c,d) = \tau(d,c)$
- 2.  $\tau(c,c)=0.0$

disconnectedness はスペルの連結関係を表し、0 の時、注目するスペルは完全に連結している事を、また値が大きくなるにつれて連結性が減少するとを意味する。

例として、図 1(a)に示す濃淡画像(3×3 画素、値域 0-3)について考える。このとき、スペル a、b 間を結ぶパス P1 はパス上の最低濃度値が 1 に、最高濃度値は 3 となる。これは 1 以下のしきい値で 2 値化処理した時、同パス上の全スペルの値がしきい値以上であるため 1 となり(以下、all-1 と呼ぶ)、また 4 以上のしきい値で 2 値化処理した時、同パス上の全スペルの値がしきい値未満であるため 0 となる(以下、all-0 と呼ぶ)ことを意味する。

これをスペル a、b 間を結ぶすべてのパスに対し求めると、最低濃度値が最高となるパスの 1 例は  $P_1$ で、 $th_{min}$ は 1 となる。同様に  $th_{max}$ は 2 で、そのパスの一例が  $P_2$ である。すなわち、スペル a、b は、 $th_{min}$ =1 以下もしくは  $th_{max}$ =3 以上のしきい値で 2 値化したとき、1 つ以上のパスで all-0 若しくは all-1 となる。この場合しきい値 2 の 2 値化においては、いかなるパスにおいても all-0 もしくは all-1 にはならない。一方、スペル a、c 間は、 $th_{min}$ =0、 $th_{max}$ =2 となり、 $th_{min}$ =0 以下もしくは  $th_{max}$ =3 以上のしきい値で 2 値化したとき、1 つ以上のパスで all-0 若しくは all-1 となる。

表1 スペル間の分離度

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0.0	0.4	1.0	0.0	0.9	1.0	0.4	1.0	1.0
1	0.4	0.0	0.6	0.4	0.5	0.6	0.0	0.6	0.6
2	1.0	0.6	0.0	1.0	0.1	0.0	0.6	0.1	0.6
3	0.0	0.4	1.0	0.0	0.9	1.0	0.4	1.0	1.0
4	0.9	0.5	0.1	0.9	0.0	0.1	0.5	0.1	0.6
5	1.0	0.6	0.0	1.0	0.1	0.0	0.6	0.1	0.6
6	0.4	0.0	0.6	0.4	0.5	0.6	0.0	0.6	0.6
7	1.0	0.6	0.1	1.0	0.1	0.1	0.6	0.0	0.6
8	1.0	0.6	0.6	1.0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.0

0	0	1
0	1	1
0	1	2

図 2 領域分割結果(α=0.4)

ここで、重み行列 W= $\{0.0, 0.1, 0.5, 0.4\}$ とすると、スペル a、b 間および a、c 間の disconnectedness はそれぞれ、

$$\tau(a,b) = \sum_{i=1+1}^{2} w_i = 0.5$$
  
$$\tau(a,c) = \sum_{i=0+1}^{2} w_i = 0.1 + 0.5 = 0.6$$

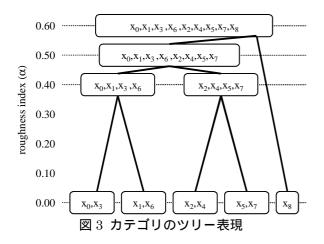
となり、同一の濃度値の組み合わせにも関わらず、スペル間のパスに従い異なる分離度が割り当てることができる。同様にすべてのスペルの組み合わせで算出した disconnectedness を表 1 に示す。

## 3.2 スペル間の分離度を用いたα-同値関係による領域分割

本提案手法では、各スペルをデータ、スペル間の分離度をデータ間の非類似度とした $\alpha$ -許容関係を求めることで、データ集合のカテゴリへの分割、すなわち領域分割を行う。例えば、図 1 の画像に対し、表 1 のような分離度が得られたとき、roughness index  $\alpha$ =0.4 とすると、式(1)により各スペルの同値関係は次のようになる。

$$U/R_0(0.4) = \{\{x_0, x_1, x_3, x_6\}, \{x_2, x_4, x_5, x_7, x_8\}\}$$
 $U/R_1(0.4) = \{\{x_0, x_1, x_3, x_6\}, \{x_2, x_4, x_5, x_7, x_8\}\}$ 
 $U/R_2(0.4) = \{\{x_2, x_4, x_5, x_7\}, \{x_0, x_1, x_3, x_6, x_8\}\}$ 
 $U/R_3(0.4) = \{\{x_0, x_1, x_3, x_6\}, \{x_2, x_4, x_5, x_7, x_8\}\}$ 
 $U/R_4(0.4) = \{\{x_2, x_4, x_5, x_7\}, \{x_0, x_1, x_3, x_6, x_8\}\}$ 
 $U/R_5(0.4) = \{\{x_2, x_4, x_5, x_7\}, \{x_0, x_1, x_3, x_6, x_8\}\}$ 
 $U/R_6(0.4) = \{\{x_0, x_1, x_3, x_6\}, \{x_2, x_4, x_5, x_7, x_8\}\}$ 
 $U/R_7(0.4) = \{\{x_2, x_4, x_5, x_7\}, \{x_0, x_1, x_3, x_6, x_8\}\}$ 
 $U/R_8(0.4) = \{\{x_8\}, \{x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}\}$ 
次に、式(2)を用いてα-許容関係を求めると、

 $U/TOL(0.4) = \{\{x_0, x_1, x_3, x_6\}, \{x_2, x_4, x_5, x_7\}, \{x_8\}\}$ となり、図 2 に示すような 3 領域に分割される。同様に、roughness index  $\alpha$ =0.0、0.5、0.6 とすると、次のように 5 個、2 個、1 個のカテゴリに分けられ、領域分割が行われる。



 $U/TOL(0.0) = \{\{x_0, x_3\}, \{x_1, x_6\}, \{x_2, x_4\}, \{x_5, x_7\}, \{x_8\}\}\}$   $U/TOL(0.5) = \{\{x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}, \{x_8\}\}$   $U/TOL(0.6) = \{\{x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8\}\}$ 

上記のように、本手法では roughness index αを様々に変化することで、詳細なクラスタリングから、雑なクラスタリングまで、任意のクラスタリング結果を得ることが出来る。しかし、実際の領域分割の使用においては、画像内でも場所により異なる roughness index で、クラスタリングすることが望ましい。

そこで、roughness index の変化に対するクラスタの統合状態をツリー状に表現した図 3 に注目する。同図は、roughness index を最小値 0 から、全オブジェクトが 1 つのカテゴリになるまで、徐々に大きくした場合のカテゴリの変化をツリー構造にしたものである。同図より、roughness index に対する各オブジェクトの階層関係がわかる。ここで、roughness index の変化に対し、カテゴリが変化しないものを安定したカテゴリ、また roughness index の小さな変化でカテゴリが変化するものを不安定なカテゴリと考え、各カテゴリの妥当性(category validity)を各枝の長さと定義し、category validity が大きいカテゴリより順に抽出することで、最終的なクラスタリング結果を得る。

### 3.3 計算機による disconnectedness の算出法

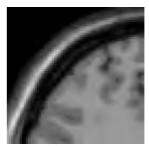
式(3)において、thmin はスペル c、d を結ぶあるパスにおいて、パス上のすべてのスペルがしきい値未満であるため、ラベリングによる同一ラベルが割り当てられる最大のしきい値、同様に thmax は最大のしきい値である。すなわち、式(3)において求められる disconnectedness は、しきい値処理、ラベリング処理によって同一のラベルが割り当てられないしきい値の重みを総和したものと同意である。したがって、分離度の算出は以下のように実現できる。

## [分離度の算出]

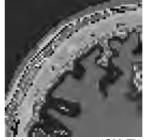
Step 0) 【初期化】

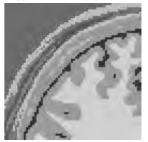
Set th=1, n=1, th<sub>max</sub>=画像中の最高濃度値 Step 1) 【しきい値処理】

しきい値 th 未満の画素値を持つスペルを 0、以



(a) 原画像





(b) クラスタリング結果

(c) 真値画像

図 4 頭部 MRI 画像への適用結果 1 ((a)MR 信号値を濃淡に、(b),(c)異なるラベルを異なる濃淡で表示)

上の画素値を持つスペルを1とする。

## Step 2) 【ラベリング】

画素値が N 近傍で連結するスペル群を順にラベル番号をつける。次に、スペルのラベル番号を、そのスペルにおける n 番目の属性値とする。

#### Step 3) 【繰り返し】

th が th<sub>max</sub> より小さい時、th と n にそれぞれ 1 加算し、step 1)に戻る。th が th<sub>max</sub> に達した場合、Step 4)に進む。

## Step 4) 【分離度】

画素 c、d 間の分離度は次式で計算される。

$$\tau(c,d) = \sum_{k=1}^{n} (w_k \times \lambda_{cd}^k)$$

$$\lambda_{cd}^k = \begin{cases} 0, & \text{if } a_k(c) = a_k(d) \\ 1, & \text{if } a_k(c) \neq a_k(d) \end{cases}$$

ここで、スペルcのk番目の属性値を $a_k(c)$ 、属性の重みを $w_k$ とする。

#### 4. シミュレーション結果

本文で提案したラフ集合論の $\alpha$ -同値関係に基づく領域分割法の性能を評価するため、BrainWeb[7,8]の計算機シミュレーションにより生成した T1 強調 MRI 画像に本提案手法を適用した。生成された画像は  $181 \times 217 \times 181$  画素で、生成に用いたスライス厚は 1 mm、印加ノイズは 3%、各組織の濃度分布の均質さを示す 1 NU は 20%とした。なお、本実験では、各画素値の重み行列 W は、文献[3][4]に示された各濃度値の画像内での頻出度を value reduct により求め、その頻出度に対応した値とする。

図 4 に、実験に用いた原画像の一例、本手法によるクラスタリング結果、真値画像をそれぞれ示す。これらの図より、本提案手法により真値画像

表 2 得られたクラスタの均質性

cluster num- ber	(0) BG	(1) CSF	(2) GM	(3) WM	(4) FAT	(5)/(6) Mus- cle/skin	(7) Skull	(8) Glial Matter	(9) Con- nective	total	homo- gene- ity(%)
11	759	34	4	0	42	33(4)	0	0	10	875	0.867
41	0	0	0	0	0	106(50)	0	0	0	106	1.000
43	0	0	0	0	0	72(72)	0	0	0	72	1.000
73	0	0	67	0	0	0(0)	0	0	0	67	1.000
74	0	0	451	0	0	0(0)	0	0	0	451	1.000
76	0	0	70	0	0	0(0)	0	0	0	70	1.000
82	0	0	83	1023	0	0(0)	0	0	0	1106	0.925
83	0	6	99	0	0	0(0)	0	0	0	105	0.943
Total	759	163	817	1035	73	19	426	0	180	4096	

に類似した領域分割が可能であることが確認できる。

クラスタリング結果を数値的に評価するため、 表 5 に所属画素数が 10 以上のクラスタと、真値画 像でのラベル番号との関係を示す。ここで、各ラ ベルにおいて最も多く属する真値ラベル(表中の太 字で示す)を、注目するラベルの所属する真値ラベ ルとすると、各ラベルの均質度は表のようになる。 ここで均質度(homogeneity)とは、所属する真値ラ ベルに属するボクセル数をそのクラスタの全ボク セル数で割ったものと定義する。すなわちクラス タリングによって得られたあるクラスタの全ボク セルがある真値クラスタに属する場合、最も高い 均質度 1.0 となる。なお、真値ラベル(5)、(6)につ いては MR 画像上ではその類別が不可能で真値ラ ベルにおいても混合モデルとして定義されている ため、2 つを加算したものとした。なお()内は真値 ラベル(5)への所属画素数である。同表より、各ク ラスタの均質度は平均 0.811 となり良好にクラス タリングが行えることが確認できた。特に、頭部 MR 画像の処理で最も重要な白質、灰白質について は、白質の 99.8%がクラスタ 7 で、灰白質の 84.1% がクラスタ 4,5,6,8 で認識された。

## 6. まとめ

本文では、画素連結関係を定量化する分離度 (disconnectedness) を提案し、 disconnectedness によるα-同値関係に基づく画像の領域分割方法を提案した。また、ラフ集合論におけるα-同値関係に基づくオブジェクト統合のツリー表現、 category validity を示した。

実験では、本提案手法の評価を行うため、頭部T1\*MRI 画像で、真値が既知のシミュレーション画像に本手法を適用し、真値画像との比較を行った。実験の結果、高い均質度で真値画像と対応するクラスタが抽出可能であることが確認できた。しかし、本手法は過分割の傾向があり、画素数を考慮した category validity の改良、もしくは分割後のクラスタ統合などの処理が必要であると考えられる。

## 謝辞

本研究の一部は医療法人仁寿会石川病院の助成を受けて行ったものである。

## 参考文献

- [1] M. Zhang, L. O. Hall, and D. B. Goldgof, "A Generic Knowledge-Guided Image Segmentation and Labeling System Using Fuzzy Clustering Algorithms," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. Part B, Cybernetics, Vol. 32, No. 5, pp. 571-582, 2003.
- [2] C. D'Elia, G. Poggi, and G. Scarpa, "A Tree-Structured Markov Random Field Model for Bayesian Image Segmentation," IEEE Trans. on Image Processing, Vol. 12, No. 10, pp. 1259-1273, 2003.
- [3] T. Matsuura, S. Kobashi, K. Kondo, Y. Hata, "An Image Classification Based on new Similarity Measure in Rough Sets," Proc. of 1st Int. Conf. on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), Vol. 1, pp. 197-201, Nov. 2002.
- [4] T. Matsuura, S. Kobashi, Y. Hata, and K. Yamato, "Image Segmentation with Clustering Based on Rough Sets," The Second Korea-Japan Joint Symposium on Multiple-Valued Logic pp. 23-26, Aug. 2001.
- [5] http://www.bic.mni.mcgill.ca/brainweb/
- [6] R. K.-S. Kwan, A. C. Evans, and G. B. Pike, "MRI simulation-based evaluation of image-processing and classification methods," IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol. 18, No 11, pp. 1085-1097, Nov 1999.

### 連絡先:

小橋昌司

兵庫県立大学大学院工学研究科電気系工学専攻 電子情報部門 情報システム研究室

〒671-2201 姫路市書写 2167 Phone + Fax: 0792-67-4989 E-mail: kobashi@ieee.org

## 加算乗算ニューラルネットワークのための結合型進化的局所 学習法とその画像圧縮・再構成への応用

Hybrid Evolutionary-Local Learning for Additive-Multiplicative Neural Networks and its Application to Image

Compression and Reconstruction

延原 肇, Eduardo Masato Iyoda, 柴田卓司, 川本一彦, 吉田真一, 廣田薫

## 東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻

Tokyo Institute of Technology

Abstract: A method for image compression and reconstruction based on a multiplicative neural network is proposed. The network architecture is composed of an input layer, one single hidden layer, and an output layer. The single layer is composed of classical additive neurons, whereas the output layer is composed of translated multiplicative neurons ( $\pi_t$ -neuron). The learning algorithm employs a genetic algorithm (GA), to avoid premature convergence to poor local minima, associated with a conjugate gradient backpropagation algorithm, to fine the solution found by GA. Experiments performed on the Standard Image DataBAse (SIDBA) confirm that the proposed compression/reconstruction method can improve the quality of the reconstructed images, in comparison with traditional multiplicative networks.

## 1 はじめに

計算機性能の向上、および高速広域帯通信回線の 整備により、大量の静止・動画像を取り扱う必要性が 高まっている。これら大量の静止・動画像を効果的に 処理・伝送するための代表的な方法として国際標準化 JPEG[4] があり、その非可逆圧縮部には離散コサイ ン変換 (DCT) が採用されている。DCT は、不特定 の自然画像群に対しては有効に機能するが、一方で、 対象画像群がある程度特定できる場合には、対象画 像群に特化した符号・復号器を用いて圧縮・再構成を 行う方が良い場合もある。この一つの有望なモデル として、ニューラルネットワークによる画像圧縮・再 構成法がある。本論文では、乗算型の $\pi_t$ ニューロン [2]、および従来の MLP (Multi Layer Perceptron) 使用されている σ ニューロンを組み合わせた加算乗 算ニューラルネットワークに基づく画像圧縮・再構 成法を提案し、さらに学習法として遺伝的アルゴリ ズム (GA) と誤差逆伝播法 (BP) を組み合わせた学 習法を提案する。

## 2 加算乗算ニューラルネットワー クを用いた画像圧縮・再構成

ニューラルネットワークによる画像圧縮・再構成で は、原画像をブロックに分割し(図1) これらを1

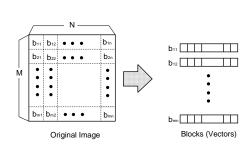


図 1: 画像のブロック化

次元ベクトルとみなしてニューラルネットワークの入力層と出力層に与え、学習を行う(図2)。学習後のニューラルネットワークに原画像を入力として原画像を入力とし層のニューロンの出力および中間層のニューロンの出力および中間層のにき、これが画像圧縮に対応する。また、圧とと画像を中間層のニューロンの出力および中間層の間のパラメータとして与えることにより画像を得ることができ、これがリークを明がら再構成画像を得ることができ、これがリークを明がら再構成とは入力層とした画像を得るでき、ニューラルネットを構成するという教師付望されてリーラルネットを構成するという教師付き習います。

問題に帰着させることができる。原画像のサイズを $M \times N$  画素とし、この画像を縦にm等分、横にn等分し、 $m \times n$  個の等サイズブロックに分割するので、一つのブロックの画素数はMN/mnとなる。これを $m \times n$  個のMN/mn次元ベクトルとみなし、ニューラルネットワークの入力および出力に与える学習データとする。圧縮画像は(中間層のニューロン数)+(中間層と出力層の間のパラメータの総数)である。

ı

Input Output b<sub>11</sub> b<sub>11</sub> Ш ПП b<sub>12</sub> σπ<sub>t</sub> Neural b<sub>12</sub> ΤП Network b<sub>mn</sub> b<sub>mn</sub> Blocks (Vectors) Blocks (Vectors) Parameter Adjustment t Comparison Original Image

図 2: 画像圧縮・再構成問題における学習過程

本論文で画像圧縮・再構成に使用するニューラルネットワークのモデル (図 3) は、中間層を 1 層持つ 3 層構造である。中間層に用いるニューロンは  $\sigma$ ニューロン、出力層に用いるニューロンは  $\sigma$ により提案された移動乗算型の ニューロンである。同一層内のニューロン同士の結合はなく、他の層との結合はフィードフォワード型の全線結合である。また、 $\sigma$ ニューロンでの計算に使うバイアス 1 を入力層に持つ。このニューラルネットワークのモデルにおい

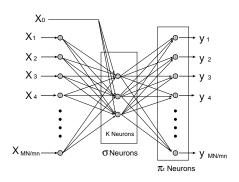


図 3: 加算乗算ニューラルネットワーク

て、入力層のニューロン数を MN/mn 個、中間層のニューロン数を k 個とすると、これら中間層の出

力は

$$\nu_{\alpha} = \sum_{i=1}^{MN/mn} w_{i\alpha} x_i \quad (\in R)$$
 (1)

$$l_{\alpha} = f(\nu_{\alpha}), \quad (\alpha = 1, 2, \dots, k), \quad (\in R)$$
 (2

と定式化できる。ここで  $x_1,x_2,\dots,x_{MN/mn}$  は入力、入力  $x_i$  と中間層のニューロン  $l_j$  を結ぶ重みのパラメータを  $w_{ij}$  としたときの重みは  $w_{11},w_{22},\dots,w_{MN/mn}$ 、 $v_{\alpha}$  は各内部活性レベル、 $l_{\alpha}$  は各中間層ニューロンの出力を表す。 $f:R\to R$  は入出力関数である。ネットワークの出力は

$$u_{\beta} = b \prod_{i=1}^{k} (l_i - t_{i\beta}), \quad (\in R)$$
 (3)

$$y_{\beta} = f(u_{\beta}), \quad (\beta = 1, 2, \dots, MN/mn) \quad (\in R)$$

$$(4)$$

と定式化される。ここで中間層ニューロン  $l_i$  と出力  $y_j$  を結ぶ重みを  $t_{ij}$  としたときの重みは  $t_{11}, t_{21}, \ldots$  ,  $t_{kMN/mn}$ 、b は倍率、 $u_\beta$  は各内部活性レベル、そして  $y_\beta$  は出力を表す。 $f:R\to R$  は入出力関数である。ネットワークの学習法としては Iyoda によって提案された手法 [2] があり、これは学習則に誤差逆伝播法としてスケーリング付き勾配法を用いている。この方法については局所解への収束を回避するという点で改良の余地があり、本論文ではその改良法として遺伝的アルゴリズム (GA) と誤差逆伝播法 (BP) を組み合わせた学習法を提案する。

## 3 GAとBPによる学習方法

BP は局所解に陥りやすいという欠点があるが、問 題を適当な評価関数の最小化として定式化し、評価 関数の勾配(偏微分)を用いてパラメータの微小修 正を繰り返すので、厳密な極値を求めたい場合には 効果的である。逆に、GA は他の最適化手法と異な リ勾配データを必要としないため、評価関数が微分 不可能な場合でも適用できる。また、複数の解につ いて並列的に調べていくため、局所安定には陥りに くい。一方、ブラインドサーチであるため、最適解 付近でより良い解を探索するのは不得意であり、必 ず最適解を求めなくてはならないという場合には適 さない。そこで本論文では局所的最適解の探索を長 所として持つ BP と、局所解への収束を回避すると いう長所を持つ GA を組み合わせた学習法を提案す る (図 4)。 先ず GA による学習、次に BP による学習 を行う。GAとして単純遺伝的アルゴリズム[3]を用 いる。提案学習法の染色体表現については、遺伝子

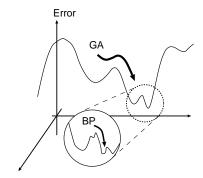


図 4: 提案学習法による探索の様子

は実数とし、その長さは(入力層と中間層の間の全パラメータ)+(中間層と出力層の間の全パラメータ)である。この長さをとするとと定式化できる(図5)。染色体の初期化は一様分布乱数で行う。適応度は原画像のデータと出力データとの最小二乗誤差とする。

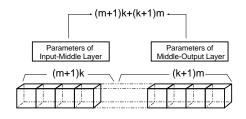


図 5: 提案学習法における染色体表現

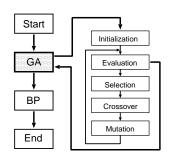


図 6: 提案学習アルゴリズム

# 4 SIDBAを用いた画像圧縮・再構成実験

 に変化させた場合の平均二乗誤差

$$E = \sum_{k=1}^{mn} E_k \tag{5}$$

$$E_k = \sum_{i=1}^{MN/mn} (\hat{y}_i^{(k)} - y_i^{(k)})^2 \qquad (\in R) \quad (6)$$

を計測する。ここで  $E_1, E_2, \ldots, E_{mn}$ ( $\in$ は原画像をブロック化した各ブロック、  $\hat{y}_1^{(k)},\hat{y}_2^{(k)},\dots,\hat{y}_{MN/mn}^{(k)}(\in R)$  は原画像の ブ ロックのデータ、はニューラルネットワークの ブ ロックの出力を表す。染色体の値の範囲は-1から1 の実数、染色体の長さは (33k+16) である。実験環 境は C、および C++で作成する。図 7 の原画像に ついて、従来法(加算乗算ニューラルネットワーク を BP で学習) と提案法 (加算乗算ニューラルネット ワークを GA+BP で学習) で得られた再構成画像を 図8に示す。学習方法の面から見ても、GAとBP を組み合わせることにより従来法の局所解の問題を 解決できている。図9-11に、原画像と提案手法で 得られる再構成画像の比較を示し、表1に平均2乗 誤差の比較を示す。図 9 - 11 から、提案画像圧縮モ デルが、JPEG で採用されている DCT とは異なり、 高周波成分を含む対象画像にも有効に機能している ことがわかる。



図 7: 原画像 Lenna





図 8: 再構成画像, 従来法 (左) E=0.0027, 提案法 (右) E=0.0091, 中間層ニューロン数 =5

## 5 おわりに

本論文では乗算  $\pi_t$  ニューロンおよび加算  $\sigma$  ニューロンを組み合わせた加算乗算ニューラルネットワー





図 9: 原画像 (左), 提案法による再構成画像 (右), 中間層ニューロン数 = 7, RMSE = 0.0082





図 10: 原画像 (左), 提案法による再構成画像 (右), 中間層ニューロン数 = 8, RMSE = 0.0021

クに基づいた画像圧縮・再構成法を提案し、さらに、加算乗算ニューラルネットワークの学習法として局所 安定に陥りにくい遺伝的アルゴリズムと、局所的最 適解の探索に有効な誤差逆伝播法を組み合わせた手 法を提案している。SIDBA(Standard Image Data-BAse) より選択した 12 枚のグレースケール画像の画像圧縮・再構成実験を通して、提案モデルと従来モデル [2] の再構成画像の比較を行い、本手法の有効性を示している。本論文ではグレースケール画像のみを対象としたが、今後カラー画像を対象としたが、今後カラー画像を対象としたが、今後カラー画像を対象としたが、今後カラー画像を対象としたが、今後カラー画像を対象としたが、今後カラー画像を対象としたができる。

## 参考文献

[1] D. B. Fogel: "The Advantatges of Evolutionary Computation", Bio-Computing and Emer-





図 11: 原画像 (左), 提案法による再構成画像 (右), 中間層ニューロン数 = 8, RMSE = 0.0021

表 1: RMSE 比較

ニューロン数	4	5	6	7
airplane	0.0185	0.0141	0.0111	0.0095
barbara	0.0222	0.0156	0.0122	0.0082
boat	0.0089	0.0054	0.0045	0.0043
bridge	0.0412	0.0322	0.0271	0.0243
building	0.0135	0.0103	0.0066	0.0065
cameraman	0.0232	0.0188	0.0147	0.0145
girl	0.0072	0.0064	0.0049	0.0043
lax	0.0434	0.0333	0.0285	0.0243
lenna	0.0111	0.0091	0.0081	0.0063
lighthouse	0.0322	0.0294	0.0204	0.0165
text	0.0294	0.0204	0.0178	0.0151
woman	0.0116	0.0085	0.0068	0.0061

gent Computation 1997, D.Lundh, B.Olsson, and Narayanan (eds.), Skove, Sweeden, World Scientific Press, Singapore, pp.1-11, 1997

- [2] E. M. Iyoda, H. Nobuhara, and K. Hirota: "Translated multiplicative neuron: An extended multiplicative neuron that can translate decision surfaces", Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, To Appear.
- [3] Z. Michalewicz: "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", 3rd Ed., Springer, pp.1-31, 1996
- [4] G. K. Wallace, "The JPEG still picture compression standard," *Communication ACM*, vol. 34, no. 4, pp.30-44, 1991.

### [問い合わせ先]

〒 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 東京工業大学大学院総合理工学研究科

### 延原 肇

$$\label{eq:continuous} \begin{split} \text{Tel:} 045\text{-}924\text{-}5682, & \text{Fax:} \ 045\text{-}924\text{-}5676 \\ \text{E-mail:} & \text{nobuhara@hrt.dis.titech.ac.jp} \end{split}$$

## ファジィの概念を導入した一般化ハフ変換による ぼやけた画像からの任意図形抽出

Arbitrary Shape Extraction by using Generalized Hough Transform with Fuzzy Concept

末竹 規哲 内野 英治 平田 可奈恵 Noriaki Suetake Eiji Uchino Kanae Hirata 山口大学

Yamaguchi University

**Abstract:** A generalized Hough transform is an effective method for an arbitrary shape detection in a contour image. However, the conventional generalized Hough transform can not be applied well for a noisy and blurred image. This paper describes a generalized fuzzy Hough transform, which enables a detection of arbitrary shape in a very noisy, blurred, and even distorted image. The effectiveness of the present method has been confirmed by some preliminary experiments.

## 1 はじめに

自然画像や人工画像から特定の図形を検出する問題は、画像認識における重要な課題である。相似変換不変な任意図形検出法として、一般化ハフ変換 (GHT)[1], geometric hashing[2], Chord-Tangent 変換 [3] がある。しかし、これらの方法は、処理時間の観点から実用的とはいえず、また、画像にノイズが含まれる場合や図形の輪郭がぼけている場合には、直接的には図形検出問題へ適用できなかった。これらの問題を解決するために、高速一般化ハフ変換 (FGHT)[4] が提案されている。この手法は、[1]-[3] の手法よりも高い耐ノイズ性を有し、対象画像がある程度ノイズに汚された場合においても目的の図形検出が可能である。しかし、対象画像が多量のノイズで汚されている場合や、図形そのものがぼやけている場合には効果的に図形を検出することができなかった。

本報告では、上記問題点を解決するために、FGHT にファジィ概念を導入した一般化ファジィハフ変換 (GFHT) を提案する. さらに、計算機シミュレーションによって本手法の有効性を確認する.

## 2 高速一般化ハフ変換

## 2.1 高速一般化ハフ変換のアルゴリズム

高速一般化ハフ変換 (FGHT) は、Chord-Tangent 変換 [3] を拡張したものであり、そのアルゴリズムは回転、伸縮、移動に対する不変特徴を用いたテンプレー

トマッチングに基づいている. 具体的には,線分近似処理,拡張 C表の生成,図形検出の3つの手順から成る. 以下にそのアルゴリズムを示す.

**線分近似処理** 輪郭線画像からなるテンプレートT, 対象画像Iに対する線分近似処理のアルゴリズムを以下に示す.

- (i) T, I を適当な大きさのブロック  $(B \times B \operatorname{ms})$  に分割する.
- (ii) それぞれのブロックで線分近似する.
- (iii) 得られた線分画像をそれぞれ線分の集合  $\{T_{0i}\}$ ,  $\{I_{0j}\}$  とする.
- (iv)  $\{T_{0i}\}$  と  $\{I_{0j}\}$  の中から,長さが  $s_{th}$  以上の線分を抽出し,それらを改めて  $\{T_i|i=1,2,\cdots,M\}$ , $\{I_j|j=1,2,\cdots,N\}$  とする.

拡張 C 表の生成 図 1 に示すように,テンプレート T の内部に任意の参照点  $R = (R_x, R_y)$  をあらかじめ 設けておき,拡張 C 表を以下の手順で生成する.

- (i)  $\{T_i\}$  からコード長  $L_c$  が  $L_c \ge L_{th}$  となる二つの線分  $T_a$ ,  $T_b$  を選択し、以下の特徴量を求める.
  - ・ コードの角度  $\beta(\in [0,2\pi))$
  - ・2線分とコードで作られる三角形の内角  $\delta_a, \delta_b$
  - ・コードの中点  $m=(x_m,y_m)$  から参照点 Rへのベクトル  $\vec{t}=(t_x,t_y)$

表 1: 拡張C表

番号	不変特徴	チェック点		コード		参照点へのベクトル	
1	$\delta_a(1), \delta_b(1)$	$\tau_c(1)$	$(c_x(1), c_y(1))$	$L_c(1)$	$\beta(1)$	$(t_x(1), t_y(1))$	
2	$\delta_a(2), \delta_b(2)$	$\tau_c(2)$	$(c_x(2), c_y(2))$	$L_c(2)$	$\beta(2)$	$(t_x(2), t_y(2))$	
			• • •		• • •	•••	

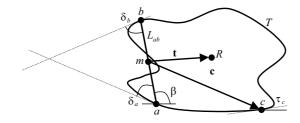


図 1: FGHT におけるテンプレート.

- (ii)  $\{T_i\}$  から  $T_a$ ,  $T_b$  以外にもう一つの線分  $T_c$  を選択し、点m から線分  $T_c$  の中点  $c=(c_x,c_y)$  を求める。ここで、 $T_c$  はノルム  $\parallel T_c \parallel$  が  $c_{len}$  以上のものであり、点c を点a、b に関するチェック点とする.
- (iii) 得られた特徴量  $L_c$ ,  $\beta$ ,  $\delta_a$ ,  $\delta_b$ ,  $t_x$ ,  $t_y$ ,  $c_x$ ,  $c_y$ ,  $\tau_c$  を用い,表 1 に示す拡張 C 表を生成する.  $\tau_c$  は,チェック点の線分  $T_c$  の方向角である.
- (iv)  $\{T_i\}$  内の可能なすべての線分対について (i) から (iii) を繰り返す.

#### 図形検出 以下に図形検出の手順を示す.

- (i) 回転、伸縮、移動量を表す 4 次元配列  $A(\theta, \kappa, x_r, y_r)$  を用意し、全配列要素を 0 にする.
- (ii)  $\{I_j\}$  からコード長  $L_c{}^I$  が  $L_c{}^I \geq L_{th}{}^I$  となる二つの線分  $I_a$ , $I_b$  を選択し、特徴量  $\beta^I$ , $\delta_a$ , $\delta_b$  を算出する.
- (iii) 以下に示す式を満たす  $\delta_a$ ,  $\delta_b$  を拡張 C 表の中から抽出し、それらの表番号の集合を  $\{n_k \mid k=1,2,\cdots\}$  とする.

$$|\delta_a^I - \delta_a| \le \Delta_{th}$$
  $|\delta_b^I - \delta_b| \le \Delta_{th}$  (1)

(iv) 表番号  $n_k$  に登録されている特徴量をそれぞれ  $L_c(n_k)$ ,  $\beta(n_k)$ ,  $t_x(n_k)$ ,  $t_y(n_k)$ ,  $c_x(n_k)$ ,  $c_y(n_k)$ ,  $\tau_c(n_k)$  とし、処理対象としているコードの中点を  $(x_m{}^I,y_m{}^I)$  とする. その後、すべての  $n_k$  について

$$\theta = \beta^I - \beta(n_k) \tag{2}$$

$$\kappa = L_c^I / L_c(n_k) \tag{3}$$

$$\begin{pmatrix} x_c(n_k) \\ y_c(n_k) \end{pmatrix} = \kappa \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_x(n_k) \\ c_y(n_k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_m^I \\ y_m^I \end{pmatrix}$$
(4)

によりチェック点  $(x_c(n_k), y_c(n_k))$  を求める.

(v) I において、画素位置  $(x_c(n_k), y_c(n_k))$  の上下左右に  $\Delta C$  画素だけ広げた範囲を走査し、この範囲内に線分が存在して、その方向角  $\tau^I$  が以下の式

$$|\tau^{I} - \tau_{c}(n_{k}) - \theta| \leq \Delta_{th} \tag{5}$$

を満たした場合のみ, 次の (vi) に進む. それ以外の場合は, (ii) に戻る.

(vi) 以下に示す式によって、検出対象図形の参照点が存在する推定位置  $(x_r,y_r)$  を算出し、これと  $\kappa$ 、 $\theta$  に対応する配列要素  $A(\theta,\kappa,x_r,y_r)$  に 1 を加算 (投票) する.

$$\begin{pmatrix} x_r \\ y_r \end{pmatrix} = \kappa \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_x(n_k) \\ t_y(n_k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_m^I \\ y_m^I \end{pmatrix}$$
(6)

(vii)  $\{I_j\}$  内の可能なすべての線分対に対して (ii) から (vi) を繰り返す. 最後に, 投票空間 A を走査し, しきい値以上の要素を投票値の高い順に選び, 図 形の検出を行う.

#### 2.2 高速一般化ハフ変換の問題点

FGHT は、ある程度ノイズに汚された画像からでも任意図形を検出することが可能である。例として、図2(a) のような画像を考える。点6 は、孤立雑音の影響を受けた近似線分の中点である。この場合の投票配分

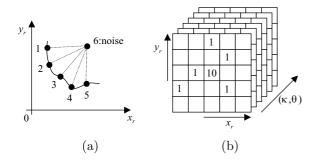


図 2: FGHT における孤立したノイズの影響. (a) 輪郭線の近似線分の中点と孤立したノイズの影響を受けた近似線分の中点. (b) 投票空間  $(\kappa, \theta, x_r, y_r)$  への投票の分散.

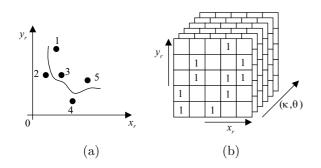


図 3: 広範囲に分布したノイズの影響. (a) ノイズの影響を受けた近似線分の中点. (b) 投票空間  $(\kappa,\theta,x_r,y_r)$ への投票の分散

は、図 2(b) のようになる. 図より、特徴点6とその他の点との組み合わせに対する投票が分散していることがわかる. しかし、特徴点1から5の点のそれぞれの組み合わせに対する投票が特定の空間に集中しているので、投票空間から最も大きい投票値を取り出してくることは容易である. これはピーク値の検出、つまり、図形の検出において孤立雑音の影響を受けないことを意味する.

一方,図 3(a)の場合を考える.図 3(b)で示されるように、各特徴点の組み合わせに対する投票は、投票空間上で広く分布している.図形の輪郭がぼやけると、投票は広く分散し、ピーク値を検出することが困難になることがわかる.したがって、FGHTでは、図形の輪郭がぼけている場合は任意図形を検出することが困難となる.

## 3 一般化ファジィハフ変換

ノイズに汚された画像から任意図形を検出する一般 化ファジィハフ変換 (GFHT) について述べる. GFHT は、FGHT と同様に線分近似処理、拡張 C 表の生成、

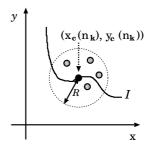


図 4: GFHT におけるグループ  $C_k$ .

図形検出の3つの手順からなる. GFHT と FGHT の相異点は、図形検出手順の(vi)だけである. GFHT では、この手順(vi)にファジィの概念を導入する.

具体的には、GFHTでは、 $(x_c(n_k), y_c(n_k))$ から R 画素離れた範囲を  $C_k(\boxtimes 4)$  とし、 $C_k$  内の近隣の黒画素の影響を考慮するために、 $C_k$  内の黒画素に対し  $(x_c(n_k), y_c(n_k))$  からの距離に応じてメンバーシップ値を与える。メンバーシップ値は、 $(x_c(n_k), y_c(n_k))$  に近いほど大きく、遠いほど小さくなるものとし、ここでは、 $C_k$  内の黒画素に対して、

$$m(r) = \exp(-r^2/s^2) \tag{7}$$

とする. 式 (7) において, r は  $(x_c(n_k), y_c(n_k))$  と近隣黒 画素の距離, s は定数である. さらに,  $(x_c(n_k), y_c(n_k))$  周辺の黒画素の影響を考慮し,

投票値 = 
$$\sum$$
[メンバーシップ値] (8)

として投票処理を行う.以上より,ぼやけた画像の特 徴点から任意図形の検出が可能となる.

## 4 シミュレーション結果

ここでは、ノイズに汚された画像からの歪んだ星型の検出に GFHT を適用した。実験に用いた画像を図5(a), (b) に示す。図5(a), (b) は,それぞれテンプレートとノイズに汚された対象画像である。実験において、パラメータは B=8(画素),  $s_th=L_{th}=10$ (画素),  $\Delta_{th}=\pi/18$  とした。また,図形の検出では,投票値の高い順の第2 候補までを選んだ。FGHT の結果を図5(c) に示す。図に示すように,FGHT では同じ投票値の図形が2つあったため,3つの図形が検出されている。GFHT(提案手法,s=2) の結果を図5(d) に示す。図より,2つの歪んだ星型の検出に成功していることがわかる。

さらに、ノイズに汚されたぼやけた画像からの任意 図形の検出に GFHT を適用した. 対象画像を図 6(a) に示す. テンプレートは図 5(a) と同じ画像を用いた.

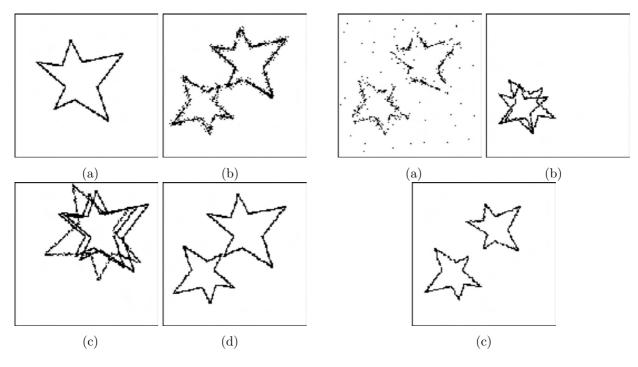


図 5: ノイズに汚された画像からの任意図形検出. (a) テンプレート. (b) ノイズを含む入力画像. (c) FGHT による検出結果. (d) GFHT による検出結果 (提案手法).

図 6: ノイズに汚されたぼやけた画像からの任意図形 検出. (a) ノイズを含みぼけた入力画像. (b) FGHT に よる検出結果. (c) GFHT による検出結果 (提案手法).

パラメータは  $L_{th}$  だけを 20(画素) に変更し、その他は上述のものを用いた。FGHT、および GFHT により得られたシミュレーション結果を図 6(b)、(c) に示す。図より、歪んだ星型の検出において、幾分か大きさの面で精度が下がるものの GFHT(提案手法) が FGHT より優れていることがわかる。

## 5 おわりに

本論文では、一般化ファジィハフ変換 (GFHT) を提案した.これは、高速一般化ハフ変換 (FGHT) の投票 手順にファジィ概念を導入したものであり、ノイズに 汚されたぼけた画像からでも、任意図形を効果的に検出することが可能である.

今後の研究課題は、より複雑な図形に対する検出精度の向上や、細胞診などの実問題への応用である.

## 参考文献

- D. H. Ballard, "Generalizing the Hough Transgorm to Detect Arbitrary Shapes," Pattern Recognition, Vol.13, No.2, pp.111-122, 1981.
- [2] Y. Lamdan and H. J. Wolfson, "Geometric

Hashing: A General and Efficient ModelBased Recognition Scheme," Proc. of ICCV, pp.238-249, 1988.

- [3] T. E. Dufresne and A. P. Dhawan, "Chord-Tangent Transformation for Object Recognition," Pattern Recognition, Vol.29, No.9, pp.1321-1331, 1995.
- [4] 木村彰男, 渡辺孝志, "高速一般化ハフ変換ー相似変換不変な任意図形検出法一," 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No. 4, pp.726-734, 1998.

#### 問い合わせ先

〒 753-8512

山口県山口市吉田 1677-1 山口大学理学部自然情報科学科 末竹 規哲 (すえたけ のりあき) TEL (083) 933-5703

FAX (083) 933-5273

E-mail suetake@sci.yamaguchi-u.ac.jp

## 生体神経回路網調製のための電気的刺激による制御技術の探求

Methods to manipulate spatiotemporal patterns stored in living neuronal networks cultured on a microelectrode array.

工藤 卓 Suguru N. Kudoh

田口 隆久 Takahisa Taguchi

産業技術総合研究所/ 科学技術振興事業団 AIST/PRESTO, JST 産業技術総合研究所 AIST

Abstract: The brain performs sophisticated functions such as learning, emotion and so on by modulating synaptic efficacy in the neuronal network. Long lasting synaptic potentiation is the most thoroughly investigated phenomenon of activity-dependent synaptic plasticity. In dissociated neurons, we induced a long lasting synaptic potentiation, and found out that functional connections between neurons in the living neuronal network was changed dynamically by a transient increase of electrical activities of the whole neural network. We also find that it is possible to operate the spatio-temporal patterns autonomously stored in this neural network by electrical inputs. The high frequency stimulation (HFS), which is known to trigger long-term potentiation in vivo, was suitable for that manipulation. We dare to make a biological neuronal network to behave in the way of artificial neuronal network. Simply, we assumed a current injection through an electrode to be cue for recall a stored pattern, and assumed spatiotemporal pattern of evoked electrical activities to be a stored pattern. We tried to make an association of a particular activity pattern with another pattern by simultaneous recall of stored pattern. After HFS, One of the divided subsets of patterns frequently merged to another one suggested that particular cue stimulation linked to two-stored pattern simultaneously. Although these are still preliminary results, they have suggested that it is possible to operate the information processing in a neural network by the external electrical inputs.

#### 1. はじめに

神経細胞は複雑な神経回路網を形成して高次 情報処理機能を発現する。神経回路網が担う情 報処理については、生理的な状況に近いものか ら応用に適化した数々のモデルが提唱されてお り、生物が環境を認識するものと近い様式で入 力されたパターンを識別するネットワークモデ ルは実用的にも有用である。これらのネットワークモデルは実用的にも有用である。これらのネットワークモデ れた神経素子モデルを構成要素として用いてい るものもあり、実際の生体神経回路網の挙動が こうした人工神経回路モデルとどの程度整合性 があるのか検証されている例は少ない。

細胞外電位多点測定電極上の解離培養系は、 生きた神経細胞の分子機能を操作しながら、同時に全体的な神経回路網の電気活動を捉えることができる系であり、個々の神経細胞の内部状態を見据えながら回路網全体の情報処理過程の解析を行うのに最適な系である。人工神経回路 モデルの動作を検証するプラットフォームとしても有用であると考えられる。

そこで、この細胞外電位多点測定電極上に再構築された生体神経回路網を用いて、刺激により誘発される活動電位の時空間パターンを、神経ネットワークに蓄積されたパターンと見なしてこれを操作することを試みた。最終的には、生体神経回路網を用いて、人工神経回路網が実現するようなパターン認識が行えるかという逆説的な検討を行う。

#### 2. 実験方法

ラット海馬解離培養系はすでに報告した手法によっている[1,2]。動物実験のすべての手続きについて、産業技術総合研究所 関西センター動物実験ガイドラインに準拠している。以下に概要を示す。基本的に一般的な手法によっている。胚令 17 から 18 日のラット胎児から海馬を

取り出して、トリプシン処理により解離、5%牛胎児血清と10%馬血清を含むD-MEM/F12 培地中で 14~20 日培養したものを電気生理学的実験に用いている。

神経回路網の解析には、細胞外電位多点計測システム(MED64、アルファメッドサイエンス社製[3])を用いた。多点電極皿である MED プローブ上に神経細胞を培養し、自律的に形成された神経回路網を対象にした。多点電極から刺激点電極を選択して定電流刺激を行い、誘発された神経回路網の活動電位スパイクを記録した。解析は、独自に開発した解析ソフトウェア(MEDFAUST)を用いて信号の傾きを主な指標とするアルゴリズムにより活動電位を検出した。自発的活動電位の解析の場合は、k-means 法を利用した手法により全自動でクラスターカッティングを行い、得られた信号を単一神経細胞由来とみなせるクラスターに分類した。

#### 3. 結果・考察

解離培養された神経回路網は培養日数の経過に伴い、複雑な神経回路網を形成する(図1)。

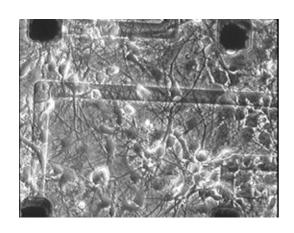


図1 生体神経回路網の一例

こうして再構成された生体神経回路網は刺激を全く加えなくても自律的に電気活動を行い [4,5]、その時空間パターンを概観すると、緩やかに分離されたいくつかのサブネットワークによって構成されていることが伺える(図2)

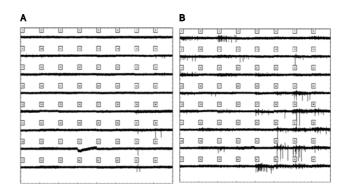
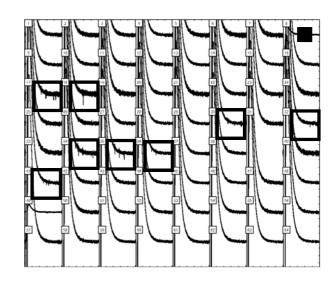


図 2 異なる時刻で記録された同一の生体神経回路 網の自発的活動電位

多点電極の内から一点を選択して定電流刺激を行い、誘発された活動電位を図3に示す。一つの生体神経回路網においても、刺激点が異なる場合は誘発される活動電位の空間パターンは異なっており、この生体神経回路網がサブネットワークに分離されていることを反映していると考えられる。図3において、異なる刺激点からの電流刺激に対し、活動電位が共通して誘発される部位があるが、これらは独立したサブネットワークが弱い結合をしている結節点であるかもしれない[6,7]。

この例のように、二つの刺激点でそれぞれ独立して誘発される神経回路網に対し、これら二つの刺激点から同時に高頻度定電流刺激を行った。高頻度刺激は、シナプス伝達効率を増強することが知られているので、この刺激がそれぞれの刺激点に連なるパスウェイにおいてシナプス増強を引き起こすことを想定した。



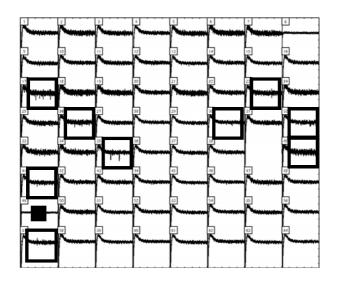


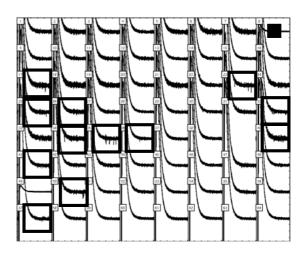
図3 異なる刺激点により誘発された同一の生体神経回路網における誘導活動電位。10回のテスト刺激による波形をアベレージングしたもの。

高頻度同時刺激後の誘導活動電位を図4に示す。上パネルの刺激電極による誘導活動電位は、空高頻度同時刺激前と比較して分布が大きく変更を受けているのが明確に示されている。これに対し、下パネルでは、変化は小さい。高頻度刺激前の誘導活動電位パターンと比較してみると、高頻度刺激後の上パネルの刺激点からの刺激による誘導活動電位パターンは、高頻度刺激前において二つの刺激点によりそれぞれ誘導された活動電位空間パターンを融合したようなパターンに変化していることが確認できる[8]。

各刺激点により誘発される活動電位パターンが、それぞれの刺激に対応する「記憶」であるとすると、高頻度同時刺激によりこれらの記憶が関連するものとして連合され、一方の刺激によって同時に想起しているように解釈できる。

これらは未だ予備的な結果ではあるが、人工神経回路網のパターンの連想記憶に似たような情報処理が、実際の生体神経回路網においても実現可能であることを示唆するものである。

もともと、生体の神経回路も挙動をモデル化 して記述された人工神経回路網の動作は、単純 化、理想化されたものではあるが、確かに実際 の生体神経回路網の動作に相応した情報処理を 行っている可能性が高い。



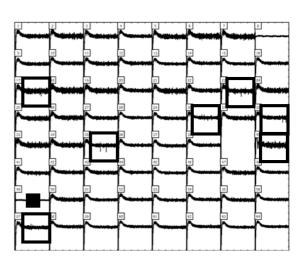


図4 高頻度同時刺激後に、10回のテスト刺激による波形をアベレージングしたもの。

今回提示したデータは、生体内で構成された神経回路網を一度解離して人工的な環境下に再構築したものである。今後、神経細胞が構成する回路網の接続を自由に制御することができれば、生体の神経細胞を用いた回路に設計通りの情報処理を実行させることができる可能性がある。

#### 参考文献

[1]Kudoh SN, Kiyosue K, Taguchi T. A synaptic potentiation by a protein factor distinct from those induced by neurotrophins. Int J Dev Neurosci. 20(1):55-62. (2002)

[2]Kudoh SN, Nagai R, Kiyosue K, Taguchi T.

PKC and CaMKII dependent synaptic potentiation in cultured cerebral neurons. Brain Res. 915(1):79-87. (2001)

[3]Oka H, Shimono K, Ogawa R, Sugihara H, Taketani M.

A new planar multielectrode array for extracellular recording: application to hippocampal acute slice J Neurosci Methods. 93(1):61-7. (1999)

[4]Kudoh SN, Matsuo A, Kiyosue K, Kasai M, Taguchi T. Long-lasting enhancement of synaptic activity in dissociated cerebral neurons induced by brief exposure to Mg<sup>2+</sup>-free conditions.

Neurosci Res. 28(4):337-44. (1997)

[5]Kudoh SN, Kiyosue K, Kasai M, Taguchi T. Synaptic potentiation induced by a protein factor in cultured cerebral neurons. Cell Mol Neurobiol. 19(5):575-85. (1999)

[6] Jimbo Y, Kawana A, Parodi P, Torre V. The dynamics of a neuronal culture of dissociated cortical neurons of neonatal rats. Biol Cybern 83(1):1-20. (2000)

#### [7] Tateno T, Jimbo Y.

Activity-dependent enhancement in the reliability of correlated spike timings in cultured cortical neurons. Biol Cybern.Biol Cybern. (1999) 80(1):45-55.

[8] Kudoh SN and Taguchi T.

Operation of spatiotemporal patterns stored in living neuronal networks cultured on a microelectrode array Journal of Advanced Computational Intelligence & Intelligent Informatics (JACI3)

In press

#### 連絡先:

〒563-8577 大阪府池田市緑丘 1-8-31 産業技術総合研究所 人間系特別研究体 ニューロニクス研究グループ

工藤 卓

電話: 072-751-9524 FAX: 072-751-9628

Email: s.n.kudoh@aist.go.jp

## 円移動知覚に関する脳内処理部位の 等価電流双極子推定による同定

# Localization of brain activity during perception of disk movement by equivalent current dipole analysis

山ノ井 髙洋 Takahito Yamanoi 北海学園大学工学部 豊島 恒 Hisashi Toyoshima 株式会社情報科学センター 山崎 敏正 Toshimasa Yamazaki 理化学研究所 遺伝子多型研究センター RIKEN SNP Research Center

Hokkai Gakuen University

Information Science Research Center Co.,Ltd

**Abstract:** A moving white disk on a CRT was presented to subjects. Moving patterns were downward, upward, rightward and leftward. A random movement of the disk was presented to subjects in comparison of other movements. These five movements were presented at random to the subjects. Meantime, electroencephalograms were recorded. The data was summed in each movement and the equivalent current dipole localization (ECDL) was done to estimate the source. From the results, the dipoles were estimated on the MT at latency from 80ms to 120ms, and after on the intraparietal sulcus, on the precentral gyrus and on the frontal eye field.

#### 1. はじめに

ヒトが物体を見る際に,物体の動きは初期にはMT野および頭頂間溝 Intraparietal Sulcus: IPS)で処理されると言われている.本研究では,CRTに提示された円の動きに対する反応がこれらの処理に引き続き,どの部位でおこなわれているかについて,脳波測定装置を用いて計測した事象関連電位に対し,等価電流双極子推定法(ECDL)を試み解析を行った.

#### 2. 事象関連電位計測実験方法

本実験は暗室内で測定を行った.背景を黒とした CRT (分解能 1,024×768 画素)上に直径 50 画素(19mm)の白色の円を提示した.円の移動パターンは CRT の中央を上端から下端へ,左端から右端へ,下端から上端へ,右端から左端への移動の4つを準備し,それぞれ50ミリ秒単位で40 画素ずつ画面上の位置をずらし,被験者からは一定速度の移動として知覚されるように変化させた.またこれらの移動パターンとの比較用の提示として CRT 上のランダムな位置に円が移動する視覚刺激のパターンを提示した.これらの5つの提示パターンを各 30 回,合計150回を順不同で被験者に提示した.

被験者として22歳の男子学生3名を対象として6回の実験を行った.被験者は脳波測定用の19ch電極キャップを装着し,顔面固定器によりCRTの中心が被験者の眼と正対するように位置を固定した.各動きのパターンの最初の円がCRTに提示された時刻から3秒間の脳波を測定した.

#### 3. 等価電流双極子解析

測定された脳波に対して移動方向別に加算平均を求めた.4方向それぞれの移動に対する加算平均後の脳波データに対して等価電流双極子推定法を用いて脳内処理部位の推定を行った.脳波データのダイポール解析は市販のソフトウェア(SynaPointPro,日本GEマルケット)を利用した.脳波測定装置からの入力が19chであるため,ダイポール解析では最大3個のダイポール推定が可能である.解析では3個のダイポールを仮定し,推定を行った.解析は被験者の方向別に行い,推定されたECDの位置と潜時を比較した.

#### 4. 本実験の解析結果と考察

各移動方向別の脳波の加算平均とランダム移動提示時の脳波の加算平均との差を求め,その差の大きな潜時を基準としてダイポール推定を行った結果,潜時 80~120ms で MT 野に ECD が推定された.潜時 140~180ms では IPS に ECD が推定され,潜時 210ms 以降で中心前回 (Precentral Gyrus: PG)に,さらに前頭視覚野 (Frontal Eye Field: FEF)で ECD が推定された (Table 1). この傾向は潜時に 20~40ms のばらつきはあるものの,被験者および移動の向きに関わらず観察された(Table 2). しかしながら被験者 MT と被験者 MH とでは,ほぼ同じ潜時で ECD が推定されたにも関わらず,推定された位置は左右対側であった(Fig.2~9).

推定されたECDより 本実験の刺激はMT野, IPS の後に中心前回の運動野とされている付近 で運動のイメージが処理された後,前頭視覚野 にいたる可能性が考えられる.今後,さらに被験者を増やし検討を行ってゆきたい.

Table 1 Relationship between estimated source and its latency [ms] (Subject: MT)

Movement Direction	MT	IPS	PG	FEF	
Downward	119	179	238	232	
Rightward	102	168	229	249	
Upward	81	147	226	235	
Leftward	88	164	214	230	

Table 2 Relationship between estimated source and its latency [ms] (Subject: MH)

Movement Direction	MT	IPS	PG	FEF	
Downward	117	157	244	214	
Rightward	97	143	229	233	
Upward	85	176	225	261	
Leftward	114	178	243	210	

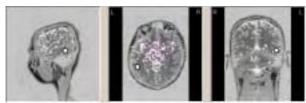


Fig.2 An ECD localized to the left MT at 119 ms (Subject: MT): Downward



Fig.3 An ECD localized to the left IPS at 179 ms (Subject: MT): Downward



Fig.4 An ECD localized to the left PG at 238 ms (Subject: MT): Downward



Fig.5 An ECD localized to the left FEF at 232 ms (Subject: MT): Downward

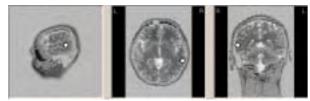


Fig.6 An ECD localized to the right MT at 117 ms (Subject: MH): Downward



Fig.7 An ECD localized to the right IPS at 157 ms (Subject: MH): Downward



Fig.8 An ECD localized to the right PG at 244 ms (Subject: MH): Downward



Fig.9 An ECD localized to the right FEF at 214 ms (Subject: MH): Downward

#### 参考文献

- [1] 山ノ井 髙洋, 豊島 恒, 山崎 敏正: 円移動 の視覚刺激処理に関する脳内部位の推定,第 56 回形の科学界シンポジウム,形の科学会 誌第18巻第2号,pp.163-164,2003
- [2] Takahiro Yamanoi, Masaaki Saito, Michio Sugeno and Elie Sanchez: Difference in Areas of the Brain for Fuzzy and Crisp Calculation, Journal of Advanced Computational Intelligence Vol.6 No.1, 51-55, 2002

#### 連絡先:

山ノ井 髙洋 北海学園大学工学部電子情報工学科 〒064-0026 北海道札幌市中央区南

〒064-0926 北海道札幌市中央区南 26 条西 11 丁目 1-1

Phone: 011-841-1161 (ext.7874) E-mail: yamanoi@eli.hokkai-s-u.ac.jp

## 視差の異なるランダムドットステレオグラムに対する 脳内処理過程の比較検討要領

### Estimation of brain activities for random-dot stereograms with different disparities

豊島 恒 Hisashi Toyoshima (株)情報科学センター Information Science

**Research Center** 

Co.,Ltd

山ノ井 髙洋 Takahiro Yamanoi 北海学園大学工学部

Hokkai Gakuen University 山崎 敏正 Toshimasa Yamazaki 理化学研究所

遺伝子多型研究センター

RIKEN SNP Research Center 大西 真一 Shin-ichi Ohnishi 北海学園大学工学部

Hokkai Gakuen

University

**Abstract:** The authors recorded event-related potential (ERP) to random-dot stereogram (RDS) by the electroencephalogram (EEG). And the peak latency of the EEG near P300 was investigated and the position of the response in the brain was detected by the dipole estimation. Three type RDSs were made according to binocular disparities. They are middle, large and no disparity. We estimated the region of dealing with spatial recognition in the brain.

#### 1. はじめに

ヒトが奥行きを認知する際に最大の手がかり となるものは両眼視差である、時分割液晶シャ ッター眼鏡を用いて Random-dot stereogram (以下 RDS)による立体的な視覚刺激を提示し, この刺激を被験者が観察する際の脳波を測定す る実験を行った. 先行研究で著者らの一部は等 価電流双極子推定法により,立体視に関わる脳 内処理部位が頭頂葉に関係していると推定した. また RDS の視差別に全被験者の grand average 波形を比較したところ ,頭頂葉に ECD が推定さ れた潜時よりも後の潜時において各チャネルの 波形が交差し収束する潜時が観察され、この潜 時はRDSの視差が大きい場合に遅れて観察され た.本研究ではこの潜時に着目し, RDS の視差 別にこの潜時以前での脳内処理部位の推定を行 った.

#### 2. RDS による立体視認識時の脳波測定

本実験は暗室内で,時分割液晶シャッター眼 鏡および垂直シンクロナイザーを用いてRDS画 像を提示することで立体的な刺激として測定を 行った. 視覚刺激提示の視差 は0,10,30画 素の3種類とし,この刺激を3秒間提示し,こ の際の脳波を19チャネルの電極キャップを介し て測定した.同時に,提示された RDS が立体と して認識されたかの記録を行った.被験者は20 ~22歳の正常な視覚を有する9人の学生である CRT に提示した RDS が立体的であると被験 者が認識した際の脳波に対して提示視差別に加 算平均を行い,加算平均された波形に対して等 価電流双極子推定を行った.脳波データの双極 子推定は市販のソフトウェア (SynaPointPro, 日本 GE マルケット)を利用した.本実験では 脳波は19チャネルの入力であり最大3個の双極

子推定が可能である.解析は3双極子での推定 を行った.

#### 3. 立体視認識時の双極子推定結果

被験者別に加算平均後の波形を比較した結果 grand average 波形の収束する潜時とは異なる 潜時で脳波の収束がそれぞれ観察されたが,各 被験者について視差別に収束する潜時を比較すると grand average 波形と同様に提示視差が大きくなるに従って収束する潜時が遅れていくことが確認された.加算平均後の波形に対して,提示視差の存在する刺激と存在しない刺激の差を求め,その差の大きな潜時前後での双極子推定を行った結果,P300と思われる潜時以降のピークでは頭頂葉に ECD が推定された(Fig.2,Fig.3).このピーク潜時は提示視差が大きい場合に遅くなっていることが観察された.

その後のピーク潜時についても同様に推定を行った結果,脳波が収束する潜時よりも前の潜時では MT 野および前頭眼野 (Frontal Eye Field: FEF)に ECD が推定された(Fig.4, Fig.5).また頭頂葉に ECD が推定された潜時以降では推定された ECD が下前頭回 (Inferior Frontal Gyrus: IFG) および中前頭回 (Middle Frontal Gyrus: MFG)に多く集中していた(Fig.6).一方,収束後のピークでは MT 野に ECD 推定された.この傾向は提示視差によらず推定され,提示視差が大きい場合に遅くなっていることが観察された.

#### 4. 考察

脳波が収束する潜時よりも前ではFEFおよびMT野にECDが推定された.一方,脳波が収束する潜時以降ではFEFにECDは推定されていない.このことから,立体視の認識過程では頭

頂葉で処理がなされた後,MT野およびFEFで処理がなされ,脳波が収束するまでの間で認識処理がなされている可能性が考えられる.

また脳波が収束する以前の潜時で推定された ECDがMFGおよびIFGに集中している.FEF を含むこれらの部位で何らかの空間認知に関係 する処理がなされている可能性がある.

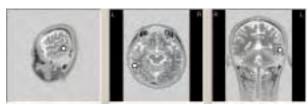


Fig.1 An ECD localized to the left MT at 186ms (Subject KN): =10 pixel



Fig.2 An ECD localized to the Parietal Lobe at 382ms(Subject KN): =10 pixel

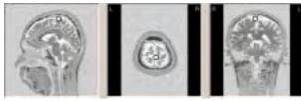


Fig.3 An ECD localized to the Parietal Lobe at 439ms(Subject KN): =30 pixel



Fig.4 An ECD localized to the left FEF at 586ms (Subject KN): =10 pixel



Fig.5 An ECD localized to the left FEF at 655ms (Subject KN): =30 pixel



Fig.6 ECDs localized to left MFG

## 参考文献

- [1] 斎藤正明,山ノ井髙洋,大西真一,山崎敏正: 両眼立体視の脳内情報処理過程·事象 関連 電位の双極子解析による検討·,医用電子 と生体工学,39巻4号,pp.312-317,2001
- [2] B. G. Cumming & A. J. Parker: Response of primary visual cortical neurons to binocular disparity without depth perception, Nature, 389, pp.280-283, 1997
- [3] I. Ohzawa, G. C. DeAngelis & R. D. Freeman: Stereoscopic depth discrimination in visual cortex: neuron ideally suited as disparity detectors, Science, 249, pp.1037-1041, 1990
- [4] T. Yamazaki, K. Kamijo, A. Kenmochi, S. Fukuzumi, T. Kiyuna & Y. Kuroiwa: Multiple equivalent current dipole source localization of visual event-related potential during oddball paradigm with motor response, Brain Topogr., 12-3, pp.159-175, 2000
- [5] K. Kamijo, T. Kinuya, Y. Takaki, A. Kenmochi, T. Tanigawa & T. Yamazaki: Integrated approach of an artificial neural network and numerical analysis to multiple equivalent current dipole source localization, Front. Med. Biol. Eng., 10-4, pp.285-301, 2001
- [6] J. S. Mosher, P. S. Lewis & R. M. Leahy: Multiple dipole modeling and localization from spatio-temporal MEG data, IEEE Trans. Biomed. Zeng., 39, pp.541-557, 1997

#### 連絡先:

豊島恒

株式会社情報科学センター

〒001-0021 北海道札幌市北区北 21 条西 3 丁目

1-14

Phone: 011-737-9157 Fax: 011-737-9159

E-mail: toyosima@isrc.co.jp

## fMRI による場所法での記憶想起時における脳賦活部位の比較

fMRI Study on Activation of Brain Regions in Recalling Tasks by the Method of Loci

市橋秀友,本多克宏 Hidetomo Ichihashi, Katsuhiro Honda 大阪府立大学 Osaka Prefecture University

荒木昭一 Shoichi Araki 松下電器産業株式会社 Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

**Abstract:** A brain mapping in recalling long term memories consolidated by mnemonics called the Method of Loci was carried out using fMRI experiments. Activated brain areas in recalling sentences consolidated by long term rehearsal and short term rehearsal, in English and in Japanese, and idioms and places (loci) were compared. The fMRI signals analyzed by SPM99 reveal substantial role of visual cortex.

#### 1. はじめに

脳機能の機能磁気共鳴画像装置(functional magnetic resonance imaging, fMRI)を用いた研究は,教育効果や加齢に伴う脳機能の低下防止といった観点からも行われるようになっている.その中でも,記憶に関する研究は主要なテーマと考えられる.

本研究では、記憶術として知られている場所法での精緻化リハーサルによって、長期に固定された英文センテンスの想起時の脳賦活部位を特定することを目的とした、被験者(著者の一人)が場所法とメンタルリハーサルにより記憶した英文センテンスをもとに想起再生時のfMRIでの計測を行い、SPM99 (Wellcome Department of Cognitive Neurology, UCL, UK)[1,2]を用いて賦活部位についての統計的な解析を行った。

#### 2. 脳賦活部位の比較

被験者は 54 歳右利き男性で,過去 3 年間に毎日約 1 時間程度の場所法とメンタルリハーサルによって記憶した 10 語程度からなる 2800 の英文センテンスをもとに想起再生時の計測を行った. 図 1 に 6 つの実験セッションでの賦活部位をレンダリング図で示す.図 1 の(a),(b),(c),(f),(g),(h)は長期的なリハーサルで十分固定された記憶の場合で,t値の閾値は 5.0 である.(d)は英文センテンスの短期的なリハーサルの場合で,t値の閾値は 3.1 であり,(e)は 単語のみの短期的なリハーサルの場合で,t値の閾値=3.1,(f)は場

所のみの想起, (g)は和文センテンス, (h)は動詞句のみの想起の場合でである.図1に各実験セッション毎の結果をまとめる.

#### 3.1 視覚提示を用いる実験

実験セッション1と2では,タスクブロックとして,英文センテンスを対応する番号とともに15秒毎に視覚提示する.被験者は提示されたセンテンスから,対応する場所を想起し,つづいて,次の番号(+1)の場所を想起し,さらに,対応するセンテンスを想起・再生する.ただし,発声は行わない.タスクブロックは30秒で,2件の英文センテンスを 15秒毎に視覚提示する.コントロールブロックではタスクブロックで提示したものと同じセンテンスを提示し,被験者はそれをゆっくり黙読する.提示時間は15秒で2件提示するので合計30秒である.視覚提示英文センテンスの例を以下に示す.

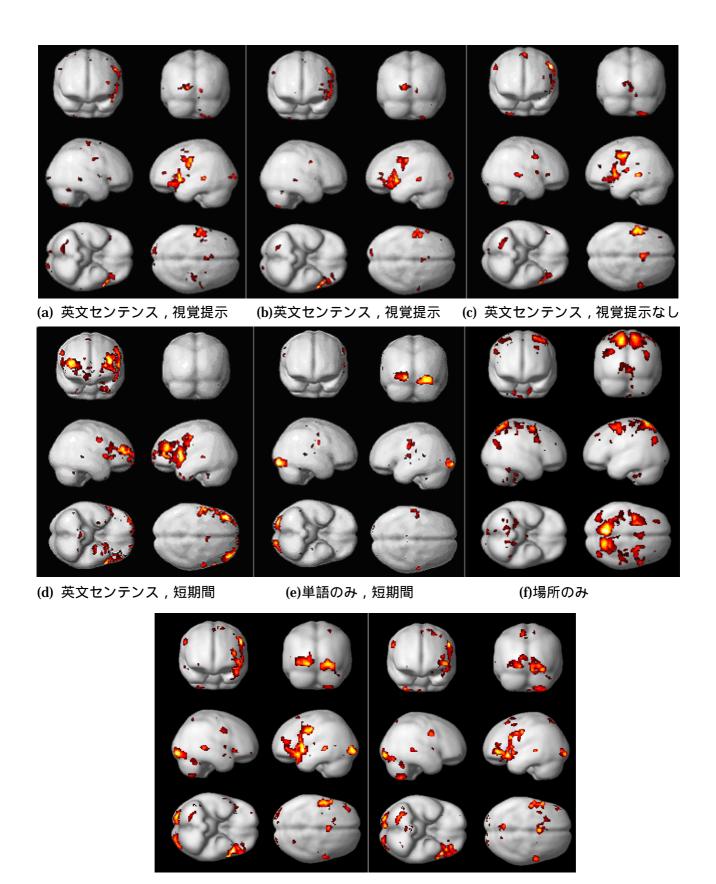
#### [実験セッション1と2]

578. Mr. Samson couldn't withstand the onset of the media attack.

582. Household conservation tips include closing off unused rooms and insulating roofs.

Mr. Samson couldn't withstand the onset of the media attack.

Household conservation tips include closing off unused rooms and insulating roofs.



(g)和文センテンス (h)動詞句のみ 図 1 8 つの実験セッションでの結果のレンダリング

左脳の外側溝前部の前頭頭頂弁蓋に位置する 運動言語野 BA44 には広い賦活部位が存在し文法 処理にも関わると考えられる[3].三角部 BA45 から眼窩部 BA47,さらに外側溝を経て前部側頭葉新 皮質の BA22 Talairach 座標の(-52,10,-4), BA38(-48,18,-12)に賦活部位が広がっている.ま た脳溝を内部に進み島領野に広い賦活部位がある.被殻の一部(-22,2,0)に小さな賦活部位が,2 回の実験セッションで共通して現れている.z方向に1cm,x-y方向にそれぞれ5mm程度の範囲である.

優位半球の上側頭回背側後部の一部(BA22の後部,狭義ウエルニッケ領域の内側部)に活性化した部分が存在するが,聴覚中枢全体には広がっていない.後頭葉のBA17 (primary visual area)の視覚皮質の回りの視覚連合野(BA18, 19)が,優位半球側で比較的広い範囲で賦活している.

視覚提示はタスクブロックとコントロールブロックで共通であるために視覚野は賦活部位としては現れないと考えられるが,次節の目を閉じて行った実験セッション3でも同様に視覚野が活性化していることから,視覚中枢が場所法による視空間的イメージの想起に強く関連していることがわかる.

#### 3.2 目を閉じて視覚提示を用いない実験

目を閉じて行った実験セッション 3 は 1501 番から 10 番飛ばしで 1991 番までの 50 のセンテンスを想起した.各 30 秒間のタスクブロックは初めと 15 秒目のそれぞれ 2 回のブザー音で知らされた.コントロールブロックは同様に初めと 15 秒目に 1 回ずつのブザー音で知らされ,次の場所だけを 30 秒間想起した.1501 から 1991 番は実験日の1年半前から半年前にリハーサルを開始したたセンテンスである.実験中は被験者は目を閉じていたが,15 秒ごとに液晶スクリーンに以下の各行が提示され,25 分間のセッション全体で 2~3回目を開け番号の確認を行った.

#### [実験セッション3]

1531 active 2

•

表1 実験セッション2と3の比較

	2)視覚提示 を用いる実験			3)目を閉じた 実験				
	左					脳	右	脳
	R	Н	R	Н	R	Н	R	Н
10,前頭葉中前頭回								
4,6,一次,二次								
運動野								
44,45,47,ブローカ野								
13,島領野								
11,眼窩部								
22,38,上側頭回								
21,上側頭回狭義								
ウエルニッケ野								
17,一次視覚野								
18,19,視覚連合野								
6,補足運動野								
24,帯状回前部								
30,帯状回後部								
28,34,海馬傍回								
被殼								

図2に目を閉じて行ったセッション3のSPMによる解析結果のセクション図(t値の閾値5.0)を示す.表1はセッション2と3における主要な賦活部位をまとめたもので,左の列の番号はBA領野の番号を示している.また,Rの列はt値が閾値5.0以上の賦活領域の広がりを示しており,

は直径が約 10mm 以上, は直径が約 5mm から 10mm, は約 5mm 以下であることを示している. H の列は t 値の最大値が, は 10 以上, は 7 以上 10 未満, は 4 以上 7 未満であることを表している.表 1 に示すように,目を閉じて行った想起実験でも視覚野が賦活し,その他の部位も両セッションで,大きな差は認められなかった.場所法を用いる記憶では視空間的イメージの想起に視覚野が活性化していると考えられる.

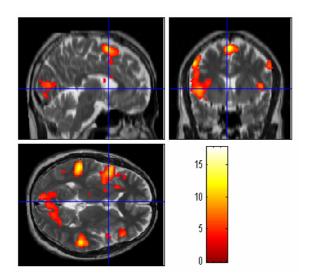


図 2 目を閉じ視覚提示を用いない実験セッション 3 での賦活部位

#### 3.3 短期的なリハーサルでの実験

次に,1週間以内のリハーサルのみで場所法を用いて記憶した英文センテンス 25個を想起する実験セッション4を行った.特に最後の10件(10分間)は実験日前の2日間に記憶したセンテンスである.実験日の朝にもリハーサルを行っており長期間リハーサルを行った場合と同様に想起は比較的容易であったが,想起にやや時間がかかるため1件を30秒間に想起した.実験中は15秒ごとに以下の各行が液晶スクリーンに提示された.

#### [実験セッション4]

2681. active 1 2681. active 2

rest 1 犯罪者と付き合っている

rest 2 犯罪者と付き合っている

2682. active 1 2682. active 2

.

長期に固定されたセンテンスの想起に比べて, 短期的な精緻化リハーサルのみでの想起では,ゆっくりとした想起になり賦活部位が現れにくいため t 値の閾値を低くしている.視覚野の反応が現れていないが,BA10,9の前頭葉の前前頭皮質が広くかつ両側で賦活している点が顕著な差である.長期に固定されていないと広い範囲の前頭葉の活躍が必要になりワーキングメモリ[4,5]が働いていると考えられる.図3(t 値の閾値は3.1)と表2左に実験セッション4での賦活部位を示す.

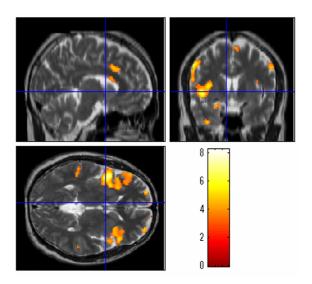


図 3 短期間のリハーサルによる英文センテンスでの実験セッション 4 における賦活部位

#### 3.4 単語のみの短期的なリハーサルでの実験

実験セッション 5 では 2 週間以内のリハーサルで場所法を用いて記憶した牛,鳥などの体の部位に対応する食肉の名称や魚,野菜類の名称の英単語 75 個のうちの 50 個を順に想起した.タスクブロックとして 15 秒毎に視覚提示される連続した番号に対応する場所を順に想起して単語ひとつずつをゆっくりと想起した.想起後は次の番号が提示されるまで維持リハーサルを行った.コントロールブロックの 30 秒間は日本語を受動的に読むだけで英単語の想起は行っていない.

実験中は 15 秒ごとに以下の各行が液晶スクリーンに提示された.

[実験セッション 5]

2617. active

2618. active

rest もも肉(鶏肉,七面鳥)

rest 手羽先 (鶏肉,七面鳥)

2619. active

2620. active

.

表 2 右は実験セッション 5 での主要な賦活部位をまとめている.この場合も固定期間は 2 週間以内で比較的短期間であるが,15 秒間に 1 語ずつ想起したので視覚的イメージと単語を関連付けるための視覚野がよく賦活した.強い賦活が眼球にも現れた.海馬の一部に弱い賦活部位がある点が他のセッションとの相違点である.

表2 実験セッション4と5の賦活部位

	4)センテンス		5)単語のみ			<b>,</b>		
	左					脳		
	R	Н	R	Н	R	Н	R	Н
10,46,前頭葉中前								
頭回								
4,6,一次,二次運動野								
44,45,47,ブローカ野								
13,島領野								
11,眼窩部								
22,38,上側頭回狭義								
ウエルニッケ野								
17,一次視覚野								
18,19,視覚連合野								
6,補足運動野								
24,帯状回前部								
30,帯状回後部								
楔前部								
海馬								
41,42,側頭葉,								
聴覚中枢								
3,体性感覚野								
20,36,鉤								

#### 3.5 場所だけの想起実験

セッション 6 の 25 分間は 1001 から 1500 番までの 30 秒間に 20 箇所ずつの場所だけの想起をタスクブロックとし,コントロールブロックは各タスクブロックの最後に想起した場所を想起しつづけた.どちらも 15 秒間に 1 から 10 までの数を数えながら行った.被験者は実験中目を閉じて想起した,タスクブロックでは開始時と 15 秒目にブザーを 2 回ずつ,コントロールブロックでは開始時と 15 秒目に1 回ずつ聴覚提示した.ヘッドホンでブザー音を聞いてタスクかコントロールかを確認した.ただし,時間はどちらも 30 秒とし,タスクブロックとコントロールブロックを 30 秒間ずつ交互に行った.

実験中は 15 秒ごとに以下の各行が液晶スクリーンに提示された.

[実験セッション6]

この場合は頭頂葉の BA7 に顕著な賦活部位が現れた.また BA6,8 の運動前野や BA17,18,19 の一次視覚野,視覚連合野に広い賦活部位がある.言語野が賦活されないため左右差があまり現れていない.帯状回前部の一部は右脳でのみ活性化した.

#### 3.6 和文センテンスの場合と動詞句の場合

実験セッション 7 では 1001 番から 1050 番までのセンテンスを日本語で記憶してそれを順に想起した.タスク課題は 2 回のブザー音で始まり 15 秒間に 1 件を想起する.次の 15 秒間も 2 回のブザー音で始まる.コントロール課題は最後に想起した場所のみをイメージし内言が起こらないように努めた.ただし,想起済みのセンテンスが再度想起されるなど多少の内言は発生した.視覚提示は以下のようにし,番号順の想起であるため視覚提示はほとんど必要が無く,被験者は受動的に眺めるだけに努めた.2 件のセンテンスを飛ばしたため最終番号は 1052 番であった.対応する英文のリハーサル期間は 1 週間である.

実験中は 15 秒ごとに以下の各行が液晶スクリーンに提示された.

[実験セッション 7]

**1001.** active

**1002.** active

rest

rest

1003. active

1004. active

図 4 にセクション図を示す . t 値の閾値は 5.0 である 実験セッション 1~3 とほぼ同様の領野で , やや強く賦活した .

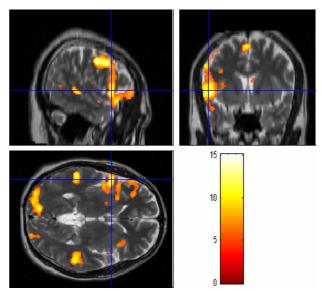


図8 日本語センテンスでの実験セッション7の結果

実験セッション 8 では,実験セッション 7 と同じ聴覚提示と視覚提示を用いて,想起は 2401 番から 2600 番までの 200 件の動詞句を番号順に想起した.被験者は各 30 秒間のタスク課題中はできるだけ多くの動詞句を番号順に想起するように努めた.25 分間の実験セッションで 230 件を想起した 最後の 30 件は 2401 番から繰り返した.視覚提示は受動的に眺めるだけとした.この場合もコントロール課題は最後に想起した場所のみをイメージし内言が起こらないように努めた.ただし,多少の内言は発生した.この場合も実験セッション 1~3 とほぼ同様の領野で,やや強く賦活した.セッション 6 の場所だけの想起と類似のタスクも実行されているがその賦活領野は顕著には出ていない.

#### 4. 実験結果の考察

場所法記憶の想起時における賦活部位はブローカ野から前部側頭葉新皮質および島領野に亘る広い範囲,上側頭回背側後部の一部(狭義ウエルニッケ野),1次視覚野から,視覚連合野および帯状回の後部に位置する部分が賦活した.多くのセンテンスや動詞句を次々と想起する場合は,共通して不随意運動の監視に関連する被殻が関係した.また,視覚提示を用いた場合と,目を閉じて視覚提示を用いなかった場合,和文の場合,動詞句のみの場合の5つの実験セッションとも共通した賦活部位が得られた.しかし,1次視覚野と視覚連合野の賦活度合いには,実験セッション毎

に差が認められた.

2 週間程度の短期的なリハーサルでは視覚野よりも左脳の前頭前野 BA46 が広く賦活し,言語ワーキングメモリー[4,5]との関連が考えられる.

いずれの場合も,場所法による記憶には視覚野が重要な役割を果たしていることが示唆された.

#### 5. おわりに

実験中のコントロールブロックは長期記憶への移行過程である可能性がある.特に前頭前野や側頭葉において,位相遅れの大きな応答が観測されており,エピソード記憶との関連[6]や長期固定との関連を究明することが今後の課題である.

#### 引用文献

[1] K. J. Friston, A. Holmes, K. Worsley, J. Poline, C. Frith and R. Frackowak; Statistical Parametric Mapping, A general linearapproach, Human Brain Mapping, vol.2, pp.189-210(1995) [2] R. S. J. Frackowiac et al.; Human Brain Function, Academic Press, California (1997) [3] D. Embick, A. Marantz, Y. Miyashita, W. O Neil, and K. L. Sakai; A syntactic specialization for Broca s area, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 97, 6150-6154(2000)

[4]芋阪直行編著;脳とワーキングメモリ,京都 大学出版会(2000)

[5]芋阪直行編著;意識の認知科学,共立出版 (2000)

[6] S. F. Nolde, M. K. Johnson and C. L. Raye; The role of prefrontal cortex during tests of episodic memory, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.2, No.10, (1998)

#### [連絡先]

599-8531 堺市学園町 1-1

大阪府立大学大学院工学研究科電気·情報系専攻 経営工学分野 市橋秀友

TEL 0722-54-9352(FAX 兼用)

FAX 0722-54-9915(分野事務室)

E-mail ichi@ie.osakafu-u.ac.jp

## ファジィ正準相関分析によるfMRIデータの解析

市橋秀友, 本多克宏

荒木昭一

Hidetomo Ichihashi, Katsuhiro Honda

Shoichi Araki

大阪府立大学

松下電器産業株式会社

Osaka Prefecture University

Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

Abstract: In the fMRI study, the functional responses of the brain differ from region to region, and are little more complicated than the simple boxcar waveform or more sophisticated but single hemodynamics response function. Fuzzy Canonical Correlation Analysis (FCCA) is developed, which can detect wave form of each voxel and minimize the effect of false activity such as the inner speech during control epochs. This makes it possible to design elastic experimental and control blocks. A brain mapping in recalling long term memories consolidated by mnemonics called the Method of Loci was carried out using fMRI experiments. The fMRI signals were analyzed using SPM99 and the FCCA together with fuzzy c-means (FCM) clustering. The clustering results reveal the functional specialization of Broca's area and visual area when recalling English sentences.

#### 1. はじめに

fMRI(functional Magnetic Imaging) 研究では,磁気共鳴画像装置(MRI)によって計測されたデータから BOLD(Blood Oxygen Level Dpendent) 効果をとらえ脳の賦活部位を検出する [1, 2, 3]. しかし,ヘモダイナミクス応答関数は,実行するタスクとの関連(事象関連)や脳部位やボクセル毎の反応の相違を考慮する必要があり,既知の標準的な関数だけを用いる解析手法では,センテンスの記銘や想起のような複雑なタスクを実行するときには,正確な賦活部位の特定が難しい.

記憶の過程は記銘,保持,固定,想起などに分類されるが,脳の機能として重複する部分があることや,脳の部位が重複した機能を担っていることもあり,明確に分類して機能局在を明らかにするのは困難である.また,コントロールブロックを単純な休憩ブロックとすると内言などの関連しない活動が影響する可能性がある.そのために,エピソード記憶や作動記憶の研究では熟知した単語のみのの記銘・想起実験であっても,実験のデザインにさまざまな工夫が凝らされている[4,5].

fMRI 研究において,正準相関分析 [6] は複数のボクセルグループと任意の応答関数との相関を最大化することによって,装置のアーチファクトなどの影響を取り除くことができるとされている [7].

本研究では,休憩課題実行中の内言などの実験課題に関連しない脳内活動の影響を低減することによって実験のブロックデザインを簡単化し,アーチファクトにも影響されないボクセル毎の応答関数を求める方法として,正準相関分析に修正を加えたファジィ正準相関分析(Fuzzy Canonical Correlation Analysis, FCCA)

#### 法を用いる.

また,得られるボクセル毎の応答関数をFCM(Fuzzy C-Means) 法を用いて分類し,各賦活部位毎の機能局在を明らかにする.そして,fMRI研究に広く用いられているSPM99 [3,2] との結果の比較や,目を開けて行った実験と目を閉じた実験から,場所法で長期に固定されたセンテンス想起時における広範な視覚野での賦活を明らかにする.

## 2. fMRI データのファジィ正準相関分析

本研究では複数のボクセルグループと任意の応答関 数との相関を最大化するように応答関数を求める正準 相関分析を fMRI に用いる [7]. ファジィ理論における メンバシップ関数を導入して内言等の影響を低減する ために、コントロールブロックでの重み(メンバシッ プ)を小さくして用いる.BOLD 効果の5秒から10 秒の時間遅れを考慮した SPM でのボックスカー型デ ザインに対応する応答関数を参考にしてメンバシップ 関数を決定する.ボクセル毎のfMRIデータのn次元 ベクトルを  $x_k$  とし, X を平均0の  $n \times p$  行列とする. n はスキャン数 , p はボクセル毎に行う正準相関分析 に用いる近傍のボクセル数で $1 \le k \le p$ とする.3章 では p=3 として当該ボクセルの z 軸での上下のボク セルを用いている p=1 とすれば p=1 とずれば p=1最大化するように応答関数を求めることになる.pを 大きくするほど正準相関係数は大きくなり賦活部位が 広くなる. $X=(oldsymbol{x}_1-\overline{oldsymbol{x}_1},...,oldsymbol{x}_p-\overline{oldsymbol{x}_p})$ とする.また $oldsymbol{y}_i$ にはフーリエ基底を用いることができるが,簡単化し 以下のようなn次元ベクトルとする.このように簡単 化しても,3章の実験データでは,文献[7]でのフーリ 工基底を用いる場合と,ほぼ同じ結果(賦活部位)が 得られた.応答関数の十分な平滑化が必要な場合は周期の大きなフーリエ基底のみを用いる.

$$egin{aligned} oldsymbol{y}_i &= (oldsymbol{I}_i^ op, oldsymbol{I}_i^ op, ..., oldsymbol{I}_i^ op)^ op \ oldsymbol{I}_i &= (\delta_{ij}) \end{aligned}$$

 $oldsymbol{I}_i$  は r 次元ベクトルで ,  $\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタである .

$$\delta_{ij} = \left\{ egin{array}{ll} 1, & i = j \\ 0, & その他 \end{array} \right.$$

Y は以下のような平均 0 の  $n \times q$  行列で,q はエポック毎(1 実験ブロック+1 コントロールブロック)のスキャン数である.

$$Y = (\boldsymbol{y}_1 - \overline{\boldsymbol{y}_1}, ..., \boldsymbol{y}_q - \overline{\boldsymbol{y}_q})$$

M は各時点での計測データに対するメンバシップ値 (重み)の対角行列で,次の線形結合を求める.

$$\mathbf{f} = M^{1/2} X \mathbf{a} \tag{1}$$

$$\mathbf{g} = M^{1/2} Y \mathbf{b} \tag{2}$$

そして,式(3)の目的関数を最大化することによって, fとgとの最大相関係数を求める.

$$\max \ r(\boldsymbol{f}, \boldsymbol{g}) = \boldsymbol{a}^{\top} X^{\top} M Y \boldsymbol{b} \tag{3}$$

s.t. 
$$\boldsymbol{a}^{\top} X^{\top} M X \boldsymbol{a} = 1$$
 (4)

$$\boldsymbol{b}^{\top} Y^{\top} M Y \boldsymbol{b} = 1 \tag{5}$$

この問題は以下の固有値問題に帰着される.

$$Y^{\top} M X (X^{\top} M X)^{-} X^{\top} M Y \boldsymbol{b} = \lambda Y^{\top} M Y \boldsymbol{b}$$
 (6)

$$X^{\top}MY(Y^{\top}MY)^{-}Y^{\top}MX$$
 $a=\lambda X^{\top}MX$  $a$  (7)  $(X^{\top}MX)^{-}$  と  $(Y^{\top}MY)^{-}$  は各々 $X^{\top}MX$ ,  $Y^{\top}MY$ に対する一般逆行列である.

得られる b は , q 次元であり対象ボクセルのヘモダイナミクス応答関数を表現している . また各部位におけるヘモダイナミクス応答関数の分類には FCM 法を用いる .

#### 3. 場所法記憶の fMRI 分析

用いた fMRI データは , 過去 4 年間に場所法とメンタルリハーサルにより約 2800 の英文センテンスを記憶している被験者 ( 54 歳右利き男性 ) が行った実験によるものである , 25 分間の実験セッションから得られた Talairach 座標 [8] z=4,6,8 におけるスライス上の各 9919 のボクセル ( 2mm 角 ) の 250 スキャン分のデータに対し , 提案法 (FCCA) を用いた解析を行った . z=6 は Monro 孔レベルのスライスである . さらに計測データの中から正準相関係数が 0.4 以上のボクセル

から得られた応答関数に対して, FCM 法によるクラスタリングを行った.実験の詳細は [9] 参照.

Fig.1 に用いたメンバシップ関数(重み)を示す.Fig.2 は Fig.3(c) の白線の位置(下から 70 行目)でのボクセル毎の正準相関係数の値を示している.Fig.3 は視覚提示を用いて目を開けて行った 2 回の実験セッション(1)(2) と目を閉じて行った実験セッション(3) の結果を示している(z=6).正準相関係数  $r\geq 0.35$  のボクセルを赤く表示している.黄色は r の値が高いことを示している.右のグラフは左脳の 1 次視覚野とブローカ野における x 軸方向に連続した 10 個のボクセルでの応答関数 b を示している.

目を開けて行ったセッション (1)(2) では,30 秒間の実験プロックにおいて,英文の黙読,対応する場所の想起,次の場所の想起,対応する英文の想起の4 つの課題を2 回繰り返している.中央の図は1 次視覚野での活性化は,このタスクにすばやく反応していることを示している.(3) の目を閉じた実験では英文の黙読,対応する場所の想起のタスクが無いため緩慢な応答となっていると考えられる.しかし,いずれの場合も視覚野が広く賦活していることがうかがえる.右の図はプローカ野での応答を示している.セッション (1)(2)では実験プロックで高く,コントロールブロックで低い一般的な応答となっている.セッション (3) での実験プロック中の低下は (1)(2) に比べて課題が少ないために,1 回分が 15 秒以内に終了したためと考えられる.

Fig.4 はクラスター数を 7 として FCM 法により,応答関数 b を分類した結果を色分けして示している.右のグラフは各クラスター中心を描いたもので,それぞれのクラスター毎の代表的な応答関数を表している.左右の図は色が対応しているが,白のクラスターのみは右図では黒の破線 (7) で描かれている.Fig.5 は SPM による 3 つのセッションの結果である.SPM ではいずれの実験も視覚野は比較的狭い範囲でしか賦活していない.

Fig.6 はメンバシップを用いた場合と用いなかった場合の FCCA の結果を示している.詳細に見ると賦活の程度が領野毎に変化していることがわかる. Fig.7 はクラスター中心をヘモダイナミクス応答関数と見なしてピアソン相関係数を計算したもので,応答関数が変わることによって賦活部位が大きく異なり,右の図に示すように視覚野が広範囲に賦活している. Fig.8 は目を閉じた実験での同様の結果でこの場合も視覚野から舌状回,楔部,帯状回にわたる広い賦活が認められる.また右図では前頭前野 BA10 と小脳山頂部付近の視覚連合野や帯状回後部に位相遅れの大きな応答が現

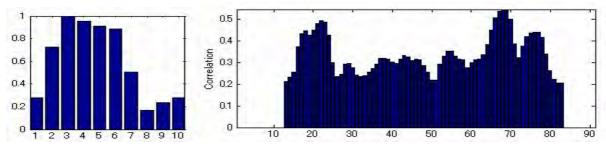
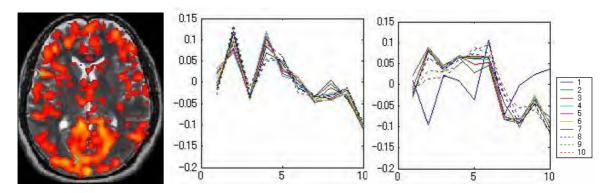
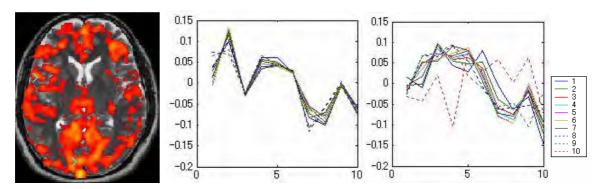


Fig.1 Membership (weight)

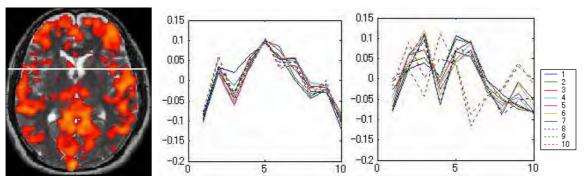
Fig.2 Canonical correlation in Session 3 -Row 70 (shown in Fig.3 (c))



(a) Result of Session 1, Middle; Row 20, Col.38-47 Right; Row 70, Col.15-24.



(b) Result of Session 2, Middle; Row 20, Col.41-50, Right; Row 70, Col.15-24



(c) Result of Session 3, Middle; Row 20, Col.41-50, Right; Row 70, Col.19-28 Fig.3 Results of the three sessions by FCCA. CCC > 0.35.

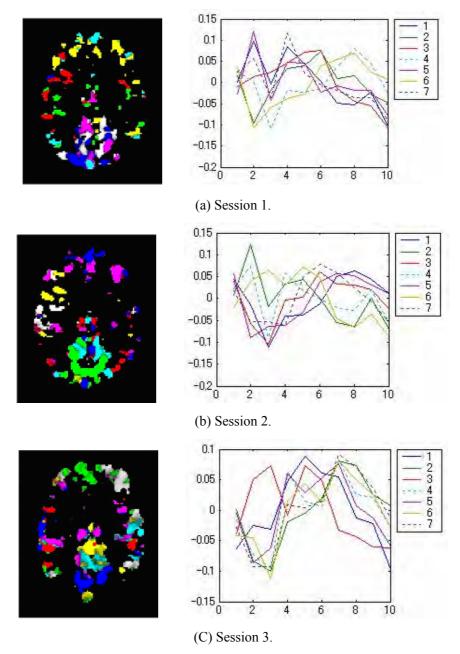


Fig.4 Clustering results and cluster centroids (wave forms) obtained by FCM.CCC > 0.4

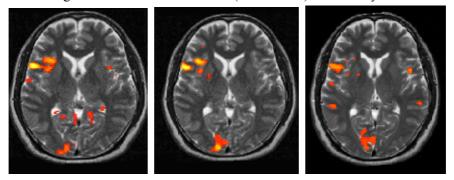
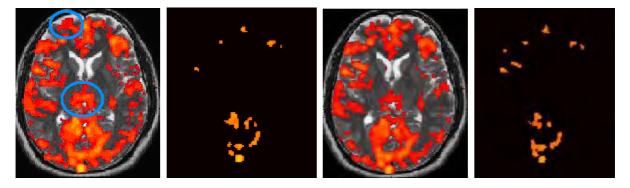


Fig.5 Results of the sessions 1-3 (from left to right) by SPM99



(a) Result by FCCA, CCC > 0.35 & 0.53.

(b) No membership is used, CCC > 0.35 & 0.5.

Fig.6 Comparison between fuzzy and non-fuzzy CCA applied for the session 2.

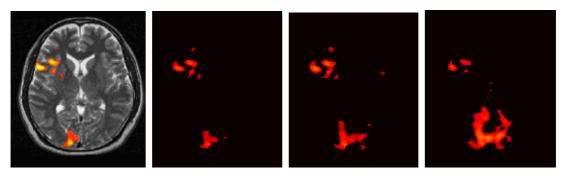


Fig.7 Comparisons of results for the session 2 by SPM99, Pearson correlation using typical hemodynamics function of SPM99. Pearson correlation (Corr. > 0.25) using centroids of the 6<sup>th</sup> and 2<sup>nd</sup> clusters.

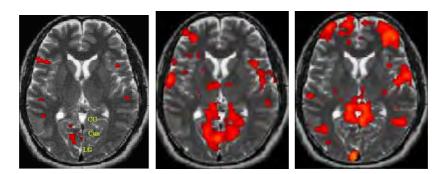


Fig.8 Results for the session 3, depicted by Pearson correlation (Corr. > 0.25) with bimodal (3, red), unimodal (1, blue) and right-unimodal (2, green) hemodynamics in Fig.3 (c).

れている.

#### 3. おわりに

コントロール課題におけるタスクに関連しない脳活動の影響を軽減しながら,脳賦活部位を特定するためのファジィ正準相関分析を提案した.また,FCM 法によるクラスター分析によって,記憶の想起時における脳部位での異なったヘモダイナミクス応答関数を示すことができた.

場所法で記憶を固定するためのリハーサルには,想起・検索過程も含まれていて,記銘・固定と想起・検索を区別した実験のデザインは困難である.事故で脳震盪を起こすとその直前の記憶が失われるが,直前より前の記憶や以後の記憶には障害がなく,短期記憶が長期記憶に移行する過程が一時的に阻害されたと考えられている.この過程は意識に上らない脳機能として働いている.したがって,実験中のコントロールブロックはこの移行過程である可能性も考えられる.特に前頭前野において,位相遅れの大きな応答が観測されておりその関連を究明することが今後の課題である.

## 参考文献

- A. W. Toga and J. C. Mazziotta, Brain Mapping-The Methods, second edition, Academic Press, 2002.
- [2] R. S. J. Frackowiac et al, Human Brain Function, Academic Press, California, 1997.
- [3] K. J. Friston et al, "Statistical Parametric Mapping, A general linear approach," Human Brain Mapping, vol.2, pp.189-210, 1995.
- [4] R. Cabeza, F. Dolcos, R. Graham and L. Nyberg, "Similarities and Differences in the Neural Correlates of Episodic Memory Retrieval and Working Memory," *NeuroImage*, vol.16, pp.317-330, 2002.
- [5] F. Scott et al, "The Role of Prefrontal Cortex during Tests of Episodic Memory," Trends in Cognitive Sciences, vol.2, no.10, 1998.
- [6] H. Hotelling, "Relations between Two Sets of Variates. Biometrika, vol. 28, pp. 321-377, 1936.
- [7] O. Friman *et al*, "Detection of Neural Activation in Functional MRI Using Canonical Correlation

- Analysis," Magnetic Resonance in Medicine, vol. 45, pp. 323-330, 2001.
- [8] J. Talairach and P. Tournoux, Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain, Thieme Medical Publishers, Inc., New York, 1988
- [9] 市橋秀友,本多克宏,荒木昭一,"fMRI による場所法での記憶想起時における脳賦活部位の比較," 第 20 回ファジィシステムシンポジウム講演予講 集, 2004.

#### [連絡先]

#### 市橋秀友

599-8531 堺市学園町 1-1

大阪府立大学大学院工学研究科電気・情報系専攻 経営工学分野

TEL 0722-54-9352(FAX 兼用)

FAX 0722-54-9915(分野事務室)

E-mail ichi@ie.osakafu-u.ac.jp

## 局所対応刺激で生じる統合運動知覚のメカニズム: 心理実験とモデル化

Neural Mechanism of Integrated Motion Perception in Locally-Paired-Dot Stimuli: Psychophysics and Modeling

渡部 修

Osamu Watanabe

室蘭工業大学

Muroran Institute of Technology

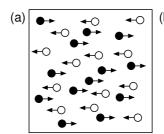
Abstract: The phenomenon of motion transparency is an important test case for the nature of motion computation and representation in the brain. In order to reveal the neural mechanism for computation and representation of multiple motions, motion perception in locally-paired-dot (LPD) stimuli has been studied intensively. Previous researches suggests that global motion detection in standard random-dot kinematgrams (RDKs) and the integrated motion perception in LPD stimuli results from similar neural mechanisms, i.e., mutual interactions between motion-sensitive neurons. Here we show the global and the local integrations of individual motions are carried out separately. Psychophysical experiments indicate that paired motions in LPD stimuli are integrated prior to the global motion integration, and the global motion we perceive is based on the distribution of the pairwise integrated motions. We also propose a neural network model for multiple motion detection and integration, which can explain global motion perception in RDKs and LPD stimuli.

### 1 はじめに

近年,人間の透明面知覚現象について多くの研究が行われてきている.これは,透明面知覚が,脳の視覚情報処理機構を探る上で重要な手がかりを与えると考えられているためである.透明面知覚が成立するということは,脳の視覚情報処理は,正則化理論のように視覚特徴の一価の場(視差マップやオプティカルフロー場)を再構成するという単純なモデルでは説明できないことを示唆している.

脳における多重表面の表現・計算機構は,特に運動透明視(transparent motion)について詳しく調べられてきた.運動透明視は,視野上の同一の領域に,複数のグローバル運動を同時に知覚できる現象で,異なる方向へ運動するランダムドットキネマトグラム (RDK)を重畳した刺激等で生じる (図 1(a)).

Qian ら [6] は,脳における多重運動処理のメカニズムを解明するため,LPD (locally-paired-dot) 刺激を考案した (図 1(b)) . LPD 刺激では,異なる方向に運動するドットが局所的に接近するよう配置される.ドット配置が異なるだけで,LPD では,平均運動ベクトルに相当する単一の運動しか知覚されなくなる [1] . この知見から,運動検出ニューロン間に,運動統合を行う局所的な強い相互作用が存在することが示唆されている.MT 野におけるニューロン間相互作用の存在は生理学的にも明らかになっており,この機構に基づいて,運動



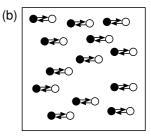


図 1: 多重運動刺激の模式図. (a) 運動透明視を知覚させる RDK. 左右方向への二つのグローバル運動が同時に知覚できる. (b) 対応する LPD 刺激. この図では平均運動が 0 になるため,運動は全く知覚されない.

透明刺激で知覚される運動残効 (MAE) を説明するモデルも提案されている [3] . LPD 刺激の統合運動知覚も,グローバル運動統合と共通の,MT 野におけるニューロン間相互作用の結果を反映していると考えられている [7,9] .

しかし,LPD 刺激における運動統合は,一般的なグローバル運動統合とは異なるプロセスで行われている可能性もある.Curranら[1]らは,LPDの運動統合がニューロン間の相互作用ではなく,各ニューロン内で行われている可能性を指摘している.本研究では,LPDの運動統合が,グローバルな統合運動検出に先立って行われるという,運動統合メカニズムの階層性を心理物理実験によって示す.さらに,LPD 刺激の運動知覚を説明する神経回路モデルを提案する.

### 2 心理実験

視覚刺激全体のグローバルな運動知覚と,LPD刺激における統合運動知覚との関係を調べるため,(1)通常のRDK,(2)RDKのドット配置のみを変更したLPD刺激,および,(3)LPD刺激の各ドット対を,平均運動方向へ運動する一つのドットで置き換えた刺激(pairwise-averaged stimulus)の三種類の刺激について,シグナル運動検出にはグローバルな運動統合メカニズムのみが関与するのに対し,LPD刺激のシグナル運動検出には双方の運動統合メカニズムが寄与すると考えられる.また,グローバル運動検出に先立って,LPDの各ドット対で局所的運動統合が行われると仮定すると,LPD刺激とpairwise-averaged刺激のシグナル検出能力は等しくなると考えられる.

#### 2.1 方法

RDK 刺激および LPD 刺激は,直径  $7.8\deg$  の円形領域内に呈示した 200 個のドットから構成される. ドットの速度は  $2\deg/s$ , ライフタイムは  $78 \bmod とした$ . LPD刺激では,対をなすドットは同期して描画され,運動経路の中点で交差するよう配置される.

シグナル検出閾値の測定には,変形上下法(UDTR)を用いた.1-up/4-downルールに従って,ランダム方向に運動するノイズドットの割合を増減することで,正答率84%となる点を閾値として求めた.1回のセッションは転換12回で終了し,最後の6回の転換を閾値計算に用いる.全ての被験者は,各刺激について2セッションずつ実験を行い,合計12個の転換を平均して閾値を求めた.実験は筆者1名を含む3名の被験者で行った.

#### 2.2 実験 1: 単一運動シグナルの検出閾値

実験1では,右(または左)へ運動するシグナル運動の方向検出閾値を測定する(図2).刺激の呈示時間は500msとし,被験者はシグナル運動方向が右か左かを二者強制選択法(2AFC)で答えた.従来のLPD刺激(図1(b))では,元のドット運動は全く知覚できなくなることが知られている.しかし,図2(b)のようにシグナル運動のノイズ運動を対にしたLPD刺激では,シグナルの運動方向を知覚できる可能性がある.グローバルな運動方向の検出に先立って,LPD刺激の各ドット対で局所的な運動統合が行われると仮定すると,ノイズドットはランダムな方向へ運動するため,各ドット対の統合運動はシグナル運動方向を中心とした広い範囲に分布することになる.この統合運動のグローバル運動方向を検出することで,シグナル運動方向を判別することが可能になる.

実験結果を図 2(d) に示す. RDK の検出閾は平均

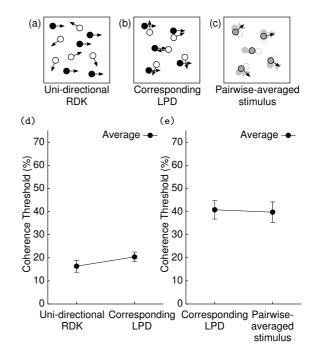


図 2: 実験 1.(a)-(c) 単一運動シグナル刺激の模式図 .(d),(e) シグナル運動方向の検出閾値 (エラーバーは  $\pm 1$  S.E.) .

16.3% , 対応する LPD 刺激の検出閾は平均 22.9%であった.これらの閾値には有意な差がみらるが (t 検定; p<0.05) , 従来の LPD 刺激とは異なり , シグナルとノイズを対にした LPD 刺激ではシグナルドットの運動方向が知覚可能であった.

この知覚の説明として前述の仮説が成り立つとすれば,LPD 刺激の各ドット対を,あらかじめ平均運動方向へ運動する一つのドットで置き換えた pairwise-averaged 刺激 (図 2(c)) のシグナル検出閾値は,LPD 刺激と一致すると考えられる.pairwise-averaged 刺激の閾値は平均 39.7% であった (図 2(e)).これに対応する LPD の閾値は,全ドット対に対する,シグナル運動を含むドット対の割合になる.これは,図 2(d) に示した閾値の 2 倍の,平均 40.7% になる.これらの値に有意な差はないことから,LPD 刺激ではまず各ドット対の運動統合が行われ,この統合運動分布についてのグローバルな運動が知覚されたと考えることができる.

#### 2.3 実験 2: 二重運動シグナルの検出閾値

図 2(b) の LPD 刺激では,まとまって運動するドットはシグナルのみである.従って,実験 1 の結果は,コヒーレントな運動のみが統合運動知覚に寄与する,つまり LPD 刺激の運動統合に,グローバルな運動情報が用いられていると仮定することでも説明できる.LPD 刺激では検出閾を超えた,コヒーレントな運動成分のみが統合されると仮定すると,従来の LPD 刺激(図 1(b))では二つのコヒーレント運動が存在するため,これらの統合運動が知覚されることになる.一方,図 2(b) ではコヒーレントな運動はシグナルのみであり,検出閾

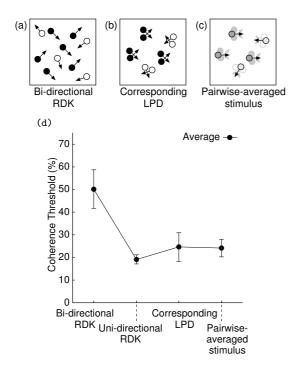


図 3: 実験  $2 \cdot (a) - (c)$  二重運動シグナル刺激の模式図  $\cdot (d)$  コヒーレント運動の検出閾値  $\cdot$ 

を下回るノイズ運動とは統合しないため, RDK 刺激と同程度の精度でシグナル運動方向を知覚できることになる.

実験2では、シグナル運動が二重運動のときの、コ ヒーレント運動の検出閾値を測定する(図3). 各ドット 対の運動方向差は90°に固定し,シグナル運動対のドッ トは右上 (45°) と右下 (-45°)(または左上 (135°) と左 下 (-135°)) に運動する. 各試行では, シグナル運動を 含む刺激と, ノイズ運動のみで構成された刺激が, ラ ンダム順で継時的に呈示される. 各刺激の呈示時間は 400 ms , 刺激間のインターバルは 500 ms とした . 被験 者はどちらの刺激にシグナル運動が含まれていたかを 2AFC で回答する. 従来の知見から [2,4], 二重運動の 検出閾は単一運動の検出閾のおよそ二倍になる、つま り二重運動を知覚するためには,各コンポーネント運動 がそれぞれ検出閾を超えている必要があることが知ら れている、従って, LPD 刺激では検出閾を超えた運動 のみが統合されるという仮説が正しければ,図3(b)の LPD 刺激の閾値は,図 3(a)の RDK 刺激の閾値と同程 度になると考えられる.一方,まず各ドット対で局所的 な運動統合が行われ,この統合運動に対してグローバ ルな運動の検出が行われていれば,この LPD 刺激の知 覚は図 3(c) の刺激と等価になると考えられる.図 3(c) は単一方向に運動する RDK 刺激になるため, 閾値は 図 3(a) のおよそ半分になると考えられる.

実験結果を図 3(d) に示す . RDK 刺激における二重 運動シグナルの検出閾値は平均 50.1%であった . 一方,同一の方法で検出した,右上  $(45^\circ)($ または左上  $(135^\circ))$ 

への単一運動の検出閾値は平均 19.1%と有意に低く (t検定; p < 0.05), 二重運動の場合のおよそ半分であった.これは [2,4] と同じ結果である.LPD 刺激の閾値は平均 24.6%と,対応する RDK 刺激の場合に比べて大きく下がっており,単一運動シグナルの閾値とほぼ同じレベルであった.また,pairwise-averaged 刺激の閾値 (平均 22.4%) とも有意な差はみられなかった.この結果から,まず LPD 刺激の各ドット対について運動統合が行われ,次にこの統合運動分布に対して,RDK と同じメカニズムでグローバル運動が検出されるという,二つの運動統合機構の階層性が示唆される.

#### 2.4 実験 3: 多重運動を知覚する LPD 刺激

実験 1 , 2 より , 図 4 のような階層メカニズムが示唆される . 図 4(b) や (c) に示すように , このモデルは実験 1 , 2 で示した LPD 刺激の運動知覚を説明することが可能である .

二つのグローバル運動が同時に知覚される運動透明 視が,図 4 のグローバル運動統合の部分で担われているのであれば,図 5(a) のような LPD 刺激でも運動透明視が生じることが予想される(図 4(d) も参照). そして,この透明運動の検出閾値は,図 5(b) のような RDK と等しくなると考えられる.

実験 3 では,この予測が成り立つことを示す.シグナル運動は,右上  $(45^\circ)$ ,右下  $(-45^\circ)$ ,左上  $(135^\circ)$ ,左下  $(-135^\circ)$  の 4 方向へ運動し,図 5(a) のようにドット対の組み合わせ方を変えた二つの刺激を用意する.各方向へ運動するドットの数は同一で,局所対の組み合わせ方が異なるだけなので,グローバルな運動情報からはこの二つの刺激を区別できない.実験では図 5(a)(または図 5(b)) の刺激のどちらか一方を  $400~\mathrm{ms}$  呈示し,被験者は二重運動が上下方向か,左右方向かを  $2\mathrm{AFC}$  で回答した.

実験の結果,図 5(a) のような LPD 刺激でも,運動透明視の知覚が可能であった.この二重運動方向の検出 閾値は,pairwise-averaged 刺激となる RDK (図 5(b)) とは有意な差がみられなかった.この知見は,図 4 のような階層モデルを支持するといえる.

## 3 モデル

前節の心理実験より, LPD 刺激においては,まず各ドット対の統合運動が計算され,次にこの統合運動分布のグローバル運動が検出されていることが示唆された.この結果は,図4に概念的に示したように,LPD刺激の運動統合とグローバル運動統合という,二つの運動統合機構の階層性を示唆する.

このような統合運動知覚を実現する最も単純なモデルは,類似した神経回路によって実現される二つのプ

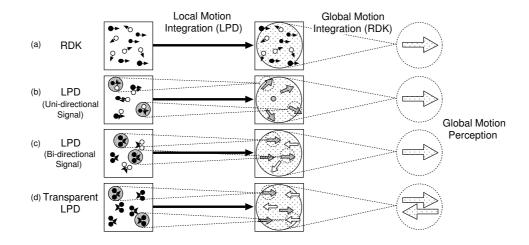


図 4: 運動統合機構の階層モデルの概念図.

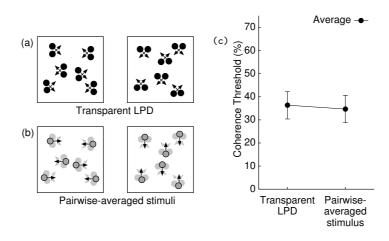


図 5: 実験 3. (a) 運動透明視を知覚させる LPD 刺激の模式図. (b) 対応する pairwise-averaged 刺激. (d) 多重運動方向の検出閾値.

ロセスによって,二段階の運動統合が行われるという ものである.初期の運動統合プロセスでは LPD 刺激の ドット対に対する局所的な運動統合が行われ,高次の運 動統合プロセスでより大域的な運動が検出される.し かし,このように LPD 刺激に特化した局所運動統合メ カニズムが,脳内に存在するのだろうか.

一方,多重運動に対する運動検出細胞の応答特性を 考慮することで,二段階の運動統合プロセスを仮定せ ずに,LPD 刺激の運動知覚を説明できる可能性がある. この節では,一段階の運動統合メカニズムで,RDK と LPD 刺激の知覚の差異を説明するモデルを提案する.

#### 3.1 多重運動に対するポピュレーション応答

多重運動検出のモデルを考える際は,運動検出細胞のポピュレーションによって,異なる方向へ運動する二つのドット群がどのように表現されるのかが重要になる.広く用いられている仮定は,各運動を単独で呈示したときの応答の線形和になるというものである.この仮定では,二つの運動  $s_1, s_2$  に対するニューロン応答 r は,

$$r = \alpha_1 f(s_1) + \alpha_2 f(s_2) \tag{1}$$

とモデル化される.ここで,f(s) は運動入力 s に対するチューニングカーブ, $\alpha_1,\,\alpha_2$  は定数である(図 6 右上のパネル参照).この仮定の下では,ポピュレーション応答を各運動成分に分離することで多重運動を検出できる.この仮定は生理学的にも支持されており  $(e.g.\ [8])$ ,多くのモデルで用いられている.

しかし,初期視覚野の運動検出細胞は,受容野内の各画像特徴がどの運動表面に属するのかを区別せず,全ての画像特徴をまとめてフィルタリングするため,その応答には表面パターン間の干渉(あるいはクロストーク)が含まれる可能性がある[10].このとき,多重運動に対するポピュレーション応答は,図6の右下のパネルのように,各運動表面を単独で呈示したときの応答の非線形結合になる可能性がある.

渡部 [10] は,多重運動に対する時空間エネルギーモデルの応答を解析している.二重運動刺激の各運動表面を単独で呈示したときの,エネルギーモデルの複雑型細胞応答を, $r^{(1)}, r^{(2)}$  とする.このとき二重運動刺激に対する応答は

$$r = r^{(1)} + r^{(2)} + 2\sqrt{r^{(1)}r^{(2)}}\cos\Delta\phi \tag{2}$$

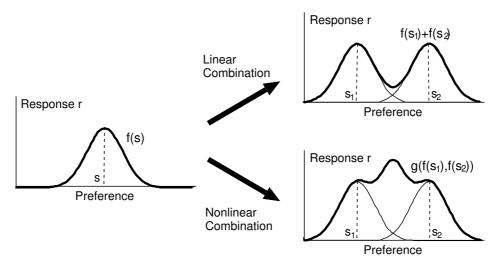


図 6: 多重運動のポピュレーション符号化の二つの仮説 (本文参照) . 右上のパネルは  $lpha_1=lpha_2=1$  の場合を表す . 右下のパネルの g は ,  $f(s_1),\,f(s_2)$  の非線形関数を表す .

となる.ここで  $\Delta\phi$  は二表面の位相差を表す $^1$ .この結果は,単一運動のときは入力パターンの位相に依存しないという複雑型細胞として望ましい応答特性が得られるが,二重運動のときは入力パターンの位相の影響を受けることを示している.(2) 式の第  $^3$  項は,二つの運動の双方に強く応答する(つまり  $^{(1)}r^{(2)}\gg 0$  となる)ニューロンに影響を与える.一般の RDK では,位相差  $\Delta\phi$  が一様分布するため,空間的プーリングによってこのクロストーク項を相殺できる.しかし,LPD 刺激では二つの運動表面パターンがほぼ等しいため,クロストークの影響が残ることが予想される.

エネルギーモデルの解析より, 多重運動に対する応 答は,一般には各運動を個別に呈示したときの応答の 線形和になるが,特定の刺激(LPD刺激)のときは,応 答に非線形性が現れることが明らかになった.渡部 [10] は,このクロストークによって統合運動に選択性を持 つ細胞が活性化されるため, LPD 刺激の統合運動知覚 が生じるというモデルを提案している.このモデルは, LPD 刺激の統合運動知覚はニューロン間の相互作用で はなく,各ニューロン内の非線形特性を反映しているこ とを示唆する.ニューロン間の相互作用によって LPD 刺激の統合運動知覚が生じるというモデルでは、初期の 運動検出細胞で各運動成分が正しく検出されることが 前提になっている.しかし,上述の解析によれば,LPD 刺激が入力されたときは応答に非線形が生じるため,各 運動成分を正しく検出することができない.一方,各 細胞の応答特性それ自身によって LPD の統合運動知覚 が生じていると考えれば, ad hoc な細胞間結合を仮定 することなしに, LPD 刺激の知覚を説明することが可 能になる.

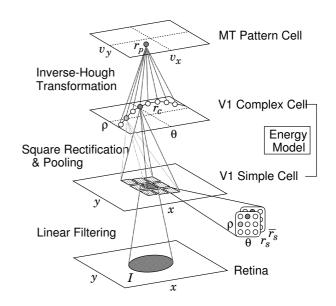


図 7: 多重運動の検出・統合を行う神経回路モデルの模式図.

#### 3.2 統合運動検出の階層モデル

エネルギーモデルの解析によって得られた知見を用いると、一段階の運動統合プロセスしか持たない単純な運動検出モデルでも、LPD 刺激の知覚を説明することができる.モデルの概要を図7に示す.最も下の層は網膜に対応し、入力動画像が与えられる.続く二つの層は、それぞれエネルギーモデルの単純型細胞は、受容野中心の等しい単純型細胞だけではなく、近傍の複数の中心の等しい単純型細胞だけではなく、近傍の複数の中によって、ある一定領域のグローバルな運動方向が検出される.LPD 刺激の統合運動は、それに特化した機構を用意しなくとも、エネルギーモデルの性質から自然に生じる.初期視覚野の複雑型細胞は方位選択性を持つため、最適方位に直交した運動成分しか検出できな

 $<sup>^1</sup>$ quadrature pair を構成する単純型細胞応答を  $r_s^{(i)}$ ,  $\bar{r}_s^{(i)}$  (i=1,2) とおくと , 表面 i の位相は  $\phi^{(i)}= an^{-1}(ar{r}_s^{(i)}/r_s^{(i)})$  , 位相差は  $\Delta\phi=\phi^{(2)}-\phi^{(1)}$  と定義される

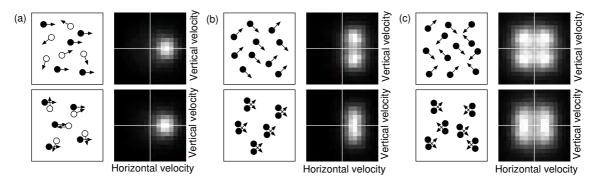


図 8: シミュレーション結果.(a)-(c) はそれぞれ第 2 節の実験 1-3 に対応し,上の行に RDK の,下の行に LPD 刺激の結果を示す.各行の右の図は入力像の模式図である.左の図は,モデルの 2 次元運動ベクトル検出層 (最終層) のポピュレーション応答を,グレースケールで表した図である.ポピュレーション応答のピークの位置が,知覚される運動ベクトルに対応する.

い.これはエネルギーモデルでも同様である.入力像の運動は,最上位層の,二次元運動ベクトルに選択性を持つ細胞で検出される.この細胞は,最適運動ベクトルと整合する選択性を持つ複雑型細胞から,入力を受けることで構成される[5].

図8にシミュレーション結果を示す.実験1に対応するシミュレーション(図8(a))では,シグナルドットと対をなすドットはランダム方向に運動するため,シグナル運動に応答する全ての細胞が,一様にクロストーク項の影響を受ける.従って,RDKとLPD刺激の応答はよく似たものになっている.一方,実験2に対応するシミュレーション(図8(b))では,RDKのときには二重動に対応する二つのピークが生じているが,LPD刺激のときは二つのピークの中点に位置する細胞がクロストークの影響で強く発火している.このため,統合運動に対応する一つのピークしか得ることができなくなる.実験3に対応するシミュレーション(図8(c))では4方向のドット運動が入力される.LPD刺激の結果をみると,局所対を構成する運動の平均運動に対応する細胞が,選択的に発火しているのがわかる.

#### 4 まとめ

本研究では,通常の RDK と,このドット配置のみを変更して構成した LPD 刺激,および,LPD 刺激の各ドット対を,平均運動方向へ運動する一つのドットで置き換えた pairwise-averaged 刺激の三種類の刺激について,シグナル検出閾値を測定・比較した.この結果から,LPD の統合運動検出とグローバルな運動統合が,階層的に行われていることが示唆される.このことは,グローバル運動知覚についての心理学的,生理学的な知見を,LPD 刺激の知覚の説明にそのまま用いることはできないことを示している.本研究では,きらに,LPD 刺激の知覚を説明する多重運動の検出・統合モデルを提案した.しかし,このモデルは,第2節で測定した検出閾を定量的に説明することはできない.今後,検出閾を定量的に説明するモデルを構築し,実

験データと比較する必要がある.

## 参考文献

- Curran, W. & Braddick, O.J. Speed and direction of locally-paired dot patterns. Vision Research, 40, 2115–2124 (2000).
- [2] Edwards, M. & Nishida, S. Global-motion detection with transparent-motion signals. *Vision Research*, 39, 2239–2249 (1999).
- [3] Grunewald, A. & Lankheet, M.J.M. Orthogonal motion after-effect illusion predicted by a model of cortical motion processing. *Nature*, **384**, 358–360 (1996).
- [4] Hibbard, P.B. & Bradshaw, M.F. Does binocular disparity facilitate the direction of transparent motion? *Perception*, 28, 183–191 (1999).
- [5] Kawakami, S. & Okamoto, H. A cell model for the detection of local image motion on the magnocellular pathway of the visual cortex. *Vision Research*, 36, 117–147 (1996).
- [6] Qian, N., Andersen, R.A., & Adelson, E.H. Transparent motion perception as detection of unbalanced motion signals. I. psychophysics, *Journal of Neuro*science, 14, 7357–7366 (1994).
- [7] Qian, N., Andersen, R.A., & Adelson, E.H. Transparent motion perception as detection of unbalanced motion signals. III. modeling, *Journal of Neuroscience*, 14, 7381–7392 (1994).
- [8] Treue, S., Hol, K., & Rauber, H. Seeing multiple directions of motion — physiology and psychophysics. *Nature Neuroscience*, 3, 270–276 (2000).
- [9] Vidnyánszky, Z., Blaster, E., & Papathomas, T.V. Motion integration during motion aftereffects. *Trends in Cognitive Sciences*, 6, 157–161 (2002).
- [10] 渡部修. 多重運動情報の脳内表現モデル. 信学技報, NC2002-108, (2003).

#### 連絡先:

#### 渡部 修

室蘭工業大学工学部情報工学科

〒 050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1

Phone: 0143-46-5483 FAX: 0143-46-5499

E-mail: watanabe@csse.muroran-it.ac.jp

## 3次元輪郭知覚のメカニズム

Mechanism of three dimensional contour perception

#### 菊池 眞之

Masayuki Kikuchi

#### 東京工科大学 コンピュータサイエンス学部

School of Computer Science, Tokyo University of Technology

Abstract: Psychological and Physiological studies have been manifested that local contour elements extracted by simple cells (orientation selective cells) in the brain are bound together by co-linear and co-circular connections between those cells, and long curves are saliently perceived. Most of the studies investigating this process of contour integration used 2D stimuli, therefore consequences obtained from them can only refer the mechanism of 2D integration mechanism. However, our visual experiences are usually 3D. This study executed psychological experiments using 3D contour stimuli to adderss the characteristics of the 3D contour integration system in the brain.

#### 1 はじめに

2次元網膜像に含まれる輪郭から初期視覚領野の方位 選択性細胞により local な線分要素が抽出されると共に, それら細胞間の colinear な結合により, これら断片的な 線分要素が統合され一本の滑らかな輪郭として知覚され る. これは知覚体制化と呼ばれる物体認知の為の情報統 合の過程のうち最も主要なものの1つである.この輪郭 統合のメカニズムを調べる心理実験としては, Field ら により提案された path-paradigm に基づく実験 [1][7] が 有名である.これは,位置・方位がランダムに配置され たガボール・パッチ(以下,GPと略記)群の中に,位 置・方位が滑らかな曲線に沿った配置の GP 群が含まれ る刺激と,含まれない刺激とを被験者に呈示して,どち らの刺激に曲線に沿った GP 群が存在したかを回答させ るという課題である.各種条件下での実験の結果,(1) 曲線の曲率が大きいほど,曲線の検出率は低下,(2)曲 線に沿った GP 方位の, 本来の曲線方位からの逸脱の度 合いが大きいほど検出率は低下,(3)曲線に沿った隣接 GP 間の距離が増加するほど検出率は低下,などの知見 が得られている.これらより彼らは図1に示すような方 位選択性細胞間の共線的結合の存在を推測している.受 容野位置と最適方位が共線的な配置にある細胞間には輪 郭統合を行う結合が備わり、そうでない空間配置の細胞 間には備わらないというものである.PolatとSagi[5][6] は直線上に並ぶ3つのGPの配置を様々に変化させた場 合の, 中央の GP のコントラスト検出閾を測定し, 隣接 GP 間の距離がおよそ2波長以上で,全GPの方位が共 線的な場合に,単独 GP の場合と比べて閾値が低下する ことなどを見出しており,これらも共線的結合の存在を 支持する結果となっている.一方, Kapadiaら [3] は生 理実験により,方位選択性細胞の古典的受容野内に最適 線分刺激のみが呈示される場合に比べ,その最適刺激と 共線的な空間配置となるような線分刺激を古典的受容野

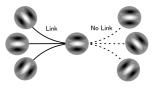


図 1: 方位選択性細胞間の共線的結合 (Field et al.[1] を変更)

外に呈示すると反応が増強されることを見出しており, 共線的結合の存在の生理学的な証拠となっている.

これらの研究では 2 次元平面上のパターンを用いて調べられており,得られた知見も 2 次元のメカニズムに限局される.しかし,我々が日常目にする輪郭は 3 次元であり,前額平行面上に含まれるものばかりとは限らない.脳内には 3 次元的な輪郭統合機構が存在する可能性も十分考えられる.

3次元的な輪郭統合のメカニズムを調べた先行研究は 少数存在する・Hess と Field は GP 群に両眼視差を与 えた場合についての実験を行っている [8]・2 枚の異なる 奥行の面を設定し,曲線上の GP は交互に別々の面に配 置される・背景の GP も 2 枚の面のいずれかに配置さ れる・2 枚の面の奥行差を変化させ,曲線検出率を測定 したところ,比較的大きな奥行差でも輪郭統合可能であ るが,検出率は奥行差の増大に伴って減少することを見 出した・この実験は菊池ら [4] によって検証されている・ また,Hess らは等方的パッチ (バンドパスフィルター) を用いた場合についての実験も行っており,方位の次元 がなくても視差情報を元に背景から輪郭を検出できること,輪郭を構成するパッチが同一視差のとき検出率が高 く,輪郭の奥行方向の傾き(視差勾配)が増加するほど 検出率が低下することなどを見出している [9]・

これら2つの実験は,いずれも刺激中の輪郭自体は3次元的であるものの,輪郭を表現するパッチは前額平行面上のものだった. 奥行次元の輪郭統合機構について詳しく調べるためには,視差勾配を持った線分要素を実験

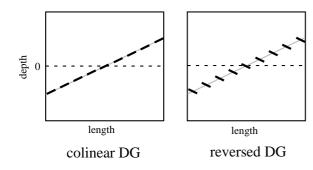


図 2: 実験に用いる輪郭刺激の奥行次元の構造.実験1,2両方に共通である.colinear DGとは曲線を構成する線分の視差勾配が曲線にフィットしている刺激,reversed DGは曲線を構成する線分の視差勾配が曲線の視差勾配と絶対値が同じで符号が逆の刺激を表す.いずれの図も横軸は前額平行面上の輪郭に沿った長さ,縦軸は奥行を表す.黒く短い線分名が実際に呈示される刺激,灰色の直線は大域的な曲線の奥行構造を描いたものである.

に用いる必要がある、そのような刺激を用いた先行研究 として菊池ら [4] の実験がある . 刺激中の各 GP を奥行方 向の傾きを持たせた刺激を使った path-padradigm ベー スの実験を行っており, 各 GP の視差勾配を輪郭の大域 的視差勾配と同一にした場合に輪郭の saliency が高くな るという結果を得ている.これは前額平行面同様, 奥行 次元においても共線的結合が存在することを示唆するも のであるように見える.この菊池らの実験では,視差勾 配を持たせた各 GP について, 3 次元空間において GP の描かれる面に沿って見た場合, それらの空間周波数は 同一に揃うものの,左右各眼画像中の空間周波数は前額 平行面での方位によってそれぞれ変化してしまう. Field らによる元々の path-paradigm 実験で GP を用いた理 由は,GP が方位選択性細胞の結合を最も良く近似する ものであること, また同一空間周波数の GP を用いるこ とで同一空間周波数にチューンする方位選択性細胞間の みに作用する輪郭統合機構の特性を調べられる為であっ た. 菊池らの実験の刺激の場合, 各パッチが果たして3 次元輪郭知覚に関与する神経細胞にとって最適刺激であ るか定かではない、そのような刺激を用いる場合,前額 平行面上の GP 方位によって活性化させる細胞の空間周 波数チャンネルが変化してしまうかもしれない.また視 差勾配を与えた GP 刺激では,垂直方位に近い GP の 奥行方向の傾きは知覚し易いが,水平方位に近い GPの 奥行方向の傾きは知覚し難いという非対称性が高いこと が被験者により報告されている.以上により GP を用い て調べることの必然性は必ずしも高くはないと言える. GP の代わりとして単純な線分刺激が候補として挙げら れる.単純な線分には複数の空間周波数成分が含まれる ので,単一空間周波数チャンネルの細胞のみを活性化さ せることはできない.しかし輪郭知覚特性について調べ るには最も基礎的な刺激であり,かつ各空間周波数チャ ンネルを公平に活性化させるので上記の場合のような空

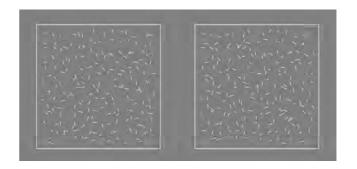


図 3: 実験 1 に用いる刺激の一例 . 実際の実験ではステレオ グラスを用いて左右眼画像を融合視する.

間周波数の偏りによる不本意な影響が生じる可能性もないものと思われる.

Hinkle らは近年,生理実験により視差勾配を持った単純線分刺激に反応する細胞が V4 に存在することを報告している [2] が,このような細胞間の結合についての生理的知見はまだ発表されていない.

本研究では視差勾配を持った線分刺激による path-paradigm ベースの心理実験を行い, 共線的結合が奥行次元にも存在する可能性について吟味する.

## 2 実験1

#### 2.1 目的

最初の実験では、Field らの 2次元 path-paradigm の実験の刺激の構成要素である GP を単純線分に置き換え、さらに各線分に両眼視差・視差勾配を持たせて 3次元化した刺激を用い、奥行方向の曲線の勾配と、曲線を構成する各線分要素の奥行方向の勾配とが同一である場合と逸脱している場合との saliency の違いを調べる.

#### 2.2 方法

実験装置は CPU に Intel Pentium 4 (3GHz), グラフィックカードに 3DLabs Wildcat VP870 を搭載の PC, 21 インチ・カラー CRT EIZO FlexScan T966, 及びステレオグラス StereoGraphics CrystalEyes3 から構成されるシステムである.実験中の1試行は次のような手順で実施される.(1)無刺激画面(キー入力で次の(2)へ),(2)ランダムドット刺激(600ms),(3)線分刺激1(600ms),(4)ランダムドット刺激(600ms),(5)線分刺激2(600ms),(6)ランダムドット刺激(600ms),(7)無刺激画面(回答待ち).

(3), (5) はいずれも位置・方位・両眼視差・視差勾配極性がランダムに設定される線分群の刺激である. (3) もしくは (5) のいずれか一方 (ランダムに決定される) の中には,図(2) 2 に示すような(2) 2 つのタイプの輪郭のうちの

一方が含まれる. それらはそれぞれ, (a) 視差勾配が大 域的曲線全体の視差勾配と同一な線分要素群 (図2左側 の coliner DG に相当), (b) 視差勾配が大域的曲線全体 の視差勾配と絶対値が同一であるが符号が逆となってい る線分要素群 (図 2 右側の reversed DG に相当), であ る.図3に実験1で用いる刺激の一例を示す.2つの画 像はそれぞれ左眼,右眼画像である.中央には×印で注 視点が描かれる、この画像の場合では画像の左下方向に 輪郭が存在する.なお,実際の実験ではステレオグラス を用いて融合視するので,図のように2枚の画像が並べ て呈示されるわけではない.上記(3),(5)の刺激のうち, (a) または (b) の輪郭が含まれないほうの刺激はランダ ムな線分群のみで構成される、被験者のタスクは ,(3), (5) のどちらの刺激に上記 (a) 又は (b) の輪郭が含まれ ていたかを 2AFC で回答することである . (3), (5) の刺 激は灰色の背景の 11.4 × 11.4 vadeg の領域内の , 14 × 14 本の白色線分より構成される. そのうちの 6 本がス ムーズな輪郭に沿って配置され、他は位置・方位がラン ダムに設定される.ただし刺激の呈示される領域内では 線分の空間的密度がほぼ一定になるよう調整される.全 ての線分の長さは 20.8 vamin である . 各パッチの視差 は±36 vamin の範囲に設定される.背景のパッチはこ の範囲内のランダムな値をとる.曲線上のパッチは,両 端がこの範囲の最大値及び最小値をとり,中間に配置さ れるパッチは奥行が線形変化するように視差が割り当て られる.前額平行面上での曲線長は5 vadegである.背 景の輝度は  $18 \text{ cd/m}^2$ , 白色線分の輝度は  $81 \text{ cd/m}^2$  であ る.実験では (a), (b) 各タイプの刺激がそれぞれ 50 試 行ずつ,ランダムな順番で呈示され,1セッションとな る.全部で5セッションが実施された.

#### 結果 2.3

実験結果のグラフを図4に示す.図中に書かれている colinear DG, reversed DG は図 2 で述べた輪郭刺激を 表す. それら輪郭の検出の正答率を縦軸にとってある. グラフより,両タイプの輪郭検出の正答率の差はそれほ ど大きくはないものの, 奥行次元においても colinear な 場合のほうが輪郭の saliency が高くなっていることがわ かる.この結果から奥行次元の共線的結合の可能性を考 えることもできるが, 結果の解釈には次に述べるような 曖昧さが残っている.

#### 実験2 3

#### 3.1 目的

内においてもそれぞれ共線的な輪郭となる.したがって, 要素群の列,のいずれかであり,他方の列は視差勾配の

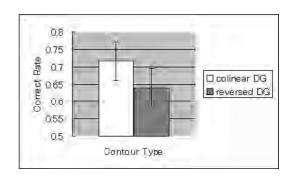


図 4: 実験1の結果. 縦軸は正答率を表す.

実験1のような刺激を用いて実験を行ったときの結果は, (1) まず左右各眼画像中で共線的な要素同士が統合され, 大域的輪郭として高い saliency を有するようになった後, 左右両眼画像内の大域的輪郭同士が融合視され,3次元 的な知覚となる、という可能性、

(2) まず左右両眼画像間で対応する局所輪郭要素同士が 融合視されて3次元的な線分として知覚された後,それ ら3次元線分のうち3次元空間中で共線的な関係にある もの同士が統合されて大域的な3次元輪郭として知覚さ れる,という可能性、

(3) 上記(1) 及び(2) のハイブリッドなプロセス、 の3つの可能性が考えられ,直ちには輪郭統合のプロセ スを特定することができない.これらのうちどれが脳内 メカニズムに該当するかを特定するには,立体視刺激の 各単眼画像内では刺激要素の共線性・非共線性の区別が できず,両眼画像を融合視することではじめて共線性・ 非共線性の区別が可能となるような刺激を用いて調べる 必要がある.そこで,ここでは全ての線分刺激が前額平 行面上では水平方位かつ共線的な空間配置となっており, 両眼画像の融合視により奥行次元において共線性・非共 線性の区別が可能となる刺激を用いた path-paradigm の

#### 方法

実験を行う.

実験に使った機材は実験1と同一である.実験中の1試 行は次のような手順で実施される .(1) 無刺激画面 (キー 入力で次の(2)へ),(2) ランダムドット刺激(600ms),(3) 線分刺激 (700ms), (4) ランダムドット刺激 (600ms), (7) 無刺激画面 (回答待ち).

上記の(3)に横8本×縦2列の水平方位の白色線分群 が呈示される.各列8本の線分は前額平行面で見たとき, 全て同一直線上に配置されている.これら2列のうちの 一方は , (a) 視差勾配が大域的な直線の視差勾配と同一 な線分要素群の列,(b)視差勾配が大域的な直線の視差 3次元空間中において共線的な輪郭は,左右各眼画像 勾配と絶対値が同一であるが符号が逆となっている線分

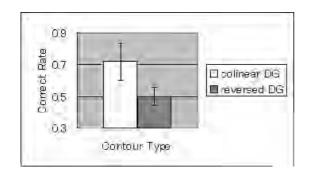


図 5: 実験2の結果.

符号をランダムに設定した線分要素群となる.被験者のタスクは,(3)の刺激の2列のうち,上側・下側のどちらが(a)又は(b)に該当するかを2AFCで回答することである.(3)の刺激は灰色の背景の $6.5 \times 2.5$  vadeg の領域内に呈示される.線分は水平方向に等間隔に配置される.全ての線分の長さは25.6 vamin である.各パッチの視差は $\pm 36$  vamin の範囲に設定される.背景のパッチはこの範囲内のランダムな値をとる.曲線上のパッチは,両端がこの範囲の最大値及び最小値をとり,中間に配置されるパッチは奥行が線形変化するように視差が割り当てられる.背景の輝度と線分の輝度は実験1と同一である.実験では(a),(b)各タイプの刺激がそれぞれ50試行ずつ,ランダムな順番で呈示され,1セッションとなる.全部で5セッションが実施された.

#### 3.3 結果

実験結果のグラフを図 5 に示す・グラフの見方は実験 1 の結果の図 4 と同じである・グラフより,輪郭を構成 する線分要素が奥行次元において共線的な配置の場合の saliency が高くなっていることがわかる・両タイプの輪郭とも 2 つの 2 次元単眼画像それぞれにおいて線分要素が共線的であることを考えると,この saliency の違いは 3 次元的な共線性・非共線性の違いによって生じたものであると考えられる・したがって,脳内には少なくとも前額平行面上の 2 次元的な線分要素を統合するメカニズムのみならず,立体視成立後の 3 次元的な線分要素群を統合するメカニズムも備わっており,それが奥行次元を有する 3 次元的な共線的結合であることを示唆するものである・

#### 4 まとめ

本研究では脳内の3次元の輪郭知覚の特性について2 つの心理実験により調べた.両実験の結果は,奥行次元にも輪郭統合の為の共線的結合が存在することを示唆する.今後,異なる観点からの実験を行い,本研究の結果 に対してさらなる検証を行ってゆく必要がある.

### 謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金(14780257)の援助を得て行われた.本研究の基礎を形成する元となった議論をして下さいました筑波大学 平井有三先生, 酒井宏先生に感謝致します.

## 参考文献

- [1] Field, D., Hayes, A., Hess, R. F.: Contour integration by the human visual system: evidences for a local "association field", *Vision Research*, Vol. 33, No. 2, pp. 173–193 (1993)
- [2] Hinkle, D. A., Connor, C. E.: Three-dimensional orientation tuning in macaque area V4, *Nature Neuro*science, Vol. 5, No. 7, pp.665–670 (2002)
- [3] Kapadia, M. K., Ito, M., Gilbert, C. D., Westheimer, G.: Improvement in visual sensitivity by changes in local context: parallel studies in human observers and in V1 of alert monkeys, *Neuron*, Vol. 15, pp. 843–856 (1995)
- [4] 菊池, 酒井, 平井: 奥行次元における共線的結合の存在可能性, 日本神経回路学会 第 11 回全国大会 講演論文集, pp. 69-70 (2001)
- [5] Polat, U., Sagi, D.: Lateral interactions between spatial channels: supression and facilitation revealed by lateral masking experiments, *Vision Research*, Vol. 33, No. 7, pp. 993–999 (1993)
- [6] Polat, U., Sagi, D.: The Architecture of Perceptual Spatial Interactions, *Vision Research*, Vol. 34, No. 1, pp. 73–78 (1994)
- [7] Hess, R., Field, D.: Integration of contours: new insights, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 3, No. 12, pp. 480–486 (1999)
- [8] Hess, R. F., Field, D.: Contour integration across depth, Vision Research, Vol. 35, No. 12, pp. 1699–1711 (1995)
- [9] Hess, R. F., Hayes, A., Kingdom, F. A. A.: Integrating contour within and through depth, *Vision Research*, Vol. 37, No. 6, pp. 691–696 (1997)

## 連絡先

〒 192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1 東京工科大学 コンピュータサイエンス学部 菊池 眞之

TEL: 0426-37-2696 FAX: 0426-37-2112

E-mail: kikuchi@cs.teu.ac.jp

## 遠隔操作ロボットを用いた探索行為における 技能解析と生態学的考察

## Skill Analysis of Search Behavior via Remote-Controlled Robot from Ecological Perspective

堀口 由貴男, 椹木 哲夫, 桑谷 雅之 Yukio Horiguchi, Tetsuo Sawaragi, and Masayuki Kuwatani 京都大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kyoto University

**Abstract:** In this paper, we examined the operational skills for the search activity via a remote-controlled robot to find out some hidden objects under debris, which simulated a robotic surrogate system for human rescuers. The experimental analysis revealed that the accurate and effective operations require the adequate view control of the camera, which enables the parallel execution of the robotic ambulatory movement and the accurate environment recognition, ensuring the necessary cognitive resources available for human *epistemic* actions. Based upon this analysis, we discuss the necessary considerations to mitigate the cognitive restrictions imposed by the machine usage and to encourage the naturalistic skill performance by the human operators.

#### 1 はじめに

ものを探すという行為には的確な周囲環境の 把握が求められるため、対象を捉える視点を積 極的に移動させるといった、より多くの情報リ ソースを得るための行為主体による能動的な働 きかけが必要となる.しかしながら、そのため の認知活動が利用する道具によって大きる新ため の認知活動が利用する道具によって大きる新ため では、日常のそれに代わる新たな 行動戦略を道具の使い手自身が見つけ出さけ ればならない.我々は、災害現場において 対助者に代わって探索作業を行う遠隔操作とす ットに関して、人間操作者の操作活動を支援す る HCI (Human-Computer Interaction)設計を 課題として取り組んでいるが、このような系で は操作者はまさしく上述の制約を受けることに なる.

本稿では、この取り組みの一環として行ったロボットを介した探索行為の技能解析について報告する. 仮想的に構築した瓦礫環境において技能差のある探索行為を対比し、道具(操作系)と一体化した高技能者の操作技能を解析する. そして、この解析を通して、このような系に対する人間の適応を促す HCI 設計の要件について考察する.

#### 2 人間機械系の二重接面と技能習熟

一般に、人が何かしらの人工物(道具)を介して環境に働きかける場合、図1に示すようにそこには2つの異なる接面(=インタフェース)が想定できる[1][2]. 第一接面は「人間一機械インタフェース」であり、人工物システムに操作を加えてそれをコントロールする操作者との接面に対応する。一方、第二接面は「機械一環境

インタフェース」であり、人工物システムが作用を及ぼし、あるいは作用を受ける外界との接面を意味する.人が道具を「使いこなす」とき、意識の上ではこれら2つの接面が1つになると見なすことができる.すなわち、道具が「からだの延長」になり、人は道具の作用点で外界に「触れている」という感覚を持つために、道具の存在自体が「透明」になる.

しかしながら、例えば、初めて使用する道具であったり、また道具そのものが複雑な処理系として構成されるなどして、その振る舞いを使い手の側がうまく予測できない状況においては、第二接面は(特に心理的に)「はるかかなた」に遠ざかることになる。第二接面とはシステムを、の外界と接している領域であり、そこかもをらされる認識とは、人が自らを含む行動主体としてのシステムを「外」の環境の中に位置付けて、「外」と「内」とのインタラクションのあり様を知るということに他ならない。新たな道具がその使い手に課す知覚一行動間の制約は、このような認識を得難いものに変えてしまう。

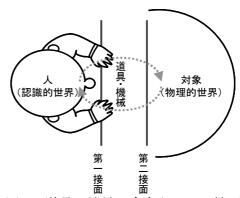


図1 道具・機械の介在と2つの接面



図 2 操作風景



図3 ロボットと探索環境

そこからの「回復」には、第一接面において得られる近接情報の意味を第二接面における遠隔の現象の中に定位するという、使い手の解釈の努力が求められる[3].

本研究では、あからさまに上述のような認知 活動の制約が付与される遠隔操作系において、 操作者の技量差を生む要因を技能分析より明ら かにする.

#### 3 探索作業タスクの設定

まず、移動ロボットの遠隔操作による探索活動を調べるために構築した実験環境について説明する。ロボットの操縦にはジョイスティックを用い、無線モデムを介して制御用 PC から遠隔のロボットに制御指令を送信する。操作は、前進および旋回速度をスティックの傾きによって指定することで本体の移動を制御するほかに、ロボット前方に搭載されたパン/チルト/ズーム可能な CCD カメラをボタン入力で制御する。操作者に提示される情報はこのカメラから送られるライブ映像のみで、それは HMD (Head Mounted Display)に表示される。操作者はこの限定された情報をもとに遠隔のロボットがおかれている状況を認識しなければならない。図 2に操作風景を示す。

実験タスクは、図3に示すような瓦礫に見立てたがらくたの積み重なりの中に隠された目標物(色の付いたボール)を探し出すことである.被験者はロボットとカメラをうまく操作して、瓦礫の隙間を覗き込んでその奥にある目標物を視野に収められる状態にロボットを持っていか

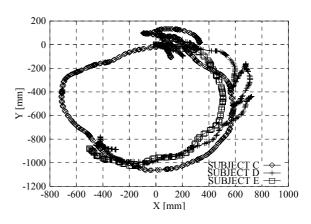


図 4 ロボットの移動軌跡の比較

なくてはならない. その際に, 非常に限定された知覚情報からロボットと周囲の障害物の位置関係を正しく捉えられるか否かが, 円滑にタスクを遂行するためのポイントとなる.

#### 4 実験に基づく探索行為の分析

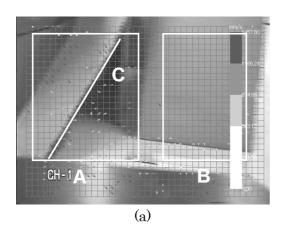
#### 4.1 探索のパフォーマンス

実験は5名の被験者に対して行った.各被験者は最低1回の練習試行の後にパフォーマンス測定用の本試行を2回行った.その際,本試行での探索環境は毎回その構成(瓦礫と目標物の配置)を変更し,全く同一の条件で探索作業を繰り返すことがないように配慮した.しかし,各被験者の本操作環境での作業経験には大きなばらつきがあり,特にこのことが後述のような被験者間の作業パフォーマンスや技量の差に繋がっている.

表 1 探索作業のパフォーマンス比較

Subject	A	В	C	D	E
Time [sec]	313.5	204.5	363	148	98
Collisions	4	7.5	1.5	1.5	0.5

被験者のパフォーマンスを表 1 に示す. ここでは、2 回の試行の平均実行時間(Time)と試行中の障害物との平均衝突回数(Collisions)を比較している. この比較より、被験者 E が他に比べて非常に高いパフォーマンスを記録し口による大の振る舞いを比較すると、衝突後の切り替いが無く、非常に正確かつ効率的な操作を被験者 E が実現していることが確認できた. 図 E は、E を除く被験者といるを開始時(原点)から終すると、E を除く被験者といるで時間当たりの衝突頻度が最も少ない被験者とない。



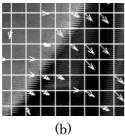


図 5 パターンマッチングによるカメラ映像 からの光学的流動の算出結果

うな高い操作技能を端的に表す振る舞いは、次に述べる秩序立った知覚―行為間のカップリングとしても確認された.

## 4.2 光学流動解析から見た高技能者のもつ 知覚―行為カップリング

操作者がある瓦礫間の遮蔽構造に注目し、そ こに隠された空間を見定めるためにロボットを 移動させる一連の操作について、操作者が知覚 していたカメラからの映像情報をもとに分析を 行った. 分析には、画面を格子状に分割する各 セルの時間的に連続する2フレーム間の画像パ ターンのマッチングによって擬似的に算出した, 映像の持つ光学的流動(optical flow)[4]を利用 した. 図 5(a)は、被験者 E が図内の C でラベリ ングされる遮蔽縁付近を中心に据えて回り込む 移動に対する出力結果から1フレーム分を切り 出したものである.流動は、図 5(b)の拡大図に あるようなベクトル量として算出される. 比較 の簡単化のために、縁 C を含む領域 A とその反 対側の領域 B という左右 2 つの領域に画面を分 割し, 各領域について, そこでの流動の大きさ の平均をプロットすると、図6の系列が得られ た. 領域 A の系列 (AREA A) より, 回り込み の最中は、その焦点となる対象物に関して移動 に伴う光学的な流動が一定になるように、操作 が組織化されていることが読み取れる.

同様の分析を他の被験者に対しても適用して みたが、このような秩序性を持った振る舞いは 彼らの知覚情報の中に確認できなかった.この

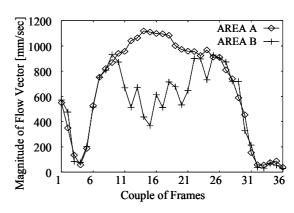


図 6 領域 A—B 間での流動ベクトルの 大きさの変動の比較

結果より、高技能者 E は、流動する知覚に潜む 変化の中に、自身の操作を調節して整合したロ ボットの振る舞いを実現するための手がかり (認知のリソース)を見出していることが推測 される. 特に、被験者 E の操作術は、回り込み という旋回移動時にあってもカメラをロボット 正面には向けず,常に移動方向の障害物とロボ ットの間合いが見て取れるような視野が得られ るように調節されていた点に、他の被験者との 大きな違いがあった. ロボットを大きく移動さ せる際にカメラが正面を向いていないことは, ロボットの遠隔環境内での定位を非常に難しく するため,経験の乏しい操作者は決して取らな い戦略である. しかし逆に, 正面視野のみによ る旋回操作は、移動中のロボット周囲への気づ きをカメラの死角によって制約されるために, 移動開始前には予測もできなかった障害物との 衝突を招くことになる.

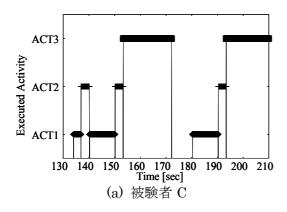
以上より、第二接面におけるシステムの振る 舞いを第一接面における近接情報(変化の知覚) から的確に想起できることが、あるいはその近 接情報の意味をシステムの振る舞いの中に見出 せることが、操作者の優れたパフォーマンスを もたらしていると考えることができる.

#### 4.3 操作行為の様相から見た技能差

さらに、探索行動全体を複数の下位活動の進行としてモデル化することで、技能差を生むインタラクションの様相の違いを調べる.

下位活動へのマッピングの規則についての説明は割愛するが、ロボットの移動とカメラの操作に係わる指令および状態量の計測値をもとに対応付けを行う.ここでは、最も慎重に操作を行った被験者 C の操作系列から得られた兆候に基づいて活動を以下の3つに大きく分類した.

• **目的地への移動(ACT1):** 次に探索する場所 や周囲の状況を確認しやすい場所へロボッ トを大きく動かす.



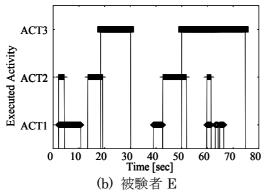


図 7 下位活動の進行として捉えた 一連の探索作業の比較

- 周囲状況の把握 (ACT2): カメラをパンして 正面以外の方向に向け,周囲を見回す.
- 目標物の探索 (ACT3): 目星を付けた遮蔽空間を覗き込むために, カメラ操作とロボットのポジション調整を繰り返す.

また,この分析では,操作に対する多重(=複数活動の並列実行)の解釈を許容している.

以上に従って被験者 C の探索行為を記述したものを図 7(a)に示す. 逐次的に活動を推移させている典型であるが,この傾向は他の低技能者においても同様であり,順を追って作業を遂行している様子が確認できる.これに対して,高技能者 E はその探索行為の中で複数の活動を並行させていると解釈ができる(図 7(b)). 特に,ACT1 と ACT2 の共起に注目すると,旋回中の適切な視界の確保が遠隔での定位を容易にし,正確かつ効率的なパフォーマンスを可能にするという前節の考察に一致するものとなっている.

### 5 考察とまとめ

認知活動に対して強い制約が付与される遠隔操作系では、第二接面におけるシステムの振る舞いを第一接面にある手がかりから的確に想起できることが技量を分ける要因となる。今回の探索実験環境においては、それが旋回中の適切な視界の確保という形で確認された。周囲環境の適切な把握のためには、対象を捉える視点を

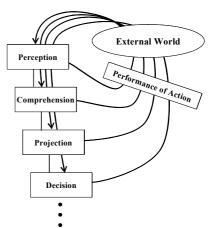


図8 認知を深めるための行動と外界の 密接な繋がり

積極的に移動させ、自分の認識を深めるための行動(epistemic action)[5]が必要となる。それは、状況認識後の意思決定に基づく実行とは違い、外界との繋がりの中で自然に現れるものである(図 8)。

逐次的に活動を推移させる低技能者に見られる操作スタイルは、操作者の直面する状況がそれによって分断されるため、状況に依存する[6]上述の行動の効果が限定的なものになる。逆に、高技能者のそれは、試行錯誤を通じて利用可能なリソースを局面に応じて適切に組織化した結果であると考える。操作者への支援として求められるのは、このような一見無駄とも思える錯誤的な行動を許容する/容易にする振る舞いを両接面間の関係に埋め込むことであると考える.

### 参考文献

- [1] 佐伯:機械と人間の情報処理―認知工学序説,(竹内 啓 編) 意味と情報, pp. 21-54, 東京大学出版会, 1988.
- [2] 佐伯: インタフェースの認知科学, 数理科学, No. 297, pp. 5-9, 1988.
- [3] M. Polanyi: The Tacit Dimension, Routeledge and Kegan Paul, London, 1966 (佐藤 訳: 暗黙知の次元:言語から非言語へ, 紀伊国屋書店, 1980).
- [4] J.J. Gibson: *The Ecological Approach to Visual Perception*, Houghton Mifflin, 1979 (古崎他 訳: 生態学的視覚論―ヒトの知覚世界を探る, サイエンス社, 1985).
- [5] D. Kirsh and P.P. Maglio: On Distinguishing Epistemic from Pragmatic Action, *Cognitive Science*, Vol. 18, pp. 513-549, 1994.
- [6] L.A. Suchman: Plans and Situated Actions: The Problem of Human Machine Communication, Cambridge University Press, 1987.

### パートナーロボットの見まね学習のための知覚システム

A Perceptual System for Imitative Learning of A Partner Robot

久保田 直行

能島 裕介

小島 史男

Naoyuki Kubota

Yusuke Nojima

Fumio Kojima

福井大学

科学技術振興事業機構

神戸大学

Fukui University Japan Science and Technology Corporation

Kobe University

**Abstract:** This paper discusses a perceptual system for a vision-based partner robot. Imitation is a very important role in learning behaviors. Furthermore, the imitation can be used as a tool for communication. In this paper, we propose a method for behavior generation of a partner robot based on a spiking neural network, a self-organizing map, and a steady-state genetic algorithm. Furthermore, we discuss the communication through the interaction and imitation with a human.

### 1. はじめに

近年、様々な観点からコミュニケーションに関す る議論が行われている[4-7]. 例えば,情報の伝達路 等におけるコミュニケーションは,記号を正確に伝えることを目的とし,二つのシステム間で記号へと 変換するエンコーダと記号から情報へ1対1写像する デコーダを共有している限り,記号の持つ意味に曖 昧さは存在しないだろう.一方,人間と人間とのコ ミュニケーションでは,言葉や表情,さらには,身 振りや手振りを介して「伝えるもの」や「伝わるも の」の伝達の仕組みに関する議論が盛んに行われて いる.これらの議論は,二者間で記号はある程度, 共有可能であるが,記号と意味を変換するエンコー ダとデコーダは,二者間で厳密に共有し得ないとこ ろに起因する.このようなコミュニケーションの研 究は奥が深く、言語や記号の獲得や発話、意味理 解,コミュニケーションの社会性,ジェスチャーの 形成,さらには,状況の知覚や意図推論等,多岐に わたる[4-7].実際,自然言語を用いたコミュニケー ションでは,話し手が伝えたい内容を会話を介して 伝えようとするが,話し手が意味する言葉の意味を 聞き手が推定するとともに,聞き手の反応から話し 手は、伝えたい内容を別の言葉を使って表現したり する. 例えば, ファジィ理論の観点から言語ラベル として用いられる記号の意味をメンバーシップ関数 で表現されると仮定すると、ある入力に対するメン バーシップ関数の位置や形状を動かすことにより、 言葉という記号の持つ意味を互いに調整しあうプロ セスとして考えられ,これを解釈とよぶことにする (Fig.1). 図中では,最初,入力xに対応していた 言語ラベルAのメンバーシップ関数を更新すること により,対応言語ラベルがBに更新される様子を示 しており, 言葉の持つ意味が環境や他者との相互作 用の中で調整され,記号の持つ意味の境界を動的に 再構成していると考えられる.また,この入力x は,伝えたい内容に対する点として考えられるが, この点そのものも環境や他者との相互作用の中で変 化しうる.また,知覚システムの観点から考え,他 者と環境を含む外界からの入力情報からxのような

また,ペットロボットやパートナーロボット,サ ービスロボットのように人間との共存・共生を目指 す様々なロボットが研究開発されており,人間との 円滑なコミュニケーションの実現が期待されてい る.本研究では,様々なロボットを用いて,状況に あわせた言語ラベルの境界の再構成,知覚と行為の 関係から境界を生成する行為分節の生成,人間に優 しい行動生成と学習に関する研究を行ってきた [7,8]. 人間とロボットのコミュニケーションのツー ルとして自然言語やジェスチャーがしばしば用いら れる.ジェスチャーをある構造的な動作パターンと して学習・知覚するためには,事前に設計されたジ ェスチャーの知覚ではなく,人間とロボットの直接 的な相互作用の中から創り出される意思疎通のため の記号としてのジェスチャーの生成機構と知覚機構 が必要であろう.

「見まね」は、親から子供への行動の教示において強力な手段となりうる[4-7]. Meltzoffらは、見まねを通しての幼児の学習の仕方について議論しており、(1) imitative babbling、(2) imitation of body movement、(3) imitation of actions on object、(4) imitation based on inferring intentions of othersとして段階的に分類している[6]. また、Andryらは、見まねは、子供どうしの相互作用に基づくコミュニケー

ションにおいて,重要な役割を果たすと議論している[4].

ロボット工学において,人間の巧みな動作パター ンを再現するために,人間の動作を模倣する数多く の研究が行われている. 例えば, 初期の産業用口 ボットは,マスタースレーブ型マニピュレータを用 いた教示が行われていた.これは,人間の手作業に おける一連の手の運動の記憶と再生であり、直接的 な動作の教示が可能である反面,人間の腕の構造と ロボットの腕の構造が異なるため、何らかの補正が 必要になる、また、カメラからの画像を用いて、腕 の動きを取り込み,解析的にロボットの腕の動きを 生成する手法では,ロボットのダイナミクスにあわ せて,最適化されている.しかしながら,これらの 研究は、タスク遂行のかたちで動作を再現すること を目的としているだけで,状況にあわせて自ら動作 を再現する構造にはなっていない. すなわち, Meltzoffらの議論の観点から,(3) imitation of actions on objectまでの段階としての見まねであると考えら れる.したがって,状況や目的にあわせて獲得済み 行動を再利用するための枠組みが必要となる. 本研 究では,人間とロボットの相互関係形成のために 「見まね」に基づく行動生成手法を提案するととも にジェスチャーの知覚に関する議論を行う.本稿で は,最初に,検出した人間の手の動作を抽出する手 法を提案し,次に,抽出した手の動作にあわせた軌 道を生成する手法を提案する.最後に,パートナー ロボットHubotを用いた実験結果を示し,提案手法 の有効性に関する議論を行う.

### 2.パートナーロボットの見まね

### 2.1 見まね学習とコミュニケーション

模倣学習は,教示者の動作を学習者が模倣する一 方的な学習であるが,実際の教示は,教示者が学習 者の学習状態等を見ながら行う双方向的な学習であ る場合が多い.2者,あるいは,それ以上の間での 相互作用に基づく社会的学習は,ロボットへの教示 にも有効な学習であると考えられる[7]. 見まね学習 は,学習者が,試行錯誤を繰り返し,技能を獲得す る発見学習と異なり,他者を介して行われる.すな わち、他者のモデルを追従することによりモデルと 同じ技能を獲得するため、モデル観察とモデル模倣 の二つの過程を必要とする[10].実際,前半のモデ ルの観察のみで学習する場合も多く,「観察学習」 と呼ばれる.また,後半のモデル模倣は,教示者が いなくなった場合,行動がとれなくなるため,教示 者が手がかりにしているものを学習する「模倣によ る学習」が行われるようになる.

また,見まねという行為は,幼児間のコミュニケーションの手段としても用いられ,社会的コミュニケーションを介して模倣学習から模倣による学習が行われている.さらに,見まねを介したコミュニケーションでは,乳児期の終わり頃の意志伝達には,「指さし」や「あいさつ」等の身振り語が使われ

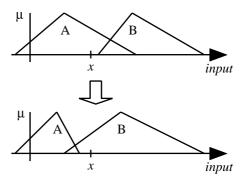


Fig.1 Membership functions updated through interaction with others

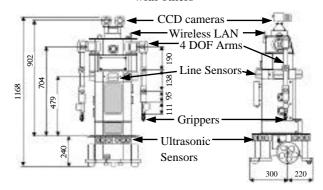


Fig.2 A human-like partner robot; Hubot

る.身振りは,最初,「語」としての働きを持っているわけではなく,驚きや感情の表出として現れるが,この身振りに対して,身近な大人が,応答することを介して,伝達の道具として「身振り語」が機能する.したがって,見まね学習は,単に技能の模倣だけでなく,社会的なコミュニケーションを実現するための有効な手段になりうる.

本稿では,見まね学習を実現するために,まず,検出した人間の手の動作を抽出するために定常状態遺伝的アルゴリズム(steady-state genetic algorithm; SSGA),スパイキングニューラルネットワーク(spiking neural network; SNN),自己組織化マップ(self-organizing map; SOM)を用いたモデル観察と,SSGAと軌道データベースを用いたモデル学習手法を提案し,以下に詳細を示す.

### 2.2.パートナ - ロボットの視覚システム

本研究では、パートナーロボットとしてHubotを開発した(Fig.2). 台車部にPioneer 2を用い、両腕に4自由度のマニピュレータ、頭部にパンチルト機構を持つCCDカメラが取り付けられている. さらに、赤外線ラインセンサが取り付けられており、ロボット周囲の対象物までの距離が計測でき、人間等の位置を検出するのに用いられる. ロボットはCCDカメラから 画像を取り込み、人間を検出する(Fig.3). 人間の検出後、手の運動を抽出し、手の動作時系列は、ロボットへのセンサ入力となる.

CCDカメラから取り込まれる画像から手の動作抽出を簡単化するために、緑のグローブを着用しても

らうこととする(Fig.4). RGB空間で表現されてい る取り込まれた画像は, HSV空間に変換され, 閾値 処理により、グローブに対応する色を摘出する (Fig.4).次に,グローブをSSGAを用いたテンプ レートマッチングに基づき抽出する. Fig.5に目標物 抽出のために使用するテンプレートの候補表現を示 す.ここで,i番目の個体であるテンプレート $P_i$ を構 成する8個の点は,中心 $O(g_{i,8}, g_{i,9})$ から $g_{i,i}$ の距離にあ る点jの座標を $(g_{i,8},+g_{i,j}\cos(j/4), g_{i,9}+g_{i,j}\sin(j/4)), i=1,$ 2, ..., pn, j=0, 1, ..., 7として表す. したがって,解 候補は $0 < g_{i,j} < g_{\text{max}}$  (j=0, 1, ..., 7) 及び $0 < g_{i.8} < X$ ,  $0 < g_{i,9} < Y$ を満たすパラメータ $(g_{i,0}, g_{i,1}, ..., g_{i,9})$ から構 成される.SSGAは連続世代交代モデルであり,適 応度の低い個体は遺伝的操作により生成された新し い個体と入れ替えられる.本稿では,最小適応度除 去法,エリート交叉及び適応型突然変異を用いる. エリート交叉はランダムに選択した個体と最良個体 間で多点交叉を行う、次に、下記の正規乱数を用い た適応型突然変異が行われる.

$$g_{i,j} = g_{i,j} + \alpha_{p_j} \frac{f_{P \max} - f_{Pi}}{f_{P \max} - f_{P \min}} + \beta_{p_j} = N(0,1)$$
 (1)

ただし, $f_{Pi}$ をi番目の個体の適応度, $f_{Pmax}$ と $f_{Pmin}$ を全個体中の最大,最小の適応度とし, $\alpha_{Pj}$ と $\beta_{Pj}$ を係数,オフセットとする.各個体の適応度 $f_{Pi}$ は,次の式によって計算される.

$$f_{Pi} = C_{Target} - \eta C_{Other}$$
 (2)

ここで $C_{Target}$ と $C_{Other}$ はテンプレート内の目標および他の色に対応する色のピクセル数をそれぞれ示し, $\eta$ はペナルティ項の係数である.したがって,この問題は最大化問題として帰着される.

次に,SSGAを使用した人間検出の手順を説明する.まず,ロボットは,人間を検出するために,ランダムに動き,人間を検知し適切な位置で止まり,SSGAを用いて画像系列から人間の手の動きを検出する. ここで, 検出 された手の位置系列を $\mathbf{G}(t)=(G_x(t),G_y(t)),t=1,2,...,T$ とする.

人間の手の動作パターンを認識するためにSNNを適用する。SNNはパルスニューロンとも呼ばれ,細胞が持つ発火現象と細胞間のパルスの伝達機構を導入したダイナミクスを模倣したモデルの一つである。基本的に,SNNはHodgkin-Huxley方程式に従うが,本稿では,計算コストの削減のために以下のように単純化する。i番目のニューロンの内部状態  $h_i(t)$ は次のように計算される。

$$h_i(t) = \tanh\left(h_i^{syn}(t) + h_i^{ext}(t) + h_i^{ref}(t)\right)$$
(3)

他のニューロンからの出力も含む $h_i^{syn}(t)$ は次の方程式によって計算される.

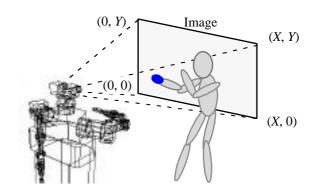
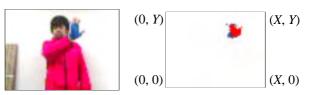


Fig.3 A coordinate system for image processing of a robot



(a) An original image (b) A detected globe Fig.4 Image processing for detecting a human hand

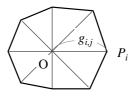


Fig.5 A candidate solution for detecting a target

$$h_i^{syn}(t) = \gamma^{syn} \ h_i(t-1) + \sum_{j=1}^{N} w_{j,i} \ p_j(t-1)$$
 (4)

ここで, $w_{j,i}$ はj番目からi番目のニューロンへの結合強度, $p_j(t)$ は離散時間tにおけるj番目のニューロンの出力, $\gamma^{syn}$ は減衰率,Nはニューロン数を示す. $h_i^{ext}(t)$ は環境からi番目へのニューロンへの入力であり, $h_i^{ref}(t)$ は不応期の役割を果たし,ニューロンが発火した場合, $\gamma^{ref}$ を減衰率とすると,下記のような抑制項として働く.

$$h_i^{ref}(t) = \begin{array}{c} \gamma^{ref} & h_i^{ref}(t-1) - R & if \ p_i(t-1) = 1 \\ \gamma^{ref} & h_i^{ref}(t-1) & otherwise \end{array}$$
 (5)

i番目のニューロンの内部状態 $h_i(t)$ が事前に決められた閾値よりも大きくなった場合,以下のようなパルスとして出力される.

$$p_{i}(t) = \begin{cases} 1 & if \ h_{i}^{ref}(t) & \theta_{i} \\ 0 & otherwise \end{cases}$$
(6)

ここでθ<sub>i</sub>は発火の閾値である.人間の手の動きを学習するために,ラジアル基底関数を用いてファジィ分割を行い,各ニューロンはFig.6に示す平面グリッド上に配置され(N=25),i番目のニューロンへの環境からの入力として,人間の手の座標を以下のラジアル基底関数により出力された適合度を用いる.

$$h_i^{ext}(t) = \exp \left[ -\frac{\left\| \mathbf{c}_i - \mathbf{G}(t) \right\|^2}{\sigma^2} \right]$$
 (7)

ここで  $\mathbf{c}_i$ = $(cx_i, cy_i)$ は,画像上のi番目のニューロンの座標, $\sigma$ は標準偏差を表す.したがって,人間の手の位置 $\mathbf{G}(t)$ = $(G_x(t), G_y(t)), t$ =1, 2, ..., Tからパルス出力 $p_i(t)$ の時系列が得られる.結合強度は以下のヘブ則を用いた学習に基づき更新される.

$$w_{j,i} = \tanh \left( \gamma^{wgt} \quad w_{j,i} + \xi^{wgt} \quad p_i(t) \quad p_j(t-1) \right)$$
(8)

ここで、γ<sup>wht</sup>を減衰率、ξ<sup>wgt</sup>を学習率とする.人間の 手の位置の軌道にそって隣接するニューロンが、へ ブ則に基づく学習により容易に発火されるので、 SNNは様々なジェスチャの発火のパターンを記憶す ることができる.時空的文脈である人間のジェス チャをクラスタリングするために、SOMを適用す る.SOMへの入力は、SNNの発火パターンとし、以 下のように変換する.

$$\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_N)$$

$$v_i = \int_{t=1}^{T} t \ p_i(t)$$

$$v_i = \int_{t=1}^{T} t \ p_i(t) \ p$$

各ノードの参照ベクトルを $\mathbf{r}_i(t)=(r_1, r_2, ..., r_M)$ とすると , この入力情報ベクトル $\mathbf{v}$ とのユークリッド距離は , 以下のように定義され ,

$$d_i = \|\mathbf{v} - \mathbf{r}_i\| \tag{10}$$

距離を最小とするノードは,

$$k = \underset{i}{\operatorname{argmin}} \{ \| \mathbf{v} - \mathbf{r}_i \| \}$$
(11)

により与えられる.さらに, $\zeta_{k,i}^{SOM}$ を近傍関数, $\xi^{SOM}$ を学習係数とすると,以下の式に従い,参照ベクトルが更新される.

$$\mathbf{r}_{i} = \mathbf{r}_{i} + \xi^{SOM} \quad \zeta_{k,i}^{SOM} \quad \left\| \mathbf{v} - \mathbf{r}_{i} \right\|$$
(12)

ここでSOMの選択されたノード番号が分類されるジェスチャーの番号とする.

### 2.3.人間の動作の模倣

SSGAを用いた人間の動作を模倣するためにロボットアームの軌道を生成する方法を説明する[9].全体の手順をFig.7に示す.まず,モデル観察で抽出した手の動き(変化)に対するロボットの模倣軌道をロボットアームの中間姿勢列で表現することに対する.軌道候補(個体)番号をi,中間姿勢番号をk,関節の番号をjとすると,関節角度は $\theta_{i,j,k}$ として表現される(Fig.8).SOMの各ノードには,その抽出したジェスチャーに対応する軌道列をデータベースとして保持している.モデル観察の結果,SOMで選択されたノード番号が出力され。とともに,以前に獲得されている軌道が出力され,その軌道に以下のような正規乱数を加えることでSSGAの初期個体群を生成する.

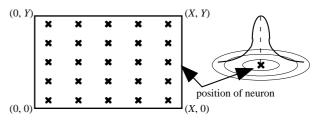


Fig.6 Spiking neurons arranged on the image

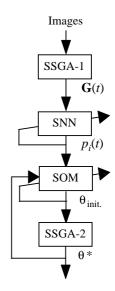


Fig. 7 The architecture of structured learning for generating a behavior of the partner robot

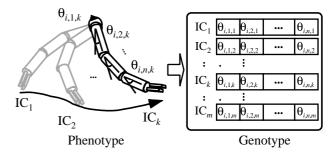


Fig. 8 The representation of the *i*th trajectory candidate composed of *m* intermediate configurations

$$\theta_{i,j,k} = \theta_{j,k}^* + \beta_j^I N(0,1) \tag{13}$$

個体である各軌道候補の適応度 $f_{Hi}$ は,以下のように 計算され,最小化問題として扱う.

$$f_{Hi} = w_1 f_{pos} + w_2 f_{dis} \tag{14}$$

ここで, $f_{pos}$ は,中間目標地点の座標と手先座標との誤差とし, $f_{dis}$ は,2つの姿勢間における関節角度の変化量の和とし, $w_1$ と $w_2$ は,重み係数とする.また,最小化問題であるため,評価の値が最大の個体を淘汰し,突然変異には,下記の適応型突然変異を用いる.

$$\theta_{i,j,k} = \theta_{i,j,k} + \alpha_{Hj} \frac{f_{Hi} - f_{H \min}}{f_{H \max} - f_{H \min}} + \beta_{Hj} = N(0,1)$$
(15)

ただし ,  $f_{Hi}$ をi番目の個体の適応度 ,  $f_{Hmax}$  と  $f_{Hmin}$ を

全個体中の最大,最小の適応度とし, $\alpha_{Hj}$  と  $\beta_{Hj}$ を係数,オフセットとする.

以上の設定で,逐次,人間の動作にあわせて,口ボットが中間姿勢系列としての軌道を生成し,再現する.さらに,最良個体の軌道は,分類されたジェスチャーに対応する行動として,データベースに蓄積される.

### 3 実験例

パートナーロボットHubotを用いたモデル模倣の実験結果を示す.実験で用いた画像処理と軌道生成のSSGAのパラメータをTable 1とTable 2に示す.画像サイズは(160,120)とする.まず,SSGAによる被験者のグローブの動きを模倣するための動作パターンとして知覚し(モデル観察),軌道を生成する(モデル模倣).

SOMの選択されたノードの履歴をFig.9に示す. ここで,人間が手を動かし,ロボットが観察し,模 倣するまでのプロセスを1試行とする.まず,被験 者は,どのようにロボットが反応するのか知らない ために,様々な手の動きを提示する.ロボットは, ある時間だけ手の動きを見た後,軌道生成を行い動 作するため、反応の遅れが生じるので、被験者自信 も手をどのように動かせば良いのかわからない.何 回か繰り返すうちに、被験者は、ロボットのモデル 観察と動作の周期がわかるようになり、うまく手を 動かすことができるようになった、それと同時に、 20試行ごろから,繰り返し,手を左右に動かすよう になり,SOMは,ノード8,ノード11,及びノード 12を用いて,この左右の手の動きを分類するように なった.さらに40試行あたりから,被験者は,手を 上下に動かすようになり、SOMは、ノード5及びノ ード16を用いて,この上下の手の動きを分類するよ うになった.このように,SNNとSOMを用いること で,手の動作パターンを分類できるようになった.

次に、被験者のグローブの動き (Fig.10(a))の検出結果をFig.10(b)に示す.この手の動きの座標をSNNの入力として用いた結果が、Fig.10(c)であり、Fig.10(b)では途中の手の位置が抜けているのにもかかわらず、Fig.10(c)では時系列の発火パターンとして、うまく補間している様子がわかる.さらに、ロボットの見まねの結果をFig.11に示す.同様に被験者が上下に手を動かした場合のロボットの見まねの結果をFig.12とFig.13に示す.抽出した手の動きをSNNがうまく補間している様子が分かる.以上のように、SSGA、SNN及びSOMを用いた提案手法により、見まねに必要な知覚が行えていると考えられる.

### 4 さいごに

本稿では,まず,コミュニケーションに関する議論を行い,記号の意味を特定するためには,境界を調整しあうプロセスが必要であることを述べた.次

Table 1 Parameters used in SSGA for human detection

Chromosome length	10
Population size (pn)	60
Times of evaluations	300
Crossover rate	0.2
Mutation rate	1.0

Table 2 Parameters used in SSGA for trajectory planning

Chromosome length	24
$(n \text{ DOF} \times m \text{ IC})$	(4×6)
Population size (gn)	200
Times of evaluations	1000
Crossover rate	0.2
Mutation rate	1.0

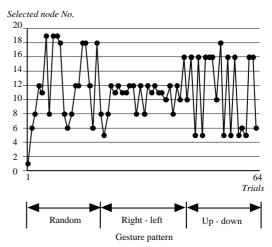


Fig.9 History of the selected node in SOM

に,ロボットが知覚システムにおいて,観測情報か らある境界を生成する例として、ジェスチャーを用 い,スパイキングニューラルネットワークと自己組 織化マップを用いることにより,人間の手の動作パ ターンを分類可能であることを示した.しかしなが ら,開発したパートナーロボットHubotは,アーム をそれほど高速には動かせないため、人間の提示す る動作パターンを全く同じようには再現できない が,人間の手の動作パターンの分類には成功してい る.実際に獲得した軌道を人間に提示することによ り,人間は,ロボットが獲得した行動を認識し,人 間とロボットの間で、ある種の境界を持つ複数の手 振りパターンの共有に成功している.もちろん,こ の手振りパターンがある特定の意味を持ちジェス チャーとして機能するためには、個々の手振りパタ 一ンにある特定の行為や伝達情報を見いだすように ならなければならない. そのためには, ロボット自 身が見まねした行動を実環境で再現し、その行動の 意味を理解していく必要がある.

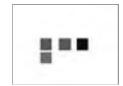
今後の課題として,人間と相互作用するロボット



(a) Robot view



(b) Detected hand positions



(c) SNN outputs

Fig.10 The results of image processing at the 32nd trial



(a) Initial position



(b) Human hand movement

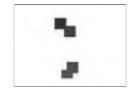


(c) Robot hand movement

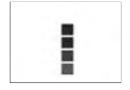
Fig.11 The snapshots of human motion and Hubot arm trajectory at the 32nd trial



(a) Robot view



(b) Detected hand positions



(c) SNN outputs

Fig.12 The results of image processing at the 62nd trial



(a) Initial position



(b) Human hand movement



(c) Robot hand movement

Fig.13 The snapshots of human motion and Hubot arm trajectory at the 32nd trial

の反射行動等に,獲得した動作系列を取り入れる枠組みを提案する必要がある.さらに,人間とロボットが相互適応することによって,コミュニケーション,意識,学習との関係について議論を行う予定である.

#### 参考文献

- [1] Jang J-SR, Sun C-T, Mizutani E (1997) Neuro-fuzzy and soft computing, Prentice-Hall, Inc.
- [2] Syswerda G (1991) A study of reproduction in generational and steady-state genetic algorithms, In foundations of genetic algorithms, Morgan Kaufmann Publishers, Inc.
- [3] Pfeifer R, Scheier C (1999) Understanding intelligence, The MIT Press.
- [4] Andry P, Gaussier P, Moga S, Banquet J P (2001) Learning and communication via imitation: An autonomous robot perspective, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 31 (5).
- [5] Billard A (2002) Imitation. In Arbib M A (ed.), Handbook of Brain Theory and Neural Networks, MIT Press, 566-569.
- [6] Rao R P N, Meltzoff A N (2003), Imitation Leaning in Infants and Robots: Towards Probabilistic

- Computational Models, Proc. of Artificial Intelligence and Simulation of Behaviors.
- [7] Morikawa K, Agarwal S, Elkan C and Cottrell G (2001), A Taxonomy of Computational and Social Learning, Proc. of Workshop on Developmental Embodied Cognition.
- [8] Fukuda T, Kubota N. (1999), An intelligent robotic system based on a fuzzy approach, Proceedings of IEEE 87(9): 1448-1470.
- [9] Kubota N (2003) Intelligent structured learning for a robot based on perceiving-acting cycle, Proc. of the Twelfth Yale Workshop on Adaptive and Learning Systems, 199-206.
- [10]山内,春木編者(2001),学習心理学 行動と認 知,サイエンス社.
- [11]内田伸子(1999), 発達心理学, 岩波書店.

### 連絡先:

〒910-8507

福井市文京3-9-1

福井大学工学部知能システム工学科

久保田 直行

電話/FAX 0776-27-8033

Email: kubota@iicx.ia.his.fukui-u.ac.jp

# マニピュレータの初期姿勢を考慮した Topology Representing Network による冗長マニピュレータの手先位置制御

Redundant manipulator control by using Topology Representing Network according to the initial posture

山川 烈 堀尾 恵一 上野 圭介 Takeshi Yamakawa Keiichi Horio Keisuke Ueno

### 九州工業大学

Kyushu Institute of Technology

**Abstract:** Since it is difficult to calculate the inverse kinematics in robotics, it is effective to solve it by using learning algorithm. An algorithm applied Topology Representing Network has been presented. In this algorithm, a redundant manipulator is controlled not according to the initial posture, so the manipulator can't be led in small joint angle displacement. In our algorithm, the manipulator is controlled according to the initial posture, so the manipulator is led in small joint angle displacement.

### 1 はじめに

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

これらの問題を解決するために,学習機能を用い て逆運動学を解く手法が提案されている[1]-[3]. 著 者らは, Topology Representing Network(TRN)[4] を用いた手先位置制御手法を提案した[5].これは, 先ず学習によって手先位置の空間と関節角度の空 間を合わせた空間にネットワークを構築する.学 習後に,構築されたネットワークを用いて,初期 姿勢から少ない関節角度の変位で手先位置制御を 行う手法である.しかし,この手法では予め作業 空間に障害物を置いた状態で学習を行うので,学 習後に障害物の位置や個数,形状が変化すると再 度学習を行う必要がある.一方で,人間は腕を動 かす際,視覚等の情報を用いて障害物を見分け,処 理して衝突を避けるように行動する. 本研究では, 障害物の位置や個数,形状が変化した場合でも,障 害物を見分け,マニピュレータの手先や関節の位置

を用いることにより再学習を必要としない手先位 置制御手法を提案する.

## 2 TRNを用いたマニピュレータの手 先位置制御

TRN はニューラルネットワークの一つであり,ベ クトル量子化を行う手法として知られている.TRN は , N 個のユニットを有し , ユニット i は重みベク トル $w_i$ で表現される.著者らが提案したマニピュ レータの手先位置制御手法では,TRNの重みベク トルを  $W_i = (w_i, u_i)$  と定義し, さらに重み行列 (ヤコビアン)A<sub>i</sub>を付加した.ここで重みベクトル $oldsymbol{w}_i$ ,  $oldsymbol{u}_i$  はマニピュレータの手先位置と関節角度に それぞれ対応し,重み行列 $A_i$ は,目的手先位置と 重みベクトルとの差を線形近似で関節角度の差に 変換する行列である. 学習時は, それぞれのユニッ トの重みベクトルを変化させることにより入力空 間の近似を行い,同時に,重みベクトルのユーク リッド距離が近いユニットにリンクを張ることに よりユニットの近傍関係を構築する.実行時は,そ の構築されたネットワークを用いて初期姿勢から 少ない関節角度の変位で手先位置制御を行う.

この手法は,作業空間にあらかじめ障害物を置いた状態で学習を行わなければならないので,障害物の位置や数,形状が変化すると再学習を行う

必要がある.

以下に学習アルゴリズムと実行アルゴリズムを 示す.

### 2.1 学習アルゴリズム

学習時には,マニピュレータが障害物に衝突しない手先位置 X とその関節角 Y を学習ベクトルI = [X,Y] として,TRN に提示する.

- 0. 重みベクトル $w_i$ ,  $u_i$  と,ヤコビアン $\mathbf{A}_i$  を初期化し,ユニットi-j 間の関節空間上での距離と,リンクの有無を示す $C_{ij}$  を $C_{ij}=0$  とする. $C_{ij}=0$  は,ユニットi-j 間にリンクが無いことを示す.
- 1. 学習ベクトル I = [X,Y] と各ユニットとの 距離  $d_i$  を次式に従って計算する .

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

ただし, $0 \le \mu \le 1$ である.

2.  $d_i$  を用いてユニットの順位を決定する.

$$d_{i_0} \le d_{i_1} \le \dots \le d_{i_{N-1}}. \tag{2}$$

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

$$\boldsymbol{w}_{i}^{\text{new}} = \boldsymbol{w}_{i}^{\text{old}} + \varepsilon(t)g(k_{i})(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{w}_{i}^{\text{old}})$$
 (3)

$$\boldsymbol{u}_{i}^{\text{new}} = \boldsymbol{u}_{i}^{\text{old}} + \varepsilon(t)g(k_{i})(\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{u}_{i}^{\text{old}})$$
 (4)

$$\mathbf{A}_{i}^{\text{new}} = \mathbf{A}_{i}^{\text{old}} - \varepsilon(t)g(k_{i})\frac{1}{\|\mathbf{X} - \mathbf{w}_{i}\|^{2}} \frac{\partial E}{\partial \mathbf{A}_{i}}$$
(5)

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

4. ユニット $i_0$ ,  $i_1$ の間にリンクを張り, リンクの歳 $l_{i_0i_1}$ をゼロにする. 具体的には,  $C_{i_0i_1} = \|u_{i_0} - u_{i_1}\|$ とし,  $l_{i_0i_1} = 0$ とする.

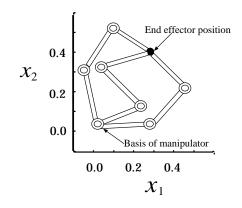


図 1: 冗長マニピュレータの例.

5. ユニット  $i_0$  と継っているリンクの歳を一つ増やす. 具体的には ,  $C_{i_0j}>0$  を満たす全てのリンクに次式を用いてリンクの歳  $l_{i_0j}$  を更新する .

$$l_{i_0 j} = l_{i_0 j} + 1$$
 (6)

- 6. ユニット $i_0$  と継っているリンクで ,寿命L(t) を越えたリンクを削除する .具体的には , $C_{i_0j}>0$  かつ  $l_{i_0j}>L(t)$  ならば , $C_{i_0j}=0$  とする .
- 7. step 1.~ step 7. を学習回数繰り返す.

### 2.2 実行アルゴリズム

実行時は,学習時に構築されたネットワークを 用いてマニピュレータの初期姿勢考慮に入れ,経路 計画と手先位置制御を行う.先ず,目的位置に手先 を指すためのユニット (勝者ユニット)を決定する. 冗長マニピュレータの場合は同じ手先位置を複数 の姿勢で指すことができるので (図1),目的手先位 置だけで勝者ユニットを決定しても少ない関節角 変位で手先位置制御が行えるとは限らない.この 手法では,目的手先位置付近のユニットを複数選 び出し,それらを勝者候補ユニットとする.それ らの中で最も少ない関節角変位で手先位置制御を 行うことができるものを勝者ユニットとする.構 成を図2に示す.

実行アルゴリズムを以下に示す.

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

$$\|\boldsymbol{Y}_{p} - \boldsymbol{u}_{r_{0}}\| \leq \|\boldsymbol{Y}_{p} - \boldsymbol{u}_{i}\| \tag{7}$$

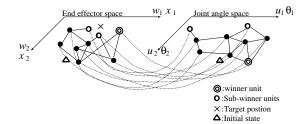


図 2: 実行アルゴリズム.

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

$$\|X - w_{i_0}\| \le \|X - w_{i_1}\| \le \cdots$$
 (8)

- 3. 始点ユニットから,リンクの持つ距離  $C_{ij}$  を用いて各勝者候補ユニットまでの最短経路を求め,その中で最短経路で結ばれている勝者候補ユニットを勝者ユニット  $r_{max}$  とし,勝者ユニット  $r_{max}$  とその経路上のユニット  $(r_1,\cdots,r_{max})$  を得る.本研究では,最短経路を求める際にダイクストラ法を用いる.
- 4. 経路上のユニット  $r=(r_0,r_1,\cdots,r_{max})$  を用いて関節角  $\vec{\theta_r}$  を求める.

$$\vec{\theta_r} = \boldsymbol{u_r} + \boldsymbol{A_r} (\boldsymbol{X_r'} - \boldsymbol{w_r}). \tag{9}$$

$$\boldsymbol{X}'_{r} = \begin{cases} (\boldsymbol{X}_{p} + \boldsymbol{w}_{r} + \boldsymbol{w}_{r+1})/3 & , r = r_{0} \\ (\boldsymbol{w}_{r-1} + \boldsymbol{w}_{r} + \boldsymbol{w}_{r+1})/3 & \\ , r = r_{1}, \cdots, r_{max-1} \\ (\boldsymbol{w}_{r-1} + \boldsymbol{w}_{r} + \boldsymbol{X})/3 & , r = r_{max} \end{cases}$$

 $X_n$  は現在の手先位置を表す.

5. 最終的な関節角  $\vec{\theta}$  を求める.

$$\vec{\theta} = \boldsymbol{u}_{r_{max}} + \boldsymbol{A}_{r_{max}}(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{w}_{r_{max}}) \qquad (10)$$

### 3 提案アルゴリズム

本研究では,障害物の位置や数,形状が変化しても再学習を必要としないアルゴリズムを提案する.提案アルゴリズムは三段階に分かれている.先

ず,障害物が無い状態で学習を行い,手先位置と関節角度を合わせた空間にネットワークを構築する.次に,構築されたネットワークを障害物が在る状態で適応させる.具体的には,障害物に衝突しないような軌道計画を行うために,ユニットまたはリンクを削除する.最後に,残ったネットワークを用いて軌道計画と手先位置制御を行う.障害物に変化があった場合は二段階目の作業から始めるだけで良いので,提案アルゴリズムは,障害物の変化による再学習を必要としない.

### 3.1 学習アルゴリズム

提案手法では,各関節の位置 Z も学習によって獲得するために重みベクトルに  $v_i$  を付加する.この重みベクトル  $v_i$  を適応アルゴリズムで用いることにより,マニピュレータが障害物に衝突する,しないを判定できるようになる.

- 0. 重みベクトル  $w_i$  と ,  $u_i$  ,  $v_i$  , ヤコビアン  $\mathbf{A}_i$  を初期化し , ユニット i-j 間の関節空間上での距離と , リンクの有無を示す  $C_{ij}$  を  $C_{ij}=0$  とする .
- 1. 学習ベクトル I と各ユニットとの距離  $d_i$  を次式に従って計算する .

$$d_i = \|X - w_i\| + \|Y - u_i\|$$
 (11)

2.  $d_i$ を用いてユニットの順位を決定する.

$$d_{i_0} \le d_{i_1} \le \dots \le d_{i_{N-1}}. \tag{12}$$

3. 全てのユニットに対して,次式で重みベクトルと,重み行列,ヤコビアンを更新する.

$$\boldsymbol{w}_{i}^{\text{new}} = \boldsymbol{w}_{i}^{\text{old}} + \varepsilon(t)g(k_{i})(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{w}_{i}^{\text{old}})$$
 (13)

$$\boldsymbol{v}_i^{\text{new}} = \boldsymbol{v}_i^{\text{old}} + \varepsilon(t)g(k_i)(\boldsymbol{Z} - \boldsymbol{v}_i^{\text{old}})$$
 (14)

$$\boldsymbol{u}_{i}^{\text{new}} = \boldsymbol{u}_{i}^{\text{old}} + \varepsilon(t)g(k_{i})(\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{u}_{i}^{\text{old}}) \quad (15)$$
$$\boldsymbol{A}_{i}^{\text{new}} = \boldsymbol{A}_{i}^{\text{old}} - \varepsilon(t)g(k_{i})\frac{1}{\|\boldsymbol{X} - \boldsymbol{w}_{i}\|^{2}}\frac{\partial E}{\partial \boldsymbol{A}_{i}} \quad (16)$$

- 4. 従来手法の手順 4.~7. と同じ.
- **5.** step 1. ~ step 5. を学習回数繰り返す.

#### 適応アルゴリズム 3.2

障害物の変化に適応するために,学習アルゴリ ズムで得た重みベクトル $oldsymbol{w}_i$ , 重み行列 $oldsymbol{\mathrm{v}}_i$ を用い て,障害物にマニピュレータが衝突するユニット またはリンクを削除する.削除される場合のユニッ トとリンクを図3に示す.図3(a),(b)では,ユニッ トi が示す手先位置  $w_i$  にマニピュレータの手先位 置を合わせた場合に,障害物と衝突することが分 かるので,そのユニットiと,ユニットiに継って る全てのリンクを削除する.図3(c),(d)では,図 中に示すリンクに沿って手先位置を動かした場合、 障害物と衝突することが分かるのでそのリンクを 削除する.以上により,障害物が変化した場合,再 学習する必要無く適応アルゴリズムから始める.

#### 実行アルゴリズム 3.3

適応アルゴリズムで削除されなかったユニット とリンクを用いて実行アルゴリズムを行う.基本 的には従来の手法と変わりは無いが,従来の手法 で勝者候補ユニットを選んだ場合,始点ユニット  $r_0$  とリンクを介してないユニットだけが選ばれる 可能性があるので,本研究では,勝者候補ユニット には始点ユニットとリンクを介して継っていて,か つ目的手先位置に近いユニットが数個選ばれる.

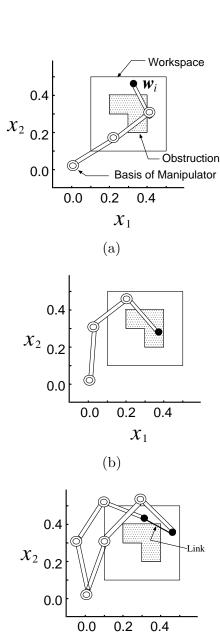
 $oldsymbol{0}$ . 現在の関節角  $oldsymbol{Y}_{v}$  から , 始点ユニット  $r_{0}$  を次 式で決定する.

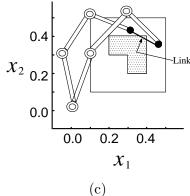
$$\|\boldsymbol{Y}_{n} - \boldsymbol{u}_{r_{0}}\| \leq \|\boldsymbol{Y}_{n} - \boldsymbol{u}_{i}\| \tag{17}$$

- 1. 目的手先位置 *X* を入力する.
- 2. 始点ユニット  $r_0$  とリンクを介して継っていて, かつ目的手先位置に近いユニットを数個選び 出し,それらを勝者候補ユニットとする.

$$\|X - w_{i_0}\| \le \|X - w_{i_1}\| \le \cdots$$
 (18)

3. 従来手法の3.~5.と同じ.





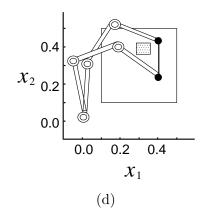


図 3: 削除されるリンク.

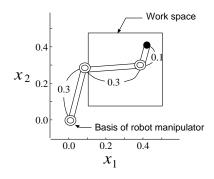


図 4: マニピュレータとその作業空間.

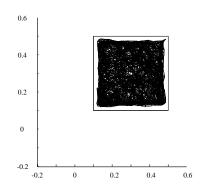


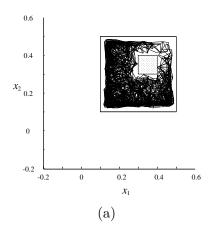
図 5: 学習後のユニットとリンクを作業空間.

### 4 シミュレーション

本研究で提案した手先位置制御の有効性を示すために,障害物の位置,数,大きさを変えてシミュレーションを行った.作業空間は 2 次元  $(x_1,x_2)$  とした.ロボットアームは 3 軸のスカラロボットアームである.ロボットアームと作業空間を図??に示す.シミュレーションにおいて,勝者候補の数を 6 ,ユニットの数 N=1000,学習総回数  $T_{max}=100000$  とした.学習係数  $\varepsilon(t)$ ,順位係数 g(t),寿命係数 L(t) はそれぞれ  $\varepsilon(t)=\varepsilon_{ini}(\varepsilon_f/\varepsilon_{ini})^{t/T_{max}}$ , $g(k_i)=\exp(-k_i/\lambda(t))$ , $L(t)=L_{ini}(L_f/L_{ini})^{t/T_{max}}$  によって決まる.係数  $\lambda(t)$  は  $\lambda(t)=\lambda_{ini}(\lambda_f/\lambda_{ini})^{t/T_{max}}$  によって決まる.それぞれの係数は, $\varepsilon_{ini}=1.0$ , $\varepsilon_f=0.05$ , $\lambda_{ini}=300$ , $\lambda_f=1$ , $L_{ini}=1$ , $L_f=50$  とした.

学習ベクトル X は , 以下の方法によって求められる .

1. ロボットマニピュレータの各関節にランダムな値を入力する.



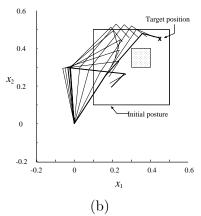


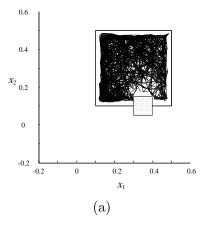
図 6: シミュレーション1.

2. もし手先位置が入力空間内で,かつロボットマニピュレータ自身に接触していなければ,その手先位置 X とその関節角 Y を学習ベクトル I とし,その時の関節の位置を Z とする.

学習後の重みベクトル $w_i$ とリンクを作業空間に写像したものを図5に示す.また,図6-図8に障害物の位置,数,形状を変えてシミュレーションを行った結果を示す.それぞれ図6-図8の(a)は,適応アルゴリズム後のユニットとリンクである.また,(b)はそれらのリンクを用いて手先位置制御を行った結果である.これらの結果より,障害物の位置,個数や形状が変化しても再学習を必要とすることなく,本提案手法は手先位置制御を行えることが解る.

### 5 おわりに

本研究では,障害物の位置や個数,形状が変化 しても再学習を必要としない手先位置制御手法を



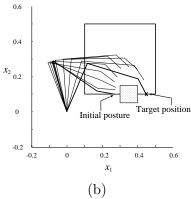
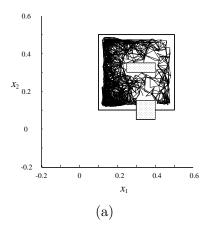


図 7: シミュレーション2.

提案した.具体的には,先ず障害物の無い状態で学習を行い,手先や関節の位置を用いてマニピュレータが衝突するユニットやリンクを削除することにより,障害物の変化に再学習することなく適応するアルゴリズムを提案した.

### 参考文献

- [1] Helge Ritter, Thomas Martinetz, and Klaus Schulten, "Topology-Conserving Maps for Motor Control," Neural Networks from Models to Applications N'EURO,pp579-591,1989
- [2] J. A. Walter, T. Martinetz, and K. Schulten, "Industrial Robot Learns Visuo-motor Coordination by Means of Neural-Gas Network," *Artificial Neural Network*, pp357-364,1991.
- [3] M. Zeller, K. Schulten, and R. Sharma, "Visuo-Based Robot Motion Planning Using A Topology Representing Network", *In Pro-*



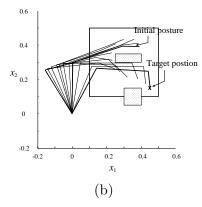


図 8: シミュレーション3.

ceeding of the IEEE Int. Symposium on Intelligent Control,pp7-12,1996.

- [4] T. Martinetz and K. Schulten, "Topology Representing Network," Neural Network, vol.7,No.3, pp507-522,1994
- [5] Takeshi Yamakawa, Keiichi Horio, and Keisuke Ueno, "Robot manipyulator control using topology representing network," Proceeding of the 9th Int. Symposium on Artificial Life and Robotics, vol. 2, pp 498-501, 2003

### [ 問い合わせ先 ]

山川 烈

〒 808-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-4 九州工業大学大学院 生命体工学研究科

Phone: 093-695-6123, Fax:093-695-6133 E-mail: yamakawa@brain.kyutech.ac.jp

### ガボール関数を用いた TAM ネットワークの受容野入力構造

Receptive Field Type Input Layer of TAM Network Using Gabor Function

林 勲
Isao Hayashi
関西大学
Kansai University

前田 裕正 Hiromasa Maeda 情報科学センター

Information Science Research Center Corp.

Abstract TAM (Topographic Attentive Mapping) network is a biologically-motivated neural network. Gabor function is a receptive field model and can detect orientations of objects using a Gaussian envelope and sine/cosine function. In this paper, we formulate a receptive field type input layer for TAM network using Gabor filtering to receptive field of human visual cortex.

#### 1. はじめに

網膜の視覚情報は受容野に対応した各細胞で処理され、対象の知覚はより上位の視覚連合野で認識される [1]. 視覚細胞には、単純型細胞、複雑型細胞、超複雑型細胞等がある。特に、超複雑型細胞はオン反応とオフ反応の受容野をもち、スリット状の光刺激に対して方位選択性を示し、対象の縁を検出する。最近、多くの受容野モデルが提案されている [2-7]. 特に有用なモデルとしてガボール関数 [6,7] がある。ガボール関数はガウス関数と正弦・余弦関数からなる関数であり、任意の周波数成分を抽出するフィルタリング機能をもつ。一方、多くの視覚系ニューラルネットワークが提案されている [8-11]. 特に、TAM(Topographic Attentive Mapping) ネットワーク [11,12] は有用である。入力層、基盤層、カテゴリー層、出力層の4層からなり、神経節細胞から外側膝状体、第一次視覚野を模擬している。

本論文では、TAMネットワークの入力層にガボール関数を用いた受容野構造を定式化する.具体的には、受容野の輝度情報からガボール関数のフィルタリング機能によって知覚対象の縁の16方位選択成分を抽出し、濃度化してTAMネットワークの属性マップを構成する.この画像の入力値と中間層のカテゴリー層、上位層のクラス層における共振学習により画像対象を認識する.ここでは、定式化の有用性を確認するため、文字認識の例を用いて、ガボール関数のパラメータ値に対する方位選択成分画像の感度、TAMネットワークの認識率と頑健性について議論する.

### 2. ガボール関数による受容野入力構造

2 次元正弦関数型ガボール関数 G(x,y) は次のように 定義される.

$$G(x,y) = Ke^{-\frac{1}{2}(\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2})} \times \sin(2\pi f_x x \cos\theta + 2\pi f_y y \sin\theta + \phi)$$

ただし,K は振幅, $(\mu_x,\mu_y)$  はガボール関数の中心, $\sigma_x$  と  $\sigma_y$  は標準偏差, $f_x$  と  $f_y$  は周波数を表す. $\phi=\pi/2$ 

の場合には、正弦関数型ガボール関数は余弦関数型ガボール関数となる。図 1 にガボール関数の例を示す。ただし、 $(\mu_x,\mu_y)=(0.0,0.0)$ 、 $\sigma_x=2.0$ 、 $\sigma_y=2.0$ 、 $f_x=1.0~Hz$ 、 $f_y=1.0~Hz$ 、 $\theta=0^\circ$ 、 $\phi=0.0~$ としている。

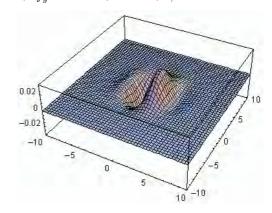


Fig. 1: Gabor Function

ガボール関数を用いた受容野の構成と方位選択成分の検出方法を定式化する.方位選択成分の検出過程を図 2 に示す.いま,原画像の横幅と縦幅をそれぞれ, $R_H$  pixels と  $R_V$  pixels とする.原画像 I(p,q), $0 \le p \le R_H$ , $0 \le q \le R_V$  における受容野のi 番目の方位選択成分を  $C_i(x,y)$ , $i=1,2,\cdots 16$  とし,次の畳み込み計算により計算する.

$$C_i(x, y) = \sum_{q=1}^{R_V} \sum_{p=1}^{R_H} G_i(x - p, y - q) \times I(p, q)$$

画像に配置された受容野を移動し, $R_H \times R_V$  個の方位選択成分  $C_i(x,y)$  を計算する. TAM ネットワークのi 番目の属性マップは,方位選択成分として得られた輝度を各方位ごとに正規化して構成される.

$$f_{ih} = \frac{\sum_{\{x,y|O_i(x,y)=h\}} C_i(x,y)}{\sum_{u=1}^{R_V} \sum_{x=1}^{R_H} C_i(x,y)}, \quad h = 1, 2, \dots, 256$$

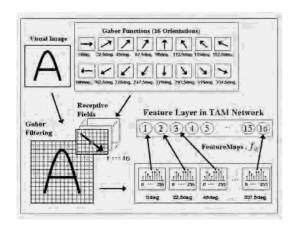


Fig. 2: Gabor Filtering Process

### 3. TAM ネットワーク

TAM ネットワークの構成を図 3 に示す。カテゴリー層では,属性マップ  $f_{ih}$  と学習荷重  $w_{jih}$  との活性値  $x_{ji}$  を計算し,出力層への出力  $y_i$  を得る.

$$y_j = \prod_{i=1}^{M} x_{ji} = \prod_{i=1}^{M} \frac{\sum_{h=1}^{L} f_{ih} w_{jih}}{1 + \rho^2 b_{ji}}$$

ただし,  $\rho$  はビジランスパラメータであり,  $b_{ji}$  は抑制荷重である.

TAM ネットワークの出力値 K は次式より計算される.

$$K = \{k | \max_{k} z_{k}\} = \{k | \max_{k} \sum_{j=1}^{N} y_{j} p_{jk}\}$$

ただし、 $p_{jk}$  はカテゴリー層ノードに対する学習荷重である.

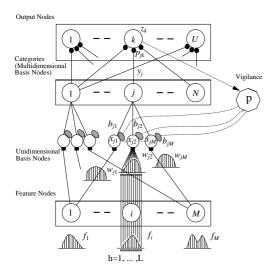


Fig. 3: TAM Network

いま, $K^*$  を正しい教師値としよう. $K \neq K^*$  の場合には,ビジランスパラメータ $\rho$  を初期値 $\rho=0$ から上昇させ, $z_{K^*}/z_K \geq OC$ の条件が満足されるか最大値にな

るまで上昇さる. 最大値になった場合には、カテゴリー層ノードを1個分増加させる.

一方,  $z_{K*}/z_K \geq OC$  を満足する場合には、学習モードに入り、学習荷重  $w_{jih}$ 、 $p_{jik}$ 、 $b_{ji}$  を次式で更新する.

ただし, $b_j^{(rate)}$  は学習定数であり, $\alpha$  と  $\lambda$  は係数, $y_j^*$  はカテゴリー層へのフィードバック信号である.

パラメータの調整はネットワークへデータが逐次的に 投入されるごとに行い,学習データを1エポックとして 数エポック回数分の学習を行う.

### 4. 文字認識による例題

ガボール型受容野をもつ TAM ネットワークの有効性を確認するため、アルファベット 'A' と 'B' を用いた文字認識を行った.入力画像として電子タブレットによって作成された画像データを用いた.画像の大きさを15 pixels × 15 pixels とする.ここでは、'A' と 'B' の文字画像から属性マップを構成し、TAM ネットワークの学習用データを作成して、学習後の評価用データに対する認識率を計算した.次の3つの点から TAM ネットワークの有用性を評価した.

- フィルタリング後の方位選択成分を解析する.
- TAM ネットワークの認識率を評価する.
- 評価用データに対する頑健性を評価する.

学習用画像を図4と図5に示し、評価用画像を図6に示す、評価用画像は学習用画像に対して、位置をずらした文字画像、回転させた文字画像、ノイズを加えた文字画像、ピクセルを欠如させた文字画像の4種類を用意した。TAMネットワークの学習パラメータは次の通りである。

図4の左端の'A'の画像に対して,ガボール型受容野を用いて方位選択成分を抽出した結果を図7に示す.左上画像が方位0°,その右側は22.5°の方位選択成分で

あり、同様に、 $45.0^{\circ}$ 、 $67.5^{\circ}$ 、 $\cdots$  、 $337.5^{\circ}$  の方位選択成分を表す。これらの画像から文字の方位選択成分が良好に抽出されていることがわかる。



Fig. 4: Training Image of 'A'



Fig. 5: Training Image of 'B'

ガボール関数のパラメータ変化による方位選択成分 の感度を議論するため、パラメータを次のように変化さ せ、方位選択成分を解析した.

 $\begin{array}{rcl}
\sigma_x & = & 0.5, 0.75, \cdots, 4.0 \\
\sigma_y & = & 0.5, 0.75, \cdots, 4.0 \\
f_x & = & 0.01, 0.015, \cdots, 0.3 \\
f_y & = & 0.01, 0.015, \cdots, 0.3 \\
K & = & 0.1, 0.2, \cdots, 1.0.
\end{array}$ 

アルファベット 'A' に対して、標準偏差の  $\sigma_x$  を変化さ せた場合の 135.0°の方位選択成分を図 8 に示す.また, そのガボール関数を図9に示す.標準偏差 $\sigma_x$ の値は,左 から 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 である. た だし, 他のパラメータ値を  $\sigma_y = 1.92$ ,  $f_x = f_y = 0.127$ , K=1.0 とした. 標準偏差  $\sigma_x$  の値が大きくなるほど, 方位選択成分の画像は不明瞭となっていることがわかる. これより、標準偏差  $\sigma_x$  は方位選択成分の画像の明瞭性 を表現するパラメータといえる. 同様に, 標準偏差  $\sigma_y$ を変化させた場合の方位選択成分も解析した。 $\sigma_y$  は標 準偏差 $\sigma_x$ と同じく方位選択成分の画像の明瞭性を表現 するパラメータとなっているが,ガボール関数の長軸を 規定するパラメータであるので、 $\sigma_x$  ほど感度は高くな い. その他, 周波数と振幅についても解析した. 周波数  $f_x$ と  $f_y$  は方位選択成分に対してそれほど感度は高くな い結果が得られた. 振幅 K も同様であった.

次に、TAM ネットワークの認識率を評価した. 学習 用画像と評価用画像に対する TAM ネットワークの認識率を図 10 に示す. 学習用画像の認識率は全般的に高いが、評価用画像の認識率は標準偏差  $\sigma_x$  の値が大きくなるほど低下している. 特に、 $\sigma_x=0.75$  のとき認識率が 90.0% で最大となった. 同様に、標準偏差  $\sigma_y$  に対しては、 $\sigma_y=0.75$  のとき認識率が 82.0% で最大となった. 画像の方位選択成分の解析結果でも明らかなように、標準偏差に対する認識率の低下は方位選択成分の明瞭性に影響を与える. 標準偏差の値が小さいほど明瞭性があるので、標準偏差の値を比較的小さな範囲で調整した場合ので、標準偏差の値を比較的小さな範囲で調整した場合に高い認識率を得るという結果は納得できる. 一方、周波数  $f_x$  と  $f_y$  を変化させた場合の認識率は、学習用画像に対してほば 100% となった. しかし、評価用画像に対

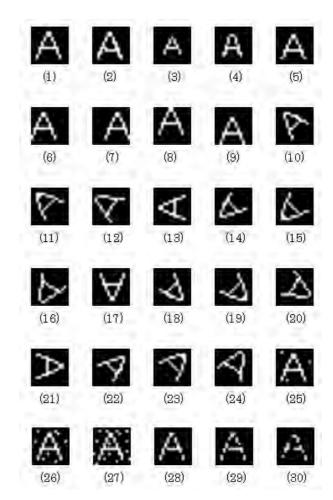


Fig. 6: Checking Image



Fig. 7: Image after Gabor Filtering



Fig. 8: Detecting of Contourss of Input Images



Fig. 9: Gabor Functions for Detecting Contours

しては、周波数  $f_x$  と  $f_y$  の変化に対して認識率が鋭敏に反応し、高い認識率を得るために周波数を調整することが難しい。なお、振幅 K を変化させた場合の認識率は、学習用画像と評価用画像に対して、あまり変化がなかった。

最後に、TAM ネットワークの頑健性について検討した。4種類のアルファベット 'A' の評価用画像に対して、標準偏差  $\sigma_x$  を変化させた場合の認識率を図 11 に示す。位置ずれ文字と回転文字に対する認識率はほぼ 70.0%以上と高く、頑健性に優れている。しかし、ノイズを加えた文字に対する認識率は低く頑健性が低い。他の標準偏差  $\sigma_y$ ,周波数  $f_x$  と  $f_y$ ,振幅 K を変化させた場合の頑健性についても同様に、ノイズ追加文字以外の 3 つの文字に対する認識率は高く頑健性が高い結果を得た。一方、アルファベット 'B' の評価用画像に対しては、標準偏差、周波数、振幅の変化に対して、位置ずれ文字とピクセル欠如文字に対する頑健性が高い結果を得た。

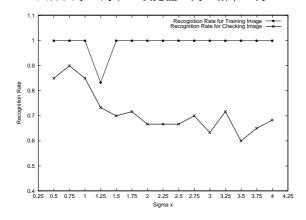


Fig. 10: Recognition Rate

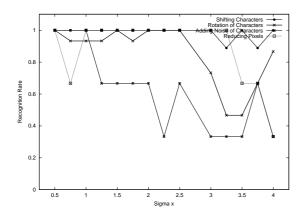


Fig. 11: Recognition Rate of Four Types of Image 'A'

#### 5. おわりに

ここでは、ガボール関数を用いて TAM ネットワークの受容野入力構造を定式化した、本研究の一部は、文部科学省科学研究補助金(基盤研究 C)課題番号 14580433の一環として行われた。

### 参考文献

- [1] 松田 隆夫: 知覚心理学の基礎, 培風館 (2000)
- [2] 岡島 健治, 今岡 仁: 情報量最大化と生体視覚細胞 の受容野, 電子情報通信学会論文誌 A, No.J83-A, Vol.6, pp.620-628 (2000)
- [3] A.D.Pollen and S.F.Ronner: Visual cortical neurons as localized spatial frequency filters, *IEEE Transactions of System, Man and Cybernetics*, Vol.SMC13, pp.907-916 (1983)
- [4] W.Urushihara and T.Nagano: A model for the detection of second-order motion, *Technical report* of *IEICE*, Vol.NC98-191, pp.293-298 (1999)
- [5] D.C.Lee: Adaptive processing for feature extraction: Application of two-dimensional Gabor function, *Remote Sensing*, Vol.17, No.4, pp.319-334 (2001)
- [6] S.Marčelja: Mathematical description of the responses of simple cortical cells, *Optical Society of America*, Vol.70, No.11, pp.1297-1300 (1980)
- [7] J.Daugman: Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientaion optimized by two-dimensional visual cortical filters, *Optical Society of America*, Vol.2, No.7, pp.1160-1169 (1985)
- [8] S.Grossberg: How does the cerebral cortex work? Learning, attention, and grouping by the laminar circuits of visual cortex, *Spatial Vision*, Vol.12, No.2, pp.163-185 (1999)
- [9] H.Neumann and W.Sepp: Recurrent V1-V2 interaction in early visual boundary processing, Biological Cybernetics, Vol.81, pp.425-444 (1999)
- [10] K.Fukushima: Recognition of partly occluded patterns: a nural network model, *Biological Cybernetics*, Vol.84, No.4, pp.251-259 (2001)
- [11] J.R.Williamson: Self-organization of topographic mixture networks using attentional feedback, *Neural Computation*, Vol.13, pp.563-593 (2001)
- [12] 林 勲, J.R.Williamson: TAM Network のプルーニング手法の提案,システム制御情報学会論文誌, Vol.17, No.2, pp.81-88 (2004)

### [連絡先]

Isao Hayashi, Kansai University 2-1-1, Reisenjicho, Takatsuki, Osaka 569-1095 e.mail ihaya@res.kutc.kansai-u.ac.jp

# An Application of Logic Minimization to Extracting and Simplifying Decision Rules

JiLiang Han and Noboru Takagi Department of Electronics and Informatics Toyama Prefectural University

**Abstract:** An If-Then rule and a logic product correspond to one by one . An If-Then rule is also called a decision rule. A collection of decision rules corresponds to an SOP(Sum-of-Products Expression). Minimizing an SOP is equal to minimize the number of decision rules that are corresponding to the SOP. This paper employs the logic minimization algorithm, called Espresso-II, and tried to extract and simplify decision rules by minimizing the corresponding SOP to the decision rules. This paper also shows some of experimental results in comparing with some of the decision rules simplification algorithm such as C4.5 and RSES and so on.

#### 1 Introduction

Data mining is one of the important research subjects. Finding a collection of decision rules from a given decision table is very important in the data mining research field. Rough sets theory gives us methodologies that are able to find decision rules as small number as it is possible. The method for finding decision rules by rough sets theory is as follows: First, it tries to reduce the number of conditional attribute and checking the consistency of the decision table. Next, it tries to a procedure called the value reduction. After applying the two procedures, the method gives us a collection of decision rules, which is minimized as possible as the method is.

The simplification of decision rules can be done by the logic minimization technologies such as Espresso-II. Espresso-II is a heuristic minimization algorithm for binary functions. There are six main procedures in Espresso-II, COMPLEMENT, EXPAND, ES-SENTIAL\_PRIME, IRREDUNDANT\_COVER, RE-DUCE and LAST\_GASP. Espresso-II minimization algorithm is more accomplished than the minimization algorithm of rough sets theory. So, we implemented a system for extracting and simplifying decision rules based on Espresso-II. Note that several parts of Espresso-II have been improved in order to deal with multi-valued functions. This is because the original Espresso-II can deal with only binary functions, but decision tables are usually assumed to be multi-valued functions.

This paper is organized below. Section 2 given the background on multi-valued functions and logic minimization. Section 3 briefly describes what Espresso-II is. In section 4, we show experimental results. They are done by comparing out system with other decision rules simplification methods such as C4.5, RSES and so on. Lastly, section 5 concludes the paper.

### 2 Background<sup>5)</sup>

The material of this section focuses on the definitions of logic functions and some of the properties about logic functions.

A mapping  $f: P_1 \times P_2 \times \cdots \times P_n \to B$  is a multivalued input two-valued output function, where  $P_i = \{0,1,\cdots,p_i-1\} (i=1,2,\cdots,n)$ , and  $B=\{0,1,2\}$ . In this paper, "2" of B expresses "don't care", which means undefined if the value is 0 or 1. Let x be a variable that takes a value in  $P=\{0,1,\cdots,p-1\}$ , let S be a subset of  $P(S\subseteq P)$ , then,  $x^S$  is called a literal of x. When  $x\in S, x^S=1$ , and when  $x\notin S, x^S=0$ . Let f be a function  $f: P_1\times P_2\times\cdots\times P_n\to B$ , we can divide the domain  $P_1\times P_2\times\cdots\times P_n$  into the 3 disjoint subsets below.

1. 
$$F = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) | f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1\}$$

2. 
$$R = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) | f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0\},\$$

3. 
$$D = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) | f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 2\}.$$

In the following, F, R, D are called the on-set, offset and dc-set, respectively. This paper employs the two binary operations  $AND(\cdot)$  and  $OR(\vee)$ , which are defined below.

$$x \cdot y = \min(x, y)$$
 and  $x \vee y = \max(x, y)$ ,

where  $x, y \in \{0, 1\}$ . Let  $S_i \subseteq P_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , then  $x_1^{S_1} x_2^{S_2} \cdots x_n^{S_n}$  is called a product term. Product terms are also called products or cubes. An ORing of some product terms is called a sum-of-products expression(SOP for short), if no product term appear in the expression more than or equal to twice. When  $S_i = P_i, x_i^{S_i} = 1$  and the product is independent of  $x_i$ . In this case, literal  $x_i^{P_i}$  is redundant and can be deleted. A product is also called a term, or a product term, and corresponds to a cube. When  $|S_i| = 1$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), the product corresponds to an element of

the domain. This product is a minterm of f. When  $S_i = P_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , the product corresponds to the constant 1.

An arbitrary multi-valued input two-valued output function is represented by an SOP. A same function can be represented by many SOPs. Among them, the one with the minimum number of products is a minimum SOP(MSOP). For an SOP  $\alpha_1 \vee \alpha_2 \vee \cdots \alpha_i$ , if  $\alpha_i \cdot \alpha_j = 0$  for every  $i, j (i \neq j)$ , then the SOP is said to be a Disjoint SOP(DSOP). A cover is a SOP, which can represent the given function. A cover contains all of the on-set and some of the deset, but it never contain any of the off-set.

Table 1: Truth Table of f in Example 1

$x_1$	$x_2$	$x_3$	f	$x_1$	$x_2$	$x_3$	f	$x_1$	$x_2$	$x_3$	f
0	0	0	1	0	2	0	0	1	1	0	0
0	0	1	0	0	2	1	0	1	1	1	1
0	0	2	0	0	2	2	1	1	1	2	0
0	0	3	0	0	2	3	0	1	1	3	1
0	1	0	0	1	0	0	1	1	2	0	0
0	1	1	1	1	0	1	0	1	2	1	0
0	1	2	0	1	0	2	0	1	2	2	1
0	1	3	1	1	0	3	1	1	2	3	0

**Example 1** Table 1 is an example of a multi-valued input two-valued output function, where  $f: P_1 \times P_2 \times P_3 \to B$ , such that  $P_1 = \{0, 1\}, P_2 = \{0, 1, 2\},$  and  $P_3 = \{0, 1, 2, 3\}$ . An SOP of f is

$$\begin{array}{lll} F & = & x_1^{\{0\}}x_2^{\{0\}}x_3^{\{0\}} \vee x_1^{\{0\}}x_2^{\{1\}}x_3^{\{1\}} \\ & & \vee x_1^{\{0\}}x_2^{\{1\}}x_3^{\{3\}} \vee x_1^{\{0\}}x_2^{\{2\}}x_3^{\{2\}} \\ & & \vee x_1^{\{1\}}x_2^{\{0\}}x_3^{\{0\}} \vee x_1^{\{1\}}x_2^{\{0\}}x_3^{\{3\}} \\ & & \vee x_1^{\{1\}}x_2^{\{1\}}x_3^{\{1\}} \vee x_1^{\{1\}}x_2^{\{1\}}x_3^{\{3\}} \\ & & \vee x_1^{\{1\}}x_2^{\{2\}}x_3^{\{2\}}. \end{array}$$

The MSOP is

$$\begin{array}{lcl} f & = & x_1^{\{0,1\}} x_2^{\{0\}} x_3^{\{0\}} \vee x_1^{\{0,1\}} x_2^{\{1\}} x_3^{\{1,3\}} \\ & & \vee x_1^{\{0,1\}} x_2^{\{2\}} x_3^{\{2\}} \vee x_1^{\{1\}} x_2^{\{0,1\}} x_3^{\{3\}}. \end{array}$$

By removing redundant literals, the above MSOP will be given as

$$\begin{array}{ll} f & = & x_2^{\{0\}} x_3^{\{0\}} \vee x_2^{\{1\}} x_3^{\{1,3\}} \\ & & \vee x_2^{\{2\}} x_3^{\{2\}} \vee x_1^{\{1\}} x_2^{\{0,1\}} x_3^{\{3\}}. \end{array}$$

Let f and g be logic functions. For all the minterms c such that f(c) = 1, if g(c) = 1, then  $f \subseteq g$ . When  $f \subseteq g$ , we say g contains f, does not contains f otherwise. If a logic function f contains a product f, then f is an f implicant of f. Let f be an implicant of a logic function f, if there is no other implicant f implicant of f. A prime cover is a cover whose cubes are all prime implicants. An f implicant of f is a prime of f which contains a minterm of f not contained in any other prime. A cover f such that no proper subset of f is

also a cover is said to be *irredundant* or *minimal*. In fact, every decision rule can be represented by a product. A set of decision rules can be represent by an SOP. Getting the minimal number of decision rules is equal to find an MSOP from the corresponding SOP. Algorithm Espresso-II is adept in finding MSOP.

# 3 The Espresso-II Minimization Loop And Algorithms

The goal of the logic minimization is to find an MSOP of a given multi-valued function. If the number of variable of a multi-valued function is large(i.e., more than around 15 variables), finding an MSOP is time consuming. Espresso-II tires to find an SOP that is close to the MSOP by an iterative and heuristic way. There are six procedures in Espresso-II, COMPLEMENT, EXPAND ESSENTIAL\_PRIME, IRREDUNDANT\_COVER, REDUCE and LAST\_GASP. The flow of the six procedure shows in figure 2.

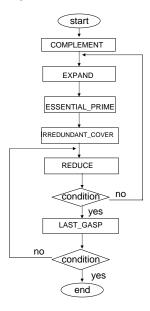


Figure 1: Flow of Espresso-II

COMPLEMENT computes the complement of an SOP. The complement of the SOP is needed when we apply the SOP to EXPAND.

EXPAND enlarges any cubes of an SOP(see Figure 3). The result of EXPAND is a prime cover of the SOP. EXPAND can only improve the solution quality.

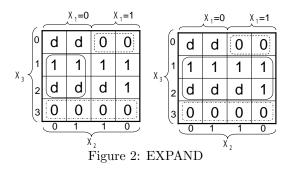
ESSENTIAL\_PRIME finds all of the essential prime cubes for an SOP.

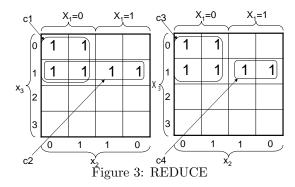
IRREDUNDANT\_COVER finds a set of cubes of an SOP. The cubes can be removed from the SOP without changing the function (i.e., the cubes are redundant cover for the SOP).

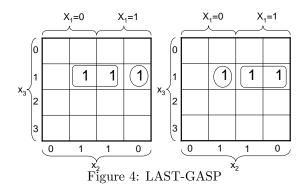
REDUCE transforms an SOP to a DSOP (see Figure 4).

LAST\_GASP finds any pair of cubes that can re-

placed with another pair of cubes, and replaces the original pair of cubes with the new pair (see Figure 5).







### 4 Experimental Results

This section first compares our method with Inuiguchi's and subclass methods. In this comparison, we use the decision table given by Inuiguchi. This decision table is so small that we can compare what decision rules are extracted by each of the three methods. Next, this section compares our method with C4.5 and RSES. RSES is a rough set exploration system and is introduced by Institute of Mathematics, Warsaw University. We can take the system, which runs on Windows OS, through the internet. We applied both of the two methods to the three UCI databases. We then compares then number of decision rules, and discuss how our method can reduce the number of decision rules.

### 4.1 Comparison with Inuiguchi's and Subclass Methods

Inuiguchi et al.<sup>7)</sup> introduced a rough set approach to non-monotonic preference information tables. He gave a rule extraction method by which we can extract decision rules based on an interval representation for each conditional attribute. Kudo et al.<sup>6)</sup> introduced a pattern recognition method called subclass method. Subclass method finds a region for each class in a feature space by hyper-rectangles, subsets of n dimensional Euclidean space indicated by an interval for each of n axes. The basic idea of both Inuiguchi's and subclass methods are very close. Tables 2 shows a decision table that is introduced by Inuiguchi. Equations(1) and (2) are the decision rules for Table 2 extracted by Inuiguchi's and subclass methods, respectively.

Table 2: subclass							
Cases	M:Manure	W:water	Evaluation				
$x_1$	Very Larger	Large	Good				
$x_2$	Medium	Very Large	$\operatorname{Good}$				
$x_3$	Large	Large	$\operatorname{Good}$				
$x_4$	Very Small	Very Large	$\operatorname{Good}$				
$x_5$	$\operatorname{Small}$	Large	$\operatorname{Good}$				
$x_6$	Medium	Medium	$\operatorname{Good}$				
$x_7$	Very Small	Large	$\operatorname{Good}$				
$x_8$	Very Large	Very Large	Bad				
$x_9$	Large	Very Large	Bad				
$x_{10}$	Very Large	Medium	Bad				
$x_{11}$	Large	$\operatorname{Small}$	Bad				
$x_{12}$	Very Small	Large	Bad				
$x_{13}$	$\operatorname{Small}$	$\operatorname{Small}$	Bad				
$x_{14}$	Very Small	Very Small	Bad				

If  $M \in [S, VL]$  and W is L, then E is Good If  $M \in [VS, M]$  and W is VL, then E is Good If M is M, then E is Good If  $M \in [S, L]$  and  $W \in [M, L]$ , then E is Good If  $M \in [S, M]$  and  $W \in [M, L]$ , then E is Good If  $M \in [L, VL]$  and W is VL, then E is Bad If  $M \in [L, VL]$  and  $W \in [S, M]$ , then E is Bad If  $W \in [VS, S]$ , then E is Bad

If 
$$M \in [S, VL]$$
 and  $W$  is  $L$ , then  $E$  is Good If  $M \in [VL, M]$  and  $W$  is  $VL$ , then  $E$  is Good If  $M \in [S, L]$  and  $W \in [M, L]$ , then  $E$  is Good If  $M \in [S, M]$  and  $W \in [M, VL]$ , then  $E$  is Good If  $M \in [L, VL]$  and  $W$  is  $VL$ , then  $E$  is Bad If  $M \in [L, VL]$  and  $W \in [S, M]$ , then  $E$  is Bad If  $M \in [VS, L]$  and  $W \in [VS, S]$ , then  $E$  is Bad

The following Equation(3) is the decision rules

extracted by our method.

If  $M \in \{S, VL\}$  and W is L, then E is Good If  $M \in \{M, Vs\}$  and W is VL, then E is Good If M is M and  $W \in \{VL, M\}$ , then E is Good If M is VS and W is VS, then E is Bad If  $M \in \{VL, L\}$  and W is VL, then E is Bad If M is VL and V is VL, then E is Bad If  $M \in \{L, S\}$  and V is V, then E is Bad

1.Inuiguchi's and subclass methods extract similar decision rules. Inuiguchi's method produces one more decision rule, If M is M, then E is Good.

- 2. Our method does not follow decision rules based on an interval representation. The obtained decision rules are much different from those given from Inuiguchi's and subclass method.
- 3. In our method, any cube covers only elements of the on-set for a given decision table. We remove the explanation on why our method covers only elements of the on-set, because we have a limited space. On the other hand, Inuiguchi's and subclass methods covers not only elements of the on-set, but also some of the elements of the dc-set.

# 4.2 Comparison with C4.5 and RSES methods

We applied our method to some of the UCI databases, and compared the result with the flowing two methods: C4.5 and RSES<sup>8</sup>). The result are shown in the table 6.

Table 3: UCI							
Data	Balance-	Car	Nursery				
(#)	$\operatorname{cale}$						
	(625)	(1728)	(12960)				
C4.5	401	297	839				
RSES system							
Exhaustive	303	246	638				
Genetic	180	117	_				
Lem2	287	202	870				
Espresso	153	61	154				
-II							

C4.5 is a type of method which is applied to create a minimal size of decision tree. For C4.5, one rule is generated so that there is no overlap part which appear in two or more rules. Espresso-II is another type of algorithm which applied to generate the minimal decision rules. It can decreasing the number of rules because one data allows duplication to two or more rules.Based on the above reason Espresso-II can get the minimal number of decision rules than C4.5.

Another system RSES which is made by Institute of Mathematics Warsaw University. As we listed, RSES system has three algorithm. Compared with these three algorithm, our method can get minimal number of decision rules. That is because, the basic idea of RSES is rough set, and to simplify decision

rules Espresso-II and rough set are based on different degree of skill. Suppose  $x_1^{S_1}x_2^{S_2}\cdots x_n^{S_n}$  is a cube. RSES system can only get this kind of result, that is every cube of the result have the properties  $|S_i| = 1$  or  $S_i = P_i (i = 1, 2, ..., n)$ . But our method can get (3) any kind of cubes about the result. Because of the above reason, our method is better than C4.5 and RSES.

#### 5 Conclusions and Future Research

This paper described a new method for constructing and minimizing decision rules based on Espresso-II, which is originally investigated to simplify two-level logic circuits. We had modified the algorithm which could deal with multi-valued function. Also we applied the algorithm to extract and simplify decision rules. Based on some of UCI database, our algorithm could get good result and have a high performance. As we say in the experiment 1, our method and Subclass method had a different result. Which is better for extracting and simplifying decision rules? In the future research, we need more discussion and thinking.

#### References

- [1] J.Ross. Quinlan: C4.5: Programs for machine leaning, Morgan Kaufmann Publishers, 1993.
- [2] Umano: "ID3", J.of SOFT, Vol.6, No.3, pp.502-504, 1994
- [3] S. J. Hong et al.: "MINI: A Heuristic Approach for Logic Minimization," *IBM J. Res. Develop.*, pp.443-458, 1974.
- [4] R. K. Brayton et al.: Logic Minimization Algorithms for VLSI Synthesis, Kluwer Academic Publishers, 1984.
- [5] T. Sasao: Switching Theory for Logic Synthesis, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [6] M. Kudo, S. Yanagi and M. Shimbo: "Construction of Class Regions by A Randomized Algorithm: A Randomized Subclass Method," Pattern Recognition, Vol. 29, No. 4, pp. 581-588, 1996.
- [7] M. Inuiguchi, T. Yoneda and T. Tanino: "A Rough Set Approach to Non-monotonic Preference Information Tables," *Bulletin of Interna*tional Rough Set Society, Vol. 7, No. 1/2, pp. 29-33, 2003.
- [8] J. G. Bazan and M. Szczuka: "RSES and RSESlib—A Collection of Tools for Rough Set Computations," Lecture Notes in Artificial Intelligence 2005, Rough Sets and Current Trends in Computing, Springer-Verlag, pp. 106-113, 2000.

### 論理簡単化による条件属性縮約について

Reduction of Conditional Attributes Based on Logic Minimization

#### 柳田 了信 韓 基良 高木 昇

Ryoshin Yanagida JiLiang Han Noboru Takagi 富山県大学工学部電子情報工学科

Dept. of Elec. & Informatics, Toyama Prefectural University

概要: ラフ集合の主要技術の一つに条件属性の縮約が挙げられる.条件属性縮約は,適用する属性の順番により,最 終的に得られる解がことなることが一般的である.本文では,論理簡単化技術を応用した条件属性縮約の方法について 紹介する、更に、本文で述べる条件縮約手法に基づくシステムを開発したので、UCIデータレポジトリのベンチマー クデータを使用して,開発システムの能率などを計算機実験により示す.

#### はじめに 1

ラフ集合は,あいまいな分類に対する基本的概念で ある.その用途としては,主にデータマイニングに利 用されている.また,ラフ集合は属性値が一つの値で なく集合になっているような, 不完全情報データベー スにも利用可能である.ラフ集合は,同値関係を巧み に使い,決定表から,必要最低限の条件属性を用いて, 決定ルールを導出できる.また,矛盾の生じている決 定表からでも,可能性決定ルール,必然性決定ルール を導出することのできる.しかし,ラフ集合による条 件属性の縮約は、選択する条件属性の順番に結果が強 く依存することが知られているが,条件属性の数を最 簡にするアルゴリズムは含まれていない.以下にその 例を示す.

表 1は冗長条件属性を含む人工的に作られた決定表で ある. 表 1の条件属性を昇順で縮約を行なった場合を表 2(1), 降順で縮約を行なった場合を表 2(2) に示す.

表 2を見て分かるととおり,条件属性の縮約は,選択 する条件属性の順序によって,結果が異なる.そこで, 論理簡単化の手法の応用として, 冗長変数の削除の技 法を用いて,最簡な条件属性を発見することを目的と する.

2 緒定義

ここでは, 論理簡単化による冗長変数の削除で使用 する緒定義について説明する.

定義 1 写像  $f:D\to Q$  を多値入力多値出力関数と いう.ここで, $D\subseteq P^n$ , $P^n=P_1 imes P_2 imes\cdots imes P_n$ , 取る.一方,変数が多値の場合,その変数を  $X_i$  (i=1 $P_i = \{0$  ,1 ,... , $p_i - 1\}$  (i = 1 ,2 ,... ,n) ,  $Q = \{0$  ,1  $, \cdots, q-1$ }  $\mathsf{c}$   $\mathsf{c}$   $\mathsf{d}$   $\mathsf{d}$  .

定義 2 多値関数を特徴関数  $F_i$   $(i=0,1,\cdots,q-1)$  で 表す. ここに , 特徴関数  $F_i$  とは , 多値入力多値出力

表1決定表

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	Class
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
1	0	2	0	1
2	2	1	2	1
0	2	1	0	2
2	1	2	2	2

表 2 昇順,降順で縮約を行なった決定表

		(1)		(	(2)	
$x_3$	$x_4$	Class	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Class
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1	0
2	0	1	1	0	2	1
1	2	1	2	2	1	1
1	0	2	0	2	1	2
2	2	2	2	1	2	2

関数 f から次のように定義される.

$$F_i(x_1 , \dots , x_n) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & f(x_1 , \dots , x_n) \neq i \\ 1 & f(x_1 , \dots , x_n) = i \end{array} \right.$$

但し,  $(x_1,\ldots,x_n)\in D$  かつ i=0,  $1,\ldots,q-1$ . 以上 より,  $F_i \wedge F_j = 0 \ (i \neq j)$ となる.

定義  $\mathbf{3}$  変数が二値 (0,1) の場合,その変数を  $x_i(i=1)$  $(2,\cdots,n)$  で表される.変数  $x_i$  は, 0 または 1 の値を  $(2,\cdots,n)$  で表す. 変数  $X_i$  は,  $P_i$  のいずれか一つの値 を取る.S を P の部分集合  $(S \subseteq P)$  とするとき,  $X_i^S$  を リテラルと呼ぶ. リテラルは以下のように定義される.

各変数のリテラルを高々一つしか含まない論理積を積項という、いくつかの積項を  $OR(\lor)$  演算した論理式を論理和形 (Sum-of-Products Expression : SOP) という、また,AND 演算の記号 ( $\land$ ) は,まちがう恐れがない場合省略することが多い.ある多値関数の SOP を f とし,f のある積項を  $\alpha$  とする.多値関数 f をかえること無しに, $\alpha$  のどのリテラルも削除することができないとき, $\alpha$  を f の主項という.ある SOP が全ての主項の論理和で表現され,かつどの主項も削除できないとき,この SOP を ISOP(Irredundant SOP) という.

定義 4 ある二つの積項  $\alpha=X_1^{S_1}X_2^{S_2}\cdots X_n^{S_n}$  と  $\beta=X_1^{T_1}X_2^{T_2}\cdots X_n^{T_n}$  が与えられた時,全てのリテラルにおいて, $S_i\subseteq T_i (i=1\ ,2\ ,\cdots\ ,n)$  が成立する時,積項  $\beta$  が,積項  $\alpha$  を包含しているという.この時, $\alpha\lor\beta=\beta$  が成立する.

例 1 積項  $\alpha=X_1^{\{0\}}X_2^{\{1\}}X_3^{\{1\}}$  と  $\beta=X_1^{\{0\}}X_2^{\{1\}}X_3^{\{1\}}$  が与えられた場合, $\beta$  が  $\alpha$  を包含しているため, $\alpha\lor\beta=\beta$  である.

例 2 定義 1 , 2 , 3より , 例えば , 表 3 のような多値 入力多値出力関数が与えられた場合 , 特徴関数  $F_i(i=1,2,3,4)$  は以下のように SOP で表現できる.

 $F_{0} = X_{1}^{0}X_{2}^{2}X_{3}^{1}X_{4}^{2} \vee X_{1}^{2}X_{2}^{1}X_{3}^{1}X_{4}^{0}$   $F_{1} = X_{1}^{0}X_{2}^{1}X_{3}^{1}X_{4}^{2} \vee X_{1}^{2}X_{2}^{1}X_{3}^{2}X_{4}^{1}$   $F_{2} = X_{1}^{0}X_{2}^{1}X_{3}^{2}X_{4}^{1} \vee X_{1}^{2}X_{2}^{2}X_{3}^{2}X_{4}^{2}$   $F_{3} = X_{1}^{0}X_{2}^{0}X_{3}^{1}X_{4}^{2} \vee X_{1}^{1}X_{2}^{1}X_{3}^{1}X_{4}^{2}$ 

### 3 論理簡単化による冗長変数の削除

ここでは,与えられた関数を,最小な変数集合で表現するアルゴリズムについて説明する.

手順 1: 特徴関数  $F_i(i=0,1,\dots,q-1)$  を  $\operatorname{SOP}$  を用いて次式のように表す. $F_i=\bigvee_{k=1}^{t(F_i)}r(i,k)$  ここで, $t(F_i)$ 

は $F_i$  に対する  $\operatorname{SOP}$  の項数をあらわし,r(i,k) は $F_i$  の第 k 項を表す.

手順 2: 特徴関数の各組  $F_i, F_j \ (i \neq j)$  に対して、次の操作を実行する. 各積項対 (r(i,k),r(j,l)) から、次の和項 s(i,j,k,l) を求める.

$$s(i, j, k, l) = \bigvee_{m=1}^{n} y_m$$

但し, $r(i,k)=X_1^{S_1}X_2^{S_2}\cdots X_n^{S_n}, \quad r(j,l)=X_1^{T_1}X_2^{T_2}\cdots X_n^{T_n}$  のとき,

$$y_m = \begin{cases} 0 & S_m \cap T_m \neq \emptyset \\ x_m & S_m \cap T_m = \emptyset \end{cases}$$

(m = 1, 2, ..., n) である.

表 3 多値入力多値出力の 4 変数関数

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	f
0	2	1	2	0
2	1	1	0	0
0	1	1	2	1
2	1	2	1	1
0	1	2	1	2
2	2	2	2	2
0	0	1	2	3
1	1	1	2	3

手順 3: ブール関数 R を次式で求める.

$$R = \bigwedge_{i=0}^{q-2} \bigwedge_{j=i+1}^{q-1} \bigwedge_{k=1}^{t(F_i)} \bigwedge_{l=1}^{t(F_j)} s(i, j, k, l)$$

手順 4: *R* を ISOP に変換する. この時 , リテラル数最 小の積項に表れている変数が, *f* を表現するための 最小な変数集合と一致する.

以上の流れから,論理簡単化による冗長変数の削除の技法を用いて,最小な条件属性集合を求めることができる. 以下,アルゴリズムの妥当性について,述べる.二つの特徴関数  $F_i$ , $F_j(i\neq j)$  について考える. $F_i=X_1^{S_1}X_2^{S_2}\cdots X_n^{S_n}$   $F_j=X_1^{T_1}X_2^{T_2}\cdots X_n^{T_n}$ , $I=\{1,2,\ldots,n\}$  とする.

- (1) 特徴関数の定義より,ある変数  $x_m(m \in I)$  が存在して  $S_m \cap T_m = \emptyset$  である.なぜならば,もしこのような変数  $x_m$  が存在しないとすれば,すべての  $m \in I$  について  $S_m \cap T_m \neq \emptyset$  となり,即ち, $F_i \wedge F_i \neq 0$  が導ける.これは矛盾である.
- (2)  $L\subseteq I$  とし,L の任意の元 m に対して  $S_m\cap T_m=\emptyset$  とする. 但し, $c_i=X_1^{S_1}X_2^{S_2}\cdots X_n^{S_n}$ , $c_j=X_1^{T_1}X_2^{T_2}\cdots X_n^{T_n}$  である. 簡単のため  $L=\{1,2,\ldots,k\}$   $(1\leq k\leq n)$  とする.このとき, $c_i$  と $c_j$  を区別するのには, $x_1,x_2,\ldots,x_k$  から少なくとも一つの変数が必要である.この条件を論理式で表現したものが,s(i,j,k,l) である.
- (3) 異なる特徴関数  $F_i$  と  $F_j$  を区別するためには, $F_i$  と  $F_j$  の各積項対  $(c_i,c_j)$  を区別するための必要な 変数の集合 s(i,j,k,l) が同時に必要となる.この条件を論理式で表現したものが、R である.
- (4) 従って, R の ISOP の各積項は  $F_i$  と  $F_j$  を区別するのに必要な変数集合である. 即ち, ISOP でのリテラル数最小の積項は,  $F_i$  と  $F_j$  を区別するのに最小な変数集合と一致している.

表 4 二値入力,二値出力の4変数関数

_	(/) , — 喧叫/)(/) 4						
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	f		
	0	0	0	1	0		
	0	1	1	0	0		
	1	0	0	0	0		
	0	1	0	1	1		
	1	0	0	1	1		
	1	1	0	0	1		

例 3 表 4から,論理簡単化による冗長変数の削除を行なう.

(1) この表から特徴関数  $F_0$  と  $F_1$  の積項が以下で示されている.

$$\begin{array}{rcl} r(0,1) & = & x_1^0 x_2^0 x_3^0 x_4^1 \\ r(0,2) & = & x_1^0 x_2^1 x_3^1 x_4^0 \\ r(0,3) & = & x_1^1 x_2^0 x_3^0 x_4^0 \\ r(1,1) & = & x_1^0 x_2^1 x_3^0 x_4^1 \\ r(1,2) & = & x_1^1 x_2^0 x_3^0 x_4^1 \\ r(1,3) & = & x_1^1 x_1^0 x_3^0 x_4^0 \end{array}$$

(2) 出力値 f が異なっている全ての項の組合せを考える.その時に選択した項対において,どの変数の値が異なっているかを調べる.このことは,選択した項を区別するために,どの変数を使用すれば良いかを調べている.例えば,出力が 0 である r(0,1) と出力が 1 である r(1,1) を選択した場合,r(0,1) とr(1,1) を区別するには変数  $x_2$  が必要であるので次のように表すことになる.

$$s(0,1,1,1) = x_2$$

同様に、他の積項対について考えると、次のように に求められる.

$$s(0,1,12) = x_1$$

$$s(0,1,1,3) = x_1 \lor x_2 \lor x_4$$

$$s(0,1,2,1) = x_3 \lor x_4$$

$$s(0,1,2,2) = x_1 \lor x_2 \lor x_3 x_4$$

$$s(0,1,2,3) = x_1 \lor x_3$$

$$s(0,1,3,1) = x_1 \lor x_2 \lor x_4$$

$$s(0,1,3,2) = x_4$$

$$s(0,1,3,3) = x_2$$

(3) ブール関数 R が次式で求められる.

$$R = x_2 x_1 (x_1 \vee x_2 \vee x_4)$$

$$(x_3 \lor x_4)(x_1 \lor x_2 \lor x_3 \lor x_4)$$
  
 $(x_1 \lor x_3)(x_1 \lor x_2 \lor x_4)x_4x_2$ 

上式 R の ISOP が  $R = x_1x_2x_4$  で求まる. よって、表 4の関数は変数  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_4$  の 3 変数で表現できる.

### 4 計算機実験

本文では,今回試作した冗長変数の削除のプログラムが正しく機能するか計算機実験を行なった.実験1では,人工データに対して行なった.実験2ではUCIのベンチマーク関数に対して行なった.実験3では,条件属性数最簡化と決定ルール数簡単化についての実験を行なった.以下にその実験を示す.

### 4.1 実験1

実験1では,人工データに対して,冗長な変数の削除を行なった.使用した人工データは,表1である.このデータは表2に示したように,選択する条件属性の順番によって,最終的に求まる結果が異なるデータである.このようなデータに対して,最簡な条件属性が発見できるか試みた.その結果を表5に示す.また,表1を用いた実際の計算手順を以下に示す.

表5論理簡単化による冗長変数を削除した結果

	(1)			(2)	
$x_3$	$x_4$	Class	$x_1$	$x_2$	Class
0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0
2	0	1	1	0	1
1	2	1	2	2	1
1	0	2	0	2	2
2	2	2	2	1	2

1) 表 1から特徴関数  $F_0$  , $F_1$  , $F_2$  の積項が以下のように求められる.

$$\begin{split} r(0\text{ ,1}) &= X_1^0 X_2^0 X_3^0 X_4^0 \\ r(0\text{ ,2}) &= X_1^0 X_2^0 X_3^1 X_4^1 \\ r(0\text{ ,3}) &= X_1^1 X_2^0 X_3^2 X_4^0 \\ r(1\text{ ,1}) &= X_1^2 X_2^2 X_3^1 X_4^2 \\ r(1\text{ ,2}) &= X_1^0 X_2^2 X_3^1 X_4^0 \\ r(1\text{ ,3}) &= X_1^2 X_2^1 X_3^2 X_4^2 \end{split}$$

2) 出力値が異なっている項を組合せることにより、どの変数が異なっているか探す. その組合わせは、次のようになる.

$$s(0,1,1,1) = x_1 \vee x_3$$

 $s(0,1,1,2) = x_1 \lor x_2 \lor x_3 \lor x_4$ 

 $s(0,1,2,1) = x_1 \lor x_3 \lor x_4$ 

 $s(0, 1, 2, 2) = x_1 \lor x_2 \lor x_4$ 

 $s(0, 2, 1, 1) = x_2 \vee x_3$ 

 $s(0,2,1,2) = x_1 \lor x_2 \lor x_3 \lor x_4$ 

 $s(0, 2, 2, 1) = x_2 \vee x_4$ 

 $s(0, 2, 2, 2) = x_1 \lor x_2 \lor x_3 \lor x_4$ 

 $s(1, 2, 1, 1) = x_1 \lor x_2 \lor x_3$ 

 $s(1,2,1,2) = x_1 \lor x_2 \lor x_4$ 

 $s(1,2,1,2) = x_1 \vee x_4$ 

 $s(1,2,2,1) = x_2 \vee x_3$ 

 $s(1,2,2,2) = x_2 \vee x_3$ 

### 3) ブール関数が次式で求められる.

 $R = (x_1 \lor x_3)(x_1 \lor x_2 \lor x_3 \lor x_4)(x_1 \lor x_3 \lor x_4)(x_1 \lor x_2 \lor x_4)(x_2 \lor x_3)(x_1 \lor x_2 \lor x_3 \lor x_4)(x_2 \lor x_4)(x_1 \lor x_2 \lor x_3 \lor x_4)(x_1 \lor x_2 \lor x_3)(x_1 \lor x_2 \lor x_4)(x_1 \lor x_4)(x_2 \lor x_3)(x_2 \lor x_3)$  R の ISOP を求めると次の式となる.

$$R = x_1 x_2 \vee x_3 x_4$$

よって,表1は変数 $x_1$ , $x_2$ または変数 $x_3$ , $x_4$ のみで表現できる.

実験 1 においては,論理簡単化による冗長な変数の削除を行なうことで,最簡な条件属性を発見することができた.また,表 5(2) と,表 2(2) を比較すると,表 5(2) では,条件属性  $x_3$  も,削除できているが,表 2(2) においては条件属性  $x_3$  はできていない.

### 4.2 実験 2

実験1では、今回試作した冗長変数の削除のプログラムを用いて、冗長な条件属性を削除することができた、現在UCI(University of Carfornia、Irvine)では、機会学習研究グループが多くの実データをweb上で公開している。そこでUCIデータベースの使用可能な機械学習データレポジトリから3種類(Hayes-roth、Balance-scale、Car)のデータを用いて実験を行なった。これらのデータは、全て名義属性のみで構成されている。これらのデータの特徴を表6に示す。また、実験結果を表7に示す。

実験 2 においては,冗長な条件属性がなかった.この要因として,表 1では,あらかじめ条件属性を縮約できるように,人工的に作っているのに対して,UCI データは実データをもとにして作られている.このように実在する事象から作られたデータでは,冗長な条件属性がない可能性があると考えられる.また,表 1では,条件属性の取り得るパターン数 16 に対して,データ数 6 しか使用していない.ここで,データの使用率 = (データ数 / 条件属性の取り得るパターン数) とすると,今の場合データの使用率は,0.38 となる.一方で,UCI データ

表 6 UCI データ

データ名	Hayes-roth	Balance-cale	Car
データ数	132	625	1728
条件属性数	4	4	6
属性	条	件属性值	
$x_1$	3	5	4
$x_2$	4	5	4
$x_3$	4	5	4
$x_4$	4	5	3
$x_5$			3
$x_6$			3
決定属性値	3	3	4

表 7 UCI データに対する冗長変数の削除を行なった結果

データ名	Hayes-roth	Balance-cale	Car
冗長な条件属性数	0	0	0

は , 重複した条件属性のパターンを除くいた時 , Hayesroth , Balance-cale , Car のデータの使用率は , それぞれ 0.36 , 1.00 , 1.00 となっている. このことからもデータ数によって条件属性が縮約が可能となるとは言い切れないことが分かる.

#### 4.3 実験 3

実験 3 では,最簡な条件属性を求めたとしても,それが最小の決定ルール数を求めることにつながらないことを示すために実験を行なった.ただし,実験 2 で使用した UCI データでは,冗長な条件属性がなかったため,再び人工データを使用して行なった.使用した人工データを表 8 (1),その結果を 表 8(2)に示す.このデータは,あらかじめ冗長変数の削除ができるようにつくったデータである.また,導出された決定ルールを表 9に示す.

表 9をみると,論理簡単化による冗長変数の削除を行なった場合,決定ルール数は 4 となり,論理簡単化による冗長変数の削除を行なわなかった場合,決定ルール数は 3 となっている.これは,論理簡単化による冗長変数の削除を行なった結果,条件属性  $x_1$  を削除することにより,クラス 0 を表 8(1) より導出した決定ルールのように,一つの決定ルールで表現できなくなってしまったからである.以上のことより最簡な条件属性を求めたとしても,必ずしも,決定ルール数の削減につながるわけでないことが分かる.

# 5 論理簡単化による冗長変数削除の 問題点

ここでは,今回試作した論理簡単化の冗長変数の削除の欠点について説明する.ラフ集合では,矛盾の生じているような決定表 10(1) に対しても,表 10(2) のように,冗長な条件属性を削除することができる.しかし,今回試作した論理簡単化の冗長変数の削除では,決定表に矛盾が生じている場合,冗長な条件属性を発見できない.以下にその説明を示す.表 10では,一列目に矛盾を生じている.論理簡単化の冗長変数を使用すれば,一列目と三列目は,決定属性ごとにどの変数を使用すれば,一列目と三列目は,条件属性が同じである.論理簡単化による冗長変数の削除の手順 2 より,s(0 ,1 ,1 ,1) = 0 となる。よって,論理積をしても,最終的に求まるブール関数は 0 となるので,矛盾の生じている決定表に対して,論理簡単化の冗長変数の削除は使用できない.

### 6 まとめ

本文では,論理簡単化手法の冗長な変数の削除を試 みた.これにより,最簡な条件属性を求めることが出来 たが,今回使用した UCI データベースに対しては,冗 長な条件属性はなかった. 今回作成した, 最簡な条件 属性を求めるプログラムでは、データ数が大きくなる と,メモリー不足になる問題が生じている.この問題 に対しては,データ構造を変えることによって,対応 できると思われる.また,冗長な条件属性の削除では, 矛盾の生じているような決定表に対して,使用出来な いという欠点も挙げられる.本手法の有効性としては, 実験1で示したように,ラフ集合の縮約で発見できな いような冗長な条件属性を発見できる所と考えられる. このことより,ラフ集合で求めることのできない,最 簡な条件属性数でルールを表現できる.ただし,実験3 で示したように最簡な条件属性数を求めることができ たとしても、それが最簡なルール数で表現できる訳で はない.

表 8 使用した人工データとその結果

				(1)	
x	1	$x_2$	$x_3$	$x_4$	Class
(	)	2	0	1	0
(	)	2	2	2	0
1	L	1	1	2	1
2	2	0	1	2	1
2	2	0	0	0	2
2	2	2	2	0	2

(2)			
$x_3$	$x_4$	Class	
0	1	0	
2	2	0	
1	2	1	
1	2	1	
0	0	2	
2	0	2	

表 9 決定ルール数の比較

論理簡単化による冗長変数の削除の使用		無し
決定ルール数	4	3
表 8(2) より導出した決定ルール	V	
$x_3 = 0$ and $x_4 = 1$ then Class	=0	
$x_3 = 2$ and $x_4 = 2$ then Class	=0	
$x_3 = 1$ then Class = 1		
$x_4 = 0$ then Class = 2		
表 $8(1)$ より導出した決定ルール		
$x_1 = 0$ then Class = 0		
$x_3 = 1$ then Class = 1		
$x_4 = 0$ then Class = 2		

表 10 矛盾の生じている決定表とラフ集合による条件属 性の縮約

			(1)	
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	Class
0	2	0	1	0
0	2	2	2	0
0	2	0	1	1
0	0	1	2	1
2	0	0	0	2
2	0	2	0	2

(2)			
$x_3$	$x_4$	Class	
0	1	0	
2	2	0	
0	1	1	
1	2	1	
0	0	2	
2	0	2	

### 参考文献

- [1] Z.Pawlak, Rough Sets Theoretical Aspects of Reasoning about Data-, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [2] J.W.Grzymala-Busse, "LERS-A system for learning from examples based on rough set", Inteligent Decision Support Handbook of Application and Advances of the Rough Sets Theory -, Kluwer Academic Publishers, pp.3-18, 1992.
- [3] T.Sasao , "On the number of dependent variables for incompletely specified multiple-valued function" , Proceedings of the IEEE 30th International Symposium on Multiple-valued Logic

#### [問い合わせ先]

〒 939-0398 富山県射水郡小杉町黒河 5180 富山県立大学工学部電子情報工学科 高木 昇

Tel: (0766)56-7500 内線 461

Fax: (0766)56-8022

E-mail: takagi@pu-toyama.ac.jp

### レーダー雨量予測へのラフ集合の適用に関する研究

### Application of Rough Sets to Prediction of Radar Rainfall Strength

広兼 道幸 古田 均 西野 聡

Michiyuki Hirokane Hitoshi Furuta Satoshi Nishino

Kansai University Kansai University Kansai University

Abstract: In this research, we aimed at the observation points of rainfall strength with the radar network in the whole of Japan and attempted to predict its rainfall strength. At the first, information about the past rainfall strength in the whole of Japan was accumulated as the digital data on the computer. The decision table that is used for extracting some rules by using the rough sets was formulated from its database. As for the decision table, we considered the present rainfall strength of the prediction point as a decision attribute, and the transition pattern of the rainfall strength on the prediction point and the periphery of its point for several hours before the present as the conditional attributes. Some rules that indicate the typical transition pattern were extracted from the decision table. The extracted rule was applied to the present transition pattern of the rainfall strength in the next step on the prediction point was predicted.

### 1. はじめに

我が国における多くの主要都市は,国土の7 割が山地という急峻な地形によって形成されて いるため,洪水の氾濫や火山噴出等によって形 成された沖積平野,扇状地,台地などの沿岸部 に存在する.このような国土であるために,人 口,財産や社会の中枢機能が集中する都市は, 河川氾濫原や土砂災害危険区域に位置しており, 洪水や土砂崩れ等の災害による被害を受けてき た[1] .そのため ,我が国は ,長年わたって堤防 , ダムや河口堰等の治水施設を建設し,治水対策 を行ってきた.しかし,昭和61年から平成7年 までの10年間において約9割の市町村が水災害 や土砂災害の被害を受けている.特に平成6年 においては約 450 市町村において慢性的に床下 浸水の被害が生じている.これまで行われてき た治水対策によって,洪水等による人命損失数 は減少してきたが,十分な治水施設の整備が行 われていないため、今なお洪水や土砂災害の被 害が生じており、依然として被害額は減少して いないのが現状である[2].被害額が減少しない 理由として,予想を上回る規模の豪雨等が発生 し,大規模な水災害・土砂災害が発生している 場合も多くなっていることが考えられる、その ため,今まで行われている治水対策によって水 災害・土砂災害を完全に防ぐことは困難となり、 治水施設の整備等のハード面での対策に加え、 レーダーアメダス等の観測データからある程度 の精度をもって雨量を予測し,危機管理対策を たてる等のソフト面での対策が求められている.

そこで本研究では、観測データから雨量を予測することで水災害·土砂災害からの被害を可能な限り最小化するために、レーダー雨量計に

よって計測された降雨強度の情報からラフ集合を用いて数時間後の降雨強度を予測するシステムを構築し,既存の予測手法との比較を行い, 有効性について検証した.

### **2. 気象観測システム**

現在我が国において代表的な観測システムとして地域気象観測システムであるアメダス(AMeDAS: Automated Meteorological Acquisition System)とレーダー気象観測システムが挙げられる.

アメダスとは,雨量(雪量),風向,風速,気温及び日照等の気象データを公衆回線を利用して自動的に収集・配信するシステムである.気象データを自動的に収集する観測所は全国1312カ所に存在し,平均して17 km²に1カ所の割合で設置されている.各自動観測所は,20分以内に降水量を取得することができる.また,風向,風速,気温及び日照の4要素を全国840カ所から,約21km²単位で観測を行っている.アメダスは,NTTによって収集した気象データを編集し統計処理等を行い,配信を行うために利用されている.気象データを利用して、集中豪雨,台風や低気圧による強風を監視し,日々の天気予報の基礎資料として利用している[3].

レーダー気象観測システムとは、空中に浮遊する雨滴や雪片等の降水粒子をマイクロ波で探知する観測システムである。観測方法として、波長3~10cmのマイクロ波を送信し、山頂等の高所に設置し毎分6回転するパラボラアンテナで受信し、雨や雪の位置を探知する。レーダー気象観測は、10km ないし 100km 規模の範囲の

気象を把握することができ,集中豪雨等の探知 に利用されている[4].

現在利用されているアメダスやレーダー気象観測システムは、土砂災害対策として利用する際に運用面と局地的な面での問題が存在する.アメダスは 17km メッシュ、レーダー気象観測システムでは 10km メッシュの範囲で測定を行っている.この限られた区域においても、降雨状況は様々である.特に土砂災害が起こる山地において地形の影響により降雨状況の変化が顕著に現れる.

### 3. ラフ集合によるレーダー雨量予測

局所地域の降雨を予測するためにラフ集合を 用いて数時間後の降雨強度を類推するシステム を開発する.降雨強度を類推する方法として, 任意の局地的な観測地点における過去の降雨強 度の変化パターンから,ラフ集合を用いてルールを抽出する.次に,現在の降雨強度の変化パターンを過去の降雨強度の変化パターンから抽出したルールに当てはめることで,数時間後の着目点の降雨強度を類推する.

### (1) 決定表の作成

本システムでは、任意の局所地域における降雨強度の時系列データから決定表を作成する.本研究では、京都市近辺における着目点周辺の9つのメッシュ内における降雨強度情報から決定表を作成し、着目点の降雨強度を予測する.1997年1月9日0時における着目点における降雨強度情報からの決定表の作成手順の概念を図1と図2に示す.決定表の作成過程として、京都市近辺の着目点とその周辺を含む9つのメッシュ内における降雨強度情報から、表1に示す基準

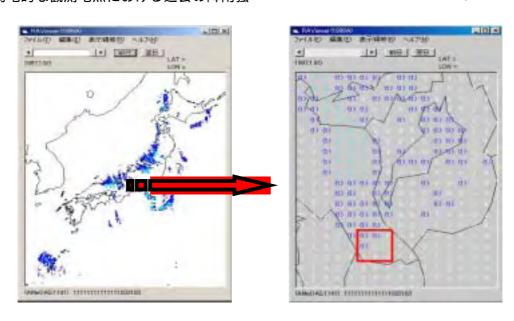


図1 京都近辺における降雨強度情報から決定表の作成例

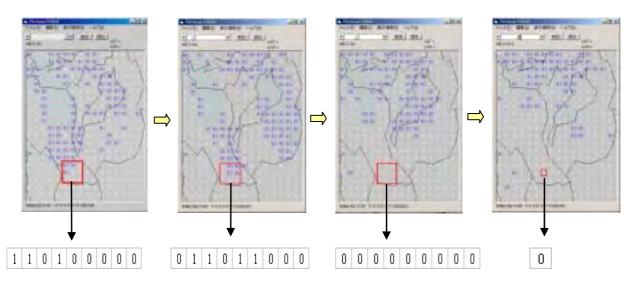


図2 決定表の作成過程

を用いて降雨強度に応じた値(1-6)を取得する. そして,4時間おきに3回分取得した27個の 降雨強度の値の変化パターンを 1 組にまとめ条 件属性として設定する.そして,着目点におけ る最新の降雨強度情報を決定属性として設定す る. 具体的には, 図 2 に示すように 1997 年 1 月9日0時から1997年1月9日8時までの4 時間おきに取得した降雨強度の変化パターンは、 それぞれ 110100000 , 011011000 , 000000000 となる、この取得した降雨強度の変化パターン を 11010000001101100000000000000 という 1 組にまとめ条件属性とする.次に,着目点にお ける最新(1997年1月9日12時)の降雨強度 情報を取得する.ここで,1997年1月9日12 時に降雨強度の値は0であるため、決定属性は0 となる.過去の降雨強度情報をもとに,このよ うな操作を繰り返し行うことで,条件属性と決 定属性の関係を表現した決定表を作成すること ができる.

表1 評価値と降雨強度

降雨強度	1 時間あたりの降雨	色
1	1mm 未満	青
2	1mm 以上 10mm 未満	水
3	10mm以上20mm未満	黄
4	20mm以上40mm未満	緑
5	40mm以上60mm未満	紫
6	60mm 以上	赤

### (2) ラフ集合を用いた予測

京都市近辺の着目点周辺の 9 つのメッシュ内における降雨強度の変化パターンから作成した決定表にラフ集合を適用し、条件属性(過去)から決定属性(現在)を推論する予測ルールの抽出を行う.前節で述べたように、4 時間おきに取得した降雨強度の変化パターンが条件属性、最新の降雨強度が決定属性である.したがって、ラフ集合を用いて導出した予測ルールにおいて、条件部が現在までの降雨強度の変化パターンと一致していれば、現在から 4 時間後の降雨強度の予測値は結論部の降雨強度に一致するものと考えた.

### 4. 実験と考察

本研究で構築したラフ集合を用いたレーダー雨量予測システムの有効性を確認するために、降雨強度の予測を行い、パターン認識でよく利用されている手法の1つである $k \cdot nn$ 法(k近傍点法)を用いた予測結果との比較を行った、本研究における実験方法は、宮崎県県境におい

て観測された、4時間おきと1時間おきの降雨強度情報を用いて実施した.

### (1) 降雨強度の予測 (ラフ集合,4時間)

1998年6月1日12時から1998年6月30日16時までの4時間おきに,176回の降雨強度を予測した結果を表2に示す.正しく予測できたもの(正答)は,176回のうち107回であり61.14%となった.また,降雨強度の値が誤差1以内で予測できたもの(近似)は,176回のうち150回であり85.71%となった.また,雨が降っている場合の近似正答率は71.64%,雨が降ってない場合の近似正答率は94.44%となり,ある程度の精度で降雨強度の変化を予測することができた.

表 2 予測結果 (ラフ集合,4時間)

	データ数	正答率
正答	107	61.14%
近似	150	85.71%
雨あり正答	17	25.37%
雨あり近似	48	71.64%
雨なし正答	90	83.33%
雨なし近似	102	94.44%
予測総数	176	

### (2) 降雨強度の予測 (ラフ集合,1時間)

1時間おきにおける降雨強度の予測として, 1998年6月1日4時から1998年6月30日23時までの717回分行った.また,予測精度を高めるために複数の決定表を作成し,ルール数を増やして予測を行った.実験結果として,近似解等までを含んだ正答率が95.94%と非常に良好な結果を得ることができた.また,雨が降らなかった場合においても,正答率が88.56%という良好な結果を得ることができた.1時間おきの降雨高度の予測結果を表3に示す.

表3 予測結果(ラフ集合,1時間)

	データ数	正答率
正答	513	71.55%
近似	674	94.00%
雨あり正答	115	42.43%
雨あり近似	260	95.94%
雨なし正答	395	88.56%
雨なし近似	415	93.05%
予測総数	717	

### (3) 降雨強度の予測 (k·nn 法,1 時間)

ラフ集合を用いたレーダー雨量予測の有効性 を確認するために、1時間おきにおける降雨強度 の予測と同様の条件において k-nnを用いた降雨 強度の予測し,比較を行った. k-nn による 1 時 間おきの降雨強度の予測結果を表4に示す.ラ フ集合による正答率は,71.55%に対し,k-nnを 用いた予測は,67.22%という結果であった.ま た,降雨強度の評価値の誤差が1以内である近 似回答率においても、ラフ集合を用いた予測で は 94.00%に対し, k-nn を用いた予測では, 91.63%とラフ集合による予測の方が良好な結果 を得ることができた、しかし、降雨があった場 合において近似を含んだ回答において、ラフ集 合を用いた予測が 93.05%に対し, k-nn を用い た 96.86%と僅かながら k-nn を用いた予測の方 が良好な予測結果を得た.

以上の結果から,一部では,k-nnを用いた予測が本研究で提案したラフ集合によるレーダー雨量予測よりも良好な結果を得る場合があったが,全体的にラフ集合を用いた予測が,既存の予測手法より良好な結果を得ることができたと考えることができる.よって,本研究が構築した予測システムは,レーダー雨量予測に有効であるものと考えることができる.

表 4	予測結果	(k-nn 法	1 時間)

21 3 11101111111111111111111111111111111			
	データ数	正答率	
正答	482	67.22%	
近似	657	91.63%	
雨あり正答	115	42.43%	
雨あり近似	243	89.66%	
雨なし正答	393	88.11%	
雨なし近似	432	96.86%	
予測総数	717		

### 5. おわりに

本研究では,レーダー雨量によって計測された降雨情報を対象とし,ラフ集合を用いて降雨強度を予測するシステムを構築した.また,本研究で構築した予測手法の改善を行っていく必要があると考える.システムは,既存の手法より良好な予測結果を得ることができた.今後の課題として,周辺地域の降雨量を組み込み,広域での降雨傾向を考慮に入れた

本研究は,平成15年度の前田記念工学振興財 団研究助成制度により実施した.

### 参考文献

[1] 小倉義光:一般気象学,東京大学出版会, 1986.

- [2] 立平良三:新しい天気予報:確率予報とナウキャスト,東京堂出版,1986.
- [3] 松本誠一: 気象の常識: 知っておきたい身近 な知識,電気書院,1989.
- [4] 谷誠 ,杉浦信男:雨量観測システム ,新砂防 , Vol.42 , No.6 , 1989.

#### 連絡先:

広兼 道幸

関西大学総合情報学部

〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1

Phone: 072-690-2402 Fax: 072-690-2402

E-mail: hirokane@res.kutc.kansai-u.ac.jp

### アナロジーによる状況を考慮したファジィ評定 Situation-Dependent Fuzzy Rating by Analogical Reasoning

林 篤司 Atsushi Hayashi 筑波大学 Tsukuba University 鬼沢 武久 Takehisa Onisawa 筑波大学 Tsukuba University

**Abstract:** A rating scale method is used for the subjective evaluation and the rating scale method with fuzzy theory is called fuzzy rating. This paper proposes a situation-dependent fuzzy rating based on analogical reasoning. The proposed method assumes that mappings as analogy exist between situations and fuzzy sets expressing categories in one situation is obtained by those expressing categories in another situation and analogical reasoning. This paper confirms the usefulness of the presented method comparing differences between fuzzy sets obtained by conventional fuzzy rating and those obtained by presented method indirectly. Experimental results show that both fuzzy sets are similar and that the presented method is useful for fuzzy rating.

### 1. はじめに

「背の高さ」や「絵の美しさ」などについて主観的な評価を行なう場合に用いられる手法の一つに評定尺度法[1]がある。評定尺度法とは大小関係を持つカテゴリを用意し、これと評価対象とを対応付けることで評価を行なう手法である。従来の評定尺度法ではカテゴリ間の境界がはっきりと定められているが、カテゴリを言語表現で表わす場合、言語表現の持つ曖昧さのため、カテゴリ間の境界も曖昧であると考えられる。このような曖昧さはファジィ理論を用いることでより適切に扱うことができ、評定尺度法にファジィ理論をとりいれたものはファジィ評定と呼ばれている[3]。ファジィ評定の手法はいくつか提案されており[4][5]、またメンバーシップ関数同定法もファジィ評定の手法に含めることができる[3]。

評定尺度法を用いることで、評価対象とカテゴリとの対応づけが行なわれるが、この対応関係は一意ではなく、評定を行なう状況によって変化する。これは、ファジィ評定でも同じである。例えば、評価対象の身長に対してファジィ評定を用いて評価を行なう場合を考える。このとき「小学生の背の高さ」として評価を行なう場合と「プロバスケットボール選手の背の高さ」として評価を行なう場合とでは、同じカテゴリを用いて評価を行なっても身長とカテゴリとの対応関係は前者と後者とで必ずしも同じではない。したがって、ファジィ評定を用いて求めたファジィ集合は状況に依存して異なり、状況を考慮したメンバーシップ関数同定法がいくつか提案されている[6][7][8]。

ところで、例えば電流と電圧について説明するために水の流れを例に用いることで理解を深められるように、アナロジー[9]を用いることで未知の対象の性質を推論、予測することができると考えられている。アナロジーは認知心理学や人工知能の分野などで研究が行なわれている。ファジィ評定にこのアナロジーの概念をとりいれることで、ファジィ評定によって求められたある状況でのファジィ集合をもとに、別な状況でのファジィ集合を予測できると考えられる。文献[10]では、アナロジーを用いたファジィ評定を提案し、これを状況依存的ファジィ評定を明いて求めたファジィ集合の有効性の検証を行なう。2章では状況依存的ファジィ集合の有効性の検証を行なう。2章では状況依存的ファジィ集合の有効性の検証を行なう。2章では状況依存的ファジィ集合の有効性の検証を行なう。2章では状況依存的ファジィ集合の有効性の検証を行なう。2章では大況依存的ファジィ集合の有効性の検証を行なう。2章では大況依存的ファジィ集合の有効性の検証を行なう。2章では大況依存的ファジィ集合の有効性の検証を行なう。2章では大況依存的ファジィ集合の有効性の検証をでは、アナロジャルの流にないていている。

ァジィ評定の基本概念について述べる。3章では状況依存的ファジィ評定を用いて得られるファジィ集合と、状況ごとにファジィ評定を用いて得られるファジィ集合を比較し考察を行なう。4章でまとめを行なう。

### 2. 基本概念

### 2.1 状況を考慮したファジィ評定

状況を考慮したファジィ評定について、以下の定義を行なう。本論文では、身長や体重など評価対象の属性を数量で表わしたものを量的データと呼び、ファジィ評定は量的データに対して用いられるものとする。また、ファジィ評定で用いるカテゴリは順序尺度[11]とする。

### 定義 1: 評価範囲

状況Sにおいてファジィ評定が用いられる量的データの集合を閉区間 $R_S$ とし、これを評価範囲とする。

### 定義 2: カテゴリ

ファジィ評定で用いるカテゴリを $c_i$   $(i=1,2,\cdots,n)$  としたとき、状況 S におけるカテゴリ $c_i$  を表わすファジィ集合  $\tilde{C}_i^S$   $(i=1,2,\cdots,n)$  を式(1)で定義する。なお、 $\mu_{\tilde{C}_i^S}$  はファジィ集合  $\tilde{C}_i^S$  のメンバーシップ関数で、 $\tilde{C}_i^S$  は評価範囲  $R_S$  のファジィ部分集合とする。

$$\mu_{\tilde{c}^S} : R_S \to [0,1] (i = 1,2,\dots,n)$$
 (1)

#### 2.2 アナロジー

アナロジーは類推とも呼ばれ、「いくつかの与えられた対象間に類似性(これを類比という)を検出し、その類比を用いて一方の事象で成立する事実や知識をもう一方に変換することにより、問題解決の手がかりを得たり、未知の事実などを予測推定する推論方式」である[12]。

アナロジーのモデルとして4項アナロジーや、構造写像 モデルなどが提案されている[13]が、本論文では状況依存 的ファジィ評定を「ある状況における量的データとカテゴ リを表わすファジィ集合との対応関係と状況間の類比を 用いて、別の状況における量的データとカテゴリを表わすファジィ集合との対応関係を予測推定する手法」とする。 以下に状況依存的ファジィ評定における類比の定義を示す。

### 定義 3: 類比

状況 S と状況 T の評価範囲をそれぞれ  $R_S$  と  $R_T$  としたとき、式(2)と式(3)を満たす写像 f を評価範囲  $R_S$  から  $R_T$  への類比とする。またこのときの  $R_S$  と  $R_T$  をそれぞれベース、ターゲットと呼ぶことにする。なお、ファジィ集合  $\widetilde{C}_i^S$  と  $\widetilde{C}_i^T$  はそれぞれ状況 S と状況 T におけるカテゴリ $c_i$   $(i=1,2,\cdots,n)$  を表わすファジィ集合とする。

$$f: R_S \to R_T \tag{2}$$

$$\mu_{f(\widetilde{C}_{i}^{S})}(t) = \begin{cases} \bigvee_{s \in f^{-1}(t)} \mu_{\widetilde{C}_{i}^{S}}(s) , & t \in f(R_{S}) \\ 0 & , t \notin f(R_{S}) \end{cases}$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

$$(3)$$

ただし、 $f^{-1}(t) = \{s \mid t = f(s), t \in f(R_S)\}$ 、 $f(R_S)$  は $R_S$  の f による像とする。

### 2. 3 状況依存的ファジィ評定

状況依存的ファジィ評定の手順を以下に示す。

### 状況依存的ファジィ評定の手順:

- (1) ベース $R_s$  とターゲット $R_T$  を定める。
- (2)  $R_S$  から  $R_T$  への類比 f を求める。
- (3)  $\tilde{C}_i^T \approx \tilde{C}_i^S$  の f による像  $f(\tilde{C}_i^S)$  として求める。

状況依存的ファジィ評定の概念図を図1に示す。

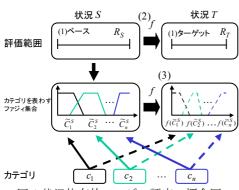


図1状況依存的ファジィ評定の概念図

### 3. 実験

アナロジーを用いた状況依存的ファジィ評定の有効性を検証するために実験を行なう。実験では、ファジィ評定として、境界漸近推定法(Boundary asymptotic estimation method: BASE 法)[14]とファジィグラフ尺度評定法(Fuzzy graphic rating scale: FGRS 法)[15]の2種類のメンバーシップ関数同定法を用い、状況に応じたファジィ集合をそれぞれ求める。また、BASE 法で求めたファジィ集合をもとに

状況依存的ファジィ評定によってファジィ集合を求める。この結果をもとに、BASE 法と FGRS 法で求めたファジィ集合の違いと、状況依存的ファジィ評定と FGRS 法で求めたファジィ集合の違いに有意な差があるかどうか検定を行なう。

### 3. 1. ファジィ評定

属性「身長」「体重」「値段」「気温」の量的データについてファジィ評定を行なう。属性「身長」の量的データに対するファジィ評定で被験者に提示する状況を表 1 に示す。

表1 被験者に示す状況

状況	表現
$S_{H_1}$	日本人男性について会話している
$S_{H_2}$	プロバスケットボール選手について 会話している
$S_{H_3}$	小学生について会話している

ファジィ評定では属性ごとに 7 個のカテゴリを用いで評価を行なう。属性「身長」の量的データに対するファジィ評定で用いるカテゴリを表 2 に示す。なお、カテゴリ $h_1$ および  $h_7$ を表わすファジィ集合は、得られるファジィ集合の台集合の上限または下限が評価範囲の上限、下限となり、他のカテゴリと比べ求められるファジィ集合の精度が悪くなる傾向があるため、後述する類比の決定やファジィ集合の比較には用いない。これは、他の属性に対するファジィ評定で用いるカテゴリについても同様である。

表 2 状況依存的ファジィ評定に用いるカテゴリ

	K T WOUNTHIS / A JULY CICUIT SY		
	カテゴリ	表現	
	$h_1$	ものすごく背が低い	
	$h_2$	とても背が低い	
	$h_3$	少し背が低い	
Ī	$h_4$	平均的	
	$h_5$	少し背が高い	
	$h_6$	とても背が高い	
	$h_7$	ものすごく背が高い	

本実験では、ファジィ評定として BASE 法および FGRS 法を用いる。BASE 法は求めるファジィ集合を台形ファジィ集合と仮定し、指定区間内の要素について、「一致する」「一致しない」「どちらでもない」の3値評価を行なうことでファジィ集合の1レベル集合および台集合の上限、下限を同定する。図2にBASE法のインターフェースを示す。

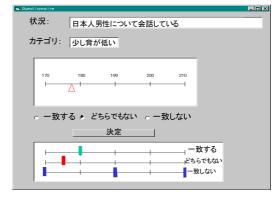


図 2 BASE 法のインターフェース

FGRS 法は、1 レベル集合と台集合の上限、下限を、被験者に評価範囲を表わす数直線上に直接回答させることでファジィ集合を同定する。図 3 に FGRS 法のインターフェースを示す。

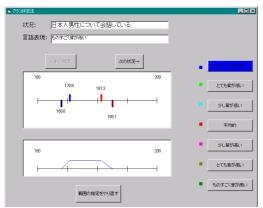


図 3 FGRS 法のインターフェース

#### 3. 2 状況依存的ファジィ評定

BASE 法を用いて求めたファジィ集合をもとに、状況依存的ファジィ評定を用いてファジィ集合を求める。ベースとターゲットとなる評価範囲間の類比として式(4)から式(8)の関数を仮定する。

$$f(x) = a_1 x + a_0 \tag{4}$$

$$f(x) = b_2 x^2 + b_1 x + b_0 (5)$$

$$f(x) = c_2 \log(x + c_1) + c_0 \tag{6}$$

$$f(x) = d_2 \exp(d_1 x) + d_0 \tag{7}$$

$$f(x) = e_2 \sqrt{(x + e_1)} + e_0 \tag{8}$$

式(4)から式(8)のパラメータ( $a_i$ ,  $b_j$ ,  $c_j$ ,  $d_j$ ,  $e_j$ , i = 0,1, j = 0,1,2)は、3.1節で求めたカテゴリを表わすファジィ集合の1レベル集合と台集合の上限、下限となる量的データを説明変量、目的変量[16]とし、最小二乗法[16]を用いて同定する。

### 3. 3 ファジィ集合の比較

BASE 法を用いて求めたファジィ集合と、FGRS 法を用いて求めたファジィ集合を、距離[17]と類似度[18]の2つの指標を用いて比較を行なう。また、状況依存的ファジィ評定を用いて求めたファジィ集合と、FGRS 法を用いて求めたファジィ集合についても同様に比較を行なう。

#### 3. 3. 1 距離

ファジィ集合  $\overset{\sim}{A}$  と  $\overset{\sim}{B}$  との間の距離  $\delta$  を式(9)で定義する。

 $\delta(\widetilde{A},\widetilde{B}) = \frac{1}{2} \int_0^1 (|a_1(\alpha) - b_1(\alpha)| + |a_2(\alpha) - b_2(\alpha)|) d\alpha$  (9) ただし  $\widetilde{A}_{\alpha} = [a_1(\alpha), a_2(\alpha)], \ \widetilde{B}_{\alpha} = [b_1(\alpha), b_2(\alpha)]$  はそれ デカファジィ集合  $\widetilde{A}$  と  $\widetilde{B}$  の  $\alpha$  -カット集合とする。

距離が小さいほどファジィ集合  $\widetilde{A}$  と  $\widetilde{B}$  は類似しており、距離が 0 のときはファジィ集合  $\widetilde{A}$  と  $\widetilde{B}$  は等価である。

#### 3. 3. 2 類似度

$$\sigma(\widetilde{A}, \widetilde{B}) = \frac{|\widetilde{A} \cap \widetilde{B}|}{|\widetilde{A} \cup \widetilde{B}|}$$
(10)

$$|\widetilde{A}| = \int_{x \in \text{supp}(\widetilde{A})} \mu_{\widetilde{A}}(x) dx \tag{11}$$

類似度は0から1の値をとり、類似度が1のときファジィ集合 $\widetilde{A}$ と $\widetilde{B}$ は等価である。

### 3. 4 考察

3.3 節での比較結果について、状況依存的ファジィ評定を用いて求めたファジィ集合と FGRS 法を用いて求めたファジィ集合との違いを、BASE 法を用いて求めたファジィ集合と FGRS 法を用いて求めたファジィ集合との違いと比較したとき、有意な差があるかどうか検定を行なう。

表 3 に属性「身長」について求めたファジィ集合間の距離による比較結果の例を示す。なお、表中の「 $B \leftrightarrow F$ 」は BASE 法を用いて求めたファジィ集合と FGRS 法を用いて求めたファジィ集合との距離を、「 $S \leftrightarrow F$ 」は状況依存的ファジィ評定を用いて求めたファジィ集合と FGRS 法を用いて求めたファジィ集合との距離をそれぞれ意味する。また、距離の単位はセンチメートルである。

表3 距離の比較

属性:身長、ベース: $S_{H_1}$ 、ターゲット: $S_{H_2}$ 

類比:  $f(x) = a_1 x + a_0$ 

カテゴリ	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$
$B \leftrightarrow F$	5.6	0.9	3.0	2.0	2.7
$S \leftrightarrow F$	5.9	0.4	2.0	3.5	1.9

BASE 法を用いて求めたファジィ集合と FGRS 法を用いて求めたファジィ集合との距離と、状況依存的ファジィ評定を用いて求めたファジィ集合と FGRS 法を用いて求めたファジィ集合との距離に差があるか検定を行なう。本実験では、被験者、属性、ベースとターゲットとなる評価範囲、類比と仮定する写像の違いに応じてそれぞれ有意水準5%で t 検定を行なう。表 4 にこれらすべての組み合わせのうち、属性および仮定する写像ごとの検定結果が有意水準5%で差があるとは言えないという結果となる割合を示す。なお表中の式(4)から式(8)は、評価範囲間の類比として各式を仮定したことを意味する。

表 4 差があるとはいえない組み合わせの割合(距離)

	式(4)	式(5)	式(6)	式(7)	式(8)
身長	94.9%	94.9%	96.2%	94.9%	94.9%
体重	97.4%	98.7%	97.4%	96.2%	98.7%
値段	97.4%	97.4%	89.7%	93.6%	91.0%
気温	96.2%	96.2%	94.9%	92.3%	94.9%

同様に、類似度を指標とした場合に属性および仮定する 写像ごとの検定結果が有意水準5%において差があるとは 言えないという結果となる割合を表5に示す。

表 5 差があるとはいえない組み合わせの割合(類似度)

	式(4)	式(5)	式(6)	式(7)	式(8)
身長	92.3%	93.6%	93.6%	93.6%	94.9%
体重	91.0%	98.7%	98.7%	94.9%	96.2%
値段	93.6%	92.3%	84.6%	87.2%	87.2%
気温	98.7%	97.4%	93.6%	94.9%	98.7%

表 4 および表 5 より、評価基準、属性、および仮定した 写像に関わらず、8 割以上の組み合わせで、有意差がある とはいえないことが分かる。また、特に写像を式(4)およ び式(5)と仮定した場合には、9 割以上の組み合わせで有意 差があるとはいえないことが分かる。これらの結果より、 多くの場合について状況依存的ファジィ評定を用いるこ とで、ファジィ評定を用いて求めたファジィ集合と同程度 のファジィ集合を求めることができるといえる。

### 4. まとめ

本論文ではファジィ評定にアナロジーの概念をとりいれた、状況依存的ファジィ評定の有効性を検証した。実験では、BASE 法を用いて求めたファジィ集合と FGRS 法を用いて求めたファジィ集合との違いと、状況依存的ファジィ評定を用いて求めたファジィ集合と FGRS 法を用いて求めたファジィ集合との違いに差が無いことを確認し、状況依存的ファジィ集合を用いることで、ファジィ評定を用いて求めたファジィ集合を用いることで、ファジィ評定を用いて求めたファジィ集合と同程度のファジィ集合を求めることができることを示した。

### 参考文献

- [1] J.P.ギルボード著,秋重 義治監訳,精神測定法,1959
- [2] 西里 静彦,応用心理尺度構成法,1975
- [3] 吉川 歩,ファジィ評定とメンバーシップ関数同定法, 日本ファジィ学会誌,Vol. 10, No. 2, pp.201-209, 1998
- [4] 松居 辰則,竹谷 誠,区間評定データの順序構造分析, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J77-A, No. 12, pp.1758-1767, 1994

- [5] 吉川 歩,西村 武,ファジィ範疇法による心理尺度構成 法とその実験的検証,日本ファジィ学会誌,Vol.5, No.4, pp. 719-731
- [6] Alf.C.Zimmer, A model for the interpretation of verbal predictions,International Journal of Man-Machine Studies,.Vol. 20, pp. 121-134, 1984
- [7] 高木 友博, 山口 亨,菅野 道夫,概念ファジィ集合と その連想記憶による実現,第 7 回ファジィシステムシ ンポジウム講演論文集, pp.359-362,1991
- [8] Haruhiko Takeuchi, A technique on Adjusting the System's Knowledge of Linguistic Hedges to Human Naive Thinking, Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFPIS International Conference, pp. 118-123, 2001
- [9] キース・J・ホリオーク,ポール・サガード,アナロジー の力, 1998
- [10] Atsushi Hayashi, Takehisa Onisawa , A study on situation-dependent fuzzy sets, Proceeding of 1st International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, 25B1-1, 2002
- [11] 鷲尾 降,元田 浩,尺度の理論,日本ファジィ学会, Vol. 10, No. 3, pp.401-413, 1998
- [12] 原口 誠, 有川 節夫, 類推の定式化とその実現,人工 知能学会誌,Vol. 1, No. 1, pp.132-139, 1986
- [13] 原口 誠, 沼尾 正行 ほか, 特集「アナロジー」, 情報 処理, Vol. 34, No. 5, pp521-583, 1993
- [14] 吉川 歩, 藤本 大助, 西村 武, 2種のメンバシップ関数同定法の客観的・主観的比較— ファジィグラフ評定尺度法と境界漸近推定法について —, 第11回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.405-408, 1995
- [15] 山下利之, ファジィ 心理学への展開, 1992
- [16] 河口 至商, 多変量解析入門 I, 1973
- [17] Arnold Kaufman, Madan M.Gupta (田中英夫, 松岡 浩 訳), ファジィ数理と応用, 1992
- [18] Dubois D., Prade H., Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications, 1980

#### 連絡先:

林 篤司

筑波大学機能工学系 鬼沢研究室 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1 Phone: 029-853-6188 Fax: 029-853-5207

E-mail: atsushi@fhuman.esys.tsukuba.ac.jp

# 判断マトリックスを使用した内部状態表現に関する研究

### Building Method of a Internal human mind Model Based on Decision Matrix

持田 信治 Shinji Mochida himac.jp

This Paper describes the system to collect and cluster the knowledge chips (keywords) gathered using Web technology and try to built an Internal human mind Model.

The developed system using Web and XML technology is aimed to generate the higher knowledge clustering the knowledge chips dynamically. The clustering is done by the way to get the building method of an Internal human mind Model Based on Decision Matrix. The Decision Matrix is formed by the parameters based on the clustered knowledge.

### 1. はじめに

本研究では人が行動や言葉で表現しようとする人の内部状態を模擬することにより、将来的には計算機内に模擬的に作成された内部状態と人とのコミュニケーションの実現を目指す。

人の内部状態は刺激の入力や環境の変化によりリアルタイムに変化している。そこでリアルタイムに人の内部状態が変化する様子を表現するために探索ルールを設定して環境や知識データをリアルタイムに探索して内部状態を行動は言語により表現するための内部状態を行動への判断マトリックスの導入を提案する。判断マトリックスは人が受ける刺激や環境変化により出力される行動や言葉の間に幾つかの関係パラメータを考えファジー関係マトリックス[1][2]として設定したものである。

### 2.知識の収集

人の内部状態が外部に表現される手順を再現 するためには以下の機能が必要である。

- (1)人の内部状態を構成する低位な知識を 収集する機能。ここで知識とは人が取り 込むことのできる全ての環境情報や刺 激情報のことである。
- (2) 低位な知識から登録されたルールに従い、リアルタイムに情報を収集する機能。
- (3) ルールに従って生成された基礎知識の 集合体に意味付けと判断を行い、判断を 言葉や行動等の表現に関係つける機能。

そこで第1の課題である極めて低位な知識を収集するために本研究ではXML文書形式で記述して低位な知識を収集することとした。

知識の記述にXML文書形式[3]を使用すると知識データは見出しタグとデータ実体の組み合わせにより自由に記述できるため、含まれる内容や項目数が異なる知識データを記述するのには適している。しかもXML文書形式で記述された知識はそれぞれが独立しており、他とは関係

を持たない点も知識を記述するのには適していると考えられる。仮に同じ内容を含む知識がある場合には冗長ではあるが、同じ内容をそれぞれの知識に書きこむことにより、各知識の独立性を高めることができる。

低位な知識から知識集合体を生成するルールを 人の意思に相当すると考えると、この知識を出 当するルールを登録することが知識をプロですることとなり、ある時刻において一 きれた知識集合体の組み合わせを判断してて与 が行動等の表現に関係付けるものが判断でしてマトリックスを主観的に観測することによりり、 の内部状態である意思の変化を模擬することができ、時間変化に伴い変化する人の内部状態であるに伴い変化する人の内部状態となり、 言動を関係でけることが可能となり、人ののお 状態に沿って連続的に言動として表現することが可能となる。

#### 3 . WEB 日記

本研究ではWEB技術を使用して低位な知識の蓄積と知識探索が可能なシステムを構築した。本システムは低位な知識の収集機能として以下の機能を持つ。

- (1) 手動データ登録
- (2)既存文書からのデータ抽出、登録 手動にて知識や情報を収集するには日記形式が 望ましいと考えられるため、WEB上に日記形式 にて情報を登録する機能を実現した(図1参照)。 登録用フォーム[4]は簡単に変更可能である。更 に本システムは既存の文書(マイクロソフト社 の WORD、EXCELL、POWERPIONT、とアドビ社の PDF 形式で作成されたデータ)からテキストを抽出 して XML 形式に変換して登録する機能を持つ。 本機能は簡易テキストマイニング機能としてキ ーワード候補の抽出と出現回数を取得すること も可能である(図2参照)。

本システムではリアルタイムに低位な知識を収

集する機能と登録ルールによる自動探索機能を 実現している。低位な知識を探索するルールは それぞれ独立に登録することが可能である。

従来の知識を判断するシステムでは知識を探索 する部分と知識や入力を判断してアクションを 起こす部分はif~then形式で一体にかか れるのが一般的であった。しかしif 判断ルー ル ~ then アクション構文を用いて複数 の知識探索ルールを記述するには必ずルールを 記述する前にルール間の関係を整理する必要が あった。従ってルールを記述する前にルールの 順番、組み合わせが整理ができない場合にはル ールの登録ができないという問題があった。し かも知識には通常、知識間の上下関係が存在す るため、注意深く登録を行わないと推論のルー プが発生してしまう。また推論実行中に入力に 対して条件の順番や条件そのものが適合しない 状況が生じると判断ルールを放棄することとな リ、知識や入力値の変化に対する耐性(rob ust性)が低いという問題があった。また判 断条件が複雑になるとif ルール then アクションで記述するルールも次第に増えるこ ととなり、ルールの追加、修正が困難となり、 システムが硬直化する傾向があった。そこで、 本研究では知識を探索するifルール部分とt hen アクションの部分を分離した。すると 探索条件を整理することなく独立した条件で自 由に書き込むことが可能となる。そして登録さ れたifルールに従い探索または収集された知 識の数、そのときの環境条件等に対して別途設 定された、判断ルールに従い判断することが可 能となる。従って登録した条件によりヒットし た結果が直接行動判断につながることはなく、 探索された結果を判断してアクションに移るル ールも自由に記述することができるようになり、 知識探索ルールの書き込みと判断ルール記述の 自由度は高くなる。本システムでは探索された 結果の判断はXSLに記述されている。

### 日記データ作成

XMLファイル名 F20040314161559.dat 参照ファイル名	参照 キーワ
登録時刻 2004年03月14日16時15分	2
登録先 xml_database.txt ▼ 種類 ₹初級シスアド ▼	
問題番号	
問題領域 計算型 マ	
難易度 5 ▼ 氏名	

図 1 手動データ登録画面例

FS2004 投稿.doc を TEXT抽出処理した結果

キーワードNO. 出現回数 を表示 0,1,WEB技術

- 1,1,使用
- 2,1,動的知識集合体生成システム
- 3,1,持田信治HIMAC
- 4,1, J P
- 5,9,知識
- 6,5,低位
- 7.1.知識2

#### 図2 文書データからのTEXT抽出例

### 4.まとめ

本研究では低位な知識から知識集合体を生成するルールを人の意思に相当すると考え、低位な知識のリアルタイム登録と知識抽出ルールによるアルタイムな探索機能を実現した。本機能の実現により本システムではある時刻における最新の知識とルールによる知識集合体の生成を可能とした。そしてこの生成された知識集合体の組み合わせと人の言動の表現を関連付けるために判断マトリックスの導入を提案した。

判断マトリックスは人が受ける刺激や環境変化により出力される人の言動の間に幾つかの関係パラメータを考えファジー関係マトリックスとして設定したものである。

時間とともに変化する判断マトリックスを観測することにより連続的に変化する人の内部状態の変化にあわせて一連の言動として表現することが可能となる。

今後の課題は得られた探索結果を人の言動への変換する判断マトリックスの実装方法である。 判断マトリックスから得られるものは行動概念 であり、この概念を実際の言動に展開する機能 の実現が課題である。

### 参考文献

[1]寺野寿朗、浅居喜代治、和多田淳三、村上周太、山川烈他編:応用ファジーシステム入門オーム社、1989

[2]阿部重夫: ニューラルネットとファジーシステム 近代科学社、1995

[3]高橋麻奈: やさしい X ML、

ソフトバンク、2001

[4]持田信治: H 1 5 年度 BMFSA 学会誌

BMFSA 学会、 2 0 0 3

### 連絡先:

持田 信治

〒651-2243 神戸市西区井吹台西町 4-26-4

Phone 078-993-3772 E-mail: moc@himac.jp

# 五感情報に基づく快適空間の実現

Realization of comfortable space based on senses information

高木 正人 Masato Takagi 早稲田大学大学院 早稲田大学大学院

和多田淳三 Junzo Watada Waseda University Waseda University

湯場崎直養 Naovoshi Yubazaki マイコム株式会社 mycom-japan

**Abstract:** It is difficult to define a comfortable space for human being. It is partly because many attributes on a space are related to comfortability, partly because all people have different preference, and also because even the same person changes their preference according the state of their health, body and so on. We intend to control various parameters and attributes in order to realize such a comfortable space according the historical data-base of people usages on the space. Also we employ the senses obtained form human bodies such as temperature, blood press, alpha wave and etc. to adjusting the circumstance of the space.

#### 1.はじめに

現代社会は、能率優先の豊かな物質文明であ る一方、ストレス社会でもある。そのストレス を癒し、快適性を満たすことは最も高度な人間 的欲求である。快適空間とは、長時間居ればい るほど心地よい空間である。しかし、快適な環 境創造には、快適さを享受する人の視点からの 空間・環境評価が必要であり、人それぞれが感 じる心地よさには違いが生じるため、実現は困 難である。

また、人は状況や体調により好みの状態が異 なる。例として「運動後は室内の温度が低いほ うがいい」「就寝前は室内の明るさが暗いほうが 落ち着く」などである。

本研究では、この問題を解決するため、人が 心地よい気分になると発生する 波に注目し分 析を行うことで快適空間の実現を試みた。

#### 2.感性工学の背景

感性とは、「人間がもつ感性やイメージを具体 的にモノとして実現するための設計レベルへ翻 訳する技術」と定義されている。イメージとは、 顧客が製品に対して抱く漠然としたものであり、 これらの感性 (イメージ)を何らかの方法で分 析し製品設計に盛り込む技術のことを感性工学 という。[4]

感性工学では、感性の定量化のため、印象 法としての心理計測や表出法としての生理計測 が行われることになる。ここで、生理計測とし て外部刺激を受けることにより発生する感情量 を自律神経反射や脳波等で生理学的に測定する 方法がとられる。

本研究では、 波の測定結果をシステムに導 入することで分析を行うことにより、感性を扱 っている。

以下の図では、脳波のパターンから「ストレ ス(怒り)」「喜び」「悲しみ(落ち込み)」「リラ ックス」の程度を数値化することにより、ある 人の特定の感情の増加・減少の測定結果である。

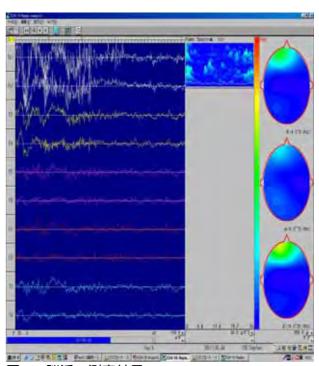


図-1 脳派の測定結果

## 波の数値化

波の発生状況は、測定状況により変化する。 まず、ラグランジュ補間を用い近時曲線を求め る。次に求められた式を、シンプソン則により 定積分を行い数値化するのである。

#### 3.1 ラグランジュ補間

何組かの x,y データが与えられているとき、 これらの点を通る補間多項式を求め、データ点 以外の点の値を求める方法である。

 $(x_0, y_0)$ , $(x_1, y_1)$ , $(x_{n-1}, y_{n-1})$ という $\mathbf{n}$ 個の点が与えられたとき、これらの点をすべて通る関数 f(x) は次のように求められる。

$$f(x) = \frac{(x - x_1)(x - x_2) \cdots (x - x_{n-1})}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2) \cdots (x_0 - x_{n-1})} y_0$$

$$+ \frac{(x - x_0)(x - x_2) \cdots (x - x_{n-1})}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2) \cdots (x_1 - x_{n-1})} y_1 \cdots$$

$$+ \frac{(x - x_0)(x - x_1) \cdots (x - x_{n-2})}{(x_{n-1} - x_0)(x_{n-1} - x_1) \cdots (x_{n-1} - x_{n-2})} y_{n-1}$$

$$= \sum_{i=0}^{n-1} \left( \sum_{j=0}^{n-1} \frac{x - x_j}{x - x_i} \right) y_i$$

これをラグランジュの補間多項式といい n-1 次の多項式となる。

# 3.2 シンプソン則

関数 f(x) の定積分  $\int_a^b f(x)dx$  をシンプソン則により求める。

 $(x_0, f(x_0))$ , $(x_1, f(x_1))$ , $(x_2, f(x_2))$ の3点を通る2次曲線の方程式は

$$g(x) = \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} f(x_0)$$

$$+ \frac{(x - x_0)(x - x_2)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)} f(x_1)$$

$$+ \frac{(x - x_0)(x - x_1)}{(x_{n-1} - x_0)(x_{n-1} - x_1)} f(x_2)$$

として表せる。この g(x) の  $x_0$  から  $x_2$  の間の積分値は数学的に、

$$\int_{x_0}^{x_2} g(x) dx = \frac{h}{3} ((f(x_0) + 4(x_1) + f(x_2)))$$
として表せることができる。

この式を a から b の区間にわたり適用すると、  $f'(x_0t) = \frac{h}{f(x_0t) + 4f(x_0t) + 2f(x_0t) + 4f(x_0t) + 2f(x_0t) + 4f(x_0t)}$ 

$$\int_{a}^{b} f(x)dx = \frac{h}{3} \{f(x_0) + 4(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + 2f(x_4) + \dots + 2f(x_{2n-2}) + 4f(x_{2n-1}) + f(x_{2n})\}$$

$$= \frac{h}{3} \{f(x_0) + f(x_{2n}) + 4(f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_{2n-3}) + f(x_{2n-1})\} + 2(f(x_2) + f(x_4) + \dots + f(x_{2n-2}))\}$$

$$F(x_0) + f(x_2) + f(x_2$$

奇数項の合計 fo と偶数項の合計 fe をそれぞれ求めた式は、

$$\frac{h}{3}$$
 $\{f(a) + f(b) + 4((f_0) + f(b-h)) + 2f_e\}$ となる。

#### 4.ファジィ理論の背景

従来、「あいまいさ」は理論的な取り扱いから 排除されていた。しかし制御を行う場合、従来 の精密な制御方法ではうまくいかないものも、 人が行えばうまく制御できることがよくある。 そこで、人の制御方法を理論的に記述しようと 試みることになるが、人の制御にはあいまいさ が含まれる。ここで、ファジィ理論を用いた「フ ァジィ制御」を行うわけである。

ファジィ制御とは、IF-THEN形式で記述されたルールにより推論に基づいて制御を行うものである。一つのルールにおいて、比較的広い範囲に対応した制御ができるため、きめの細かい操作が可能である。

また、互いに範囲が重なり合うようにルールを設定することで、複数のルールが互いを補完するような関係を作れるため、多くのルールのうちの一つが機能しなくても、他のルールがその分を補って結果として適切な出力を出すことができる。

# 4.1 ルールテーブルの作成

制御の方法として、部屋の環境を変化させたとき、アルファ波が多くでているときは、同じ命令を続け(表-1)アルファ波がでていないときは命令と逆の動作をする(表-2)。

以下の表-1,2 はファジィ制御用のルールテーブルであり、 $x_1$ を現在の温度、  $x_1$ を現在の温度、  $x_2$ を現在の温度の変化量とする。

表-2にある記号の説明として、NB~PB は大きさを表しており、N は Negative(負)、P は Positive(正)、B は Big(大きい)、S は Small(小さい)を表している。つまり、NB なら負の方向で大きい、PS なら正の方向で小さいとなり、ZO は Zero (零)を表したものである。

表-1 制御ルールテーブル

$x_1$	PB	PS	ZO	NS	NB
PB			PB		
PS			PS		
ZO			ZO		
NS			NS		
NB			NB		

アルファ波がでているとき

表-2 制御ルールテーブル

$\lambda_1$	PB	PS	ZO	NS	NB
PB			NB		
PS			NS		
ZO			ZO		
NS			PS		
NB			PB		

アルファ波がでていないとき

# 4.2 シミュレーション

シミュレーションに用いるメンバシップ関数 のパラメータを以下に表した。

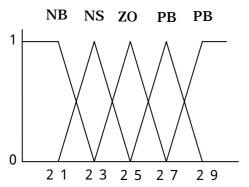


図-2 温度のメンバシップ関数

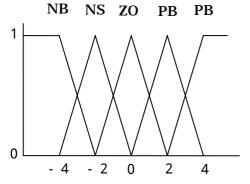


図-3 温度変化量のメンバシップ関数

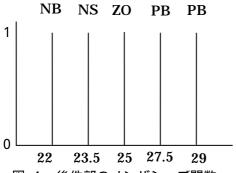
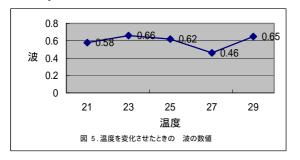


図-4 後件部のメンバシップ関数

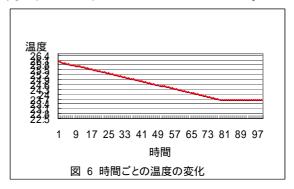
図-5は、シミュレーションを行うために作成した温度に対する 波の値である。

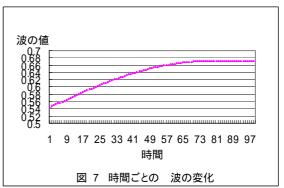
波の値を表す近似曲線の式は  $y = 0.0196x^4 - 0.1958x^3 + 0.6254x^2 - 0.7192x + 0.85$  となる。



# 4.3 シミュレーション結果

初期温度 26 度での 波の値を 0.54250、温度 の変化量を 0.03 とし、100 回計算を行った。 結果は、温度が 23.6 度に達した時、 波は一番 高い値となり値は 0.67039623 となった。





# 5.感性工学を用いたデータベースの作成

波の数値の設定は人それぞれ違うため、同一人物に対しては感情の動きを比較することはできるが、他の人との比較はできない。

この問題を解決するために、データベースの 手法を用いる。

- 1.体験者の年齢、性別、実験を行った時期(季節)など様々な状況においてデータを取得する。
- 2.集めたデータを年齢、性別、時期により分別する。

これらの作業を行うことで、「若者」と「年寄り」の好みの履歴、「夏」と「冬」での快適温度の履歴を調査することにより、状況別のデータベースを作成することができる。

データベースの情報を次回の制御に生かすことで、より短い時間で体験者の心地よい状態に 到達することが可能である。これは、利用者に より異なる感性に適応できる感性的なデータベ ースシステムである。

# 6 .GA によるメンバシップ関数のチューニング

メンバシップ関数は、ファジィ制御において 中心的役割を果たすものであり、制御精度・制 御時間に大きくかかわるものである。

問題を厳密に表現する場合、パラメータ数が 増大しその結果として与えられた入力に対して 実現レベルでの解が出力されないという結果が 生じるのである。

ここで、最適なメンバシップ関数を導き出すために遺伝的アルゴリズムを用い探索するため、予め用意されている多数のデータから自動的にルールが作成され、冗長なルールが排除できるのである。これにより、チューニングにかかる 莫大な時間を削減することが可能となる。

#### 6.1 GAの手順

遺伝的アルゴリズムは(GA)は、生物の進化 を模倣した学習的アルゴリズムである。

自然界における生物の進化過程においては、ある世代を形成している個体の集合、すなわち個体群の中で、環境への適合度の高い個体が高い確率で生き残るように再生される。さらに交叉や突然変異によって、次の世代の個体群が形成されていく。[12]

# 手順1.コード化

2 進数から 10 進数へ変換する

$$(\langle b_n, b_{n-1} \cdots b_0 \rangle)_2 = (\sum_{i=1}^{b_n} b_i \cdot 2^i)_{10} = x'$$

#### 手順2.再生

各個体群の適合度を計算し、適合度に依存した 一定の規則で個体の生成を行う。ここで、適合 度の低いいくつかの固体は淘汰され、その個数 だけ適合どの高い個体が増殖する。

$$x = 1 + x^{6} \cdot \frac{4}{2^{6} - 1}$$

x は適合度で、x は実数値である。

### 手順3.交叉

設定された交叉確率や交叉の方法により交叉を 行い、新しい個体を生成する。

# 手順4.突然変異

設定された突然変異確率や方法により突然変異 を行い、新しい個体を生成する。この結果、新 しい世代の個体群が生成される。

## 手順5.終了判定

終了条件を満たせば、その時に得られている最 良の個体を問題の準最適解とする。そうでなけ れば手順2へ戻る。

#### むすび

波の測定により、システムの制御が可能となることで今後、様々な場所における快適空間の実現が可能となる。

オフィスや工場・学校・図書館など、多くの

人が集まる場所において作業に対するストレスの緩和となり、スーパーマーケット・モールでは、買い物客の滞在時間が長くなることで、商品の購買率の上昇が期待される。

今後の課題として、システムに入力する値として「温度」「明るさ」など、数値化が比較的簡単に行えるものから、「音楽」「風景」など、数値化が困難な項目をシステムに導入することで、さらなる快適空間の実現に近づくことが可能である。

「音楽」の例として、疲れている時はロックやポップスより、ジャズやクラシックを聴いたほうがリラックスする。「風景」の例として、疲れている時は自然を基本とした青空や、草原や森といった緑の風景を映し出すことでリラックスすることができる。

## 参考文献

- [1]坂下清,長町三生,他:「経営システム」日本経 営工学会(1992)
- [2]寺野寿郎,浅居喜代治共編,菅野道夫:「応用ファジィシステム入門」pp122-124,オーム社 (1989)
- [3]電気学会編:「あいまいとファジィ」pp141-155, オーム社(1991)
- [4]長町三生:「感性工学・感性をデザインに活か すテクノロジィ」pp22-24 海文堂(1989)
- [5]長町三生:「感性商品学」pp1-4,37 海文堂 (1993)
- [6]坂和正敏,馬野元秀,大里有生:「ソフトコンピューティング用語集」pp48-49,51-60,73,212, 朝倉書店(1996)
- [7]山崎東,菅野道夫:「自動学習ファジィコントローラ,計測自動制御学会論文集」 Vol.2, No-8,pp720-726(1984)
- [8]前田幹男,村上周太:「自己調整ファジィコントローラ,計測自動学会論文集」 Vol.2,No-8,pp191-197(1988)
- [9]Y. ダブィドァ,大橋弘忠,濱岡豊:「遺伝的アルゴリズム」pp11-18 (1996)
- [10]石田良平,村瀬治比古,小山修平:「遺伝的アルゴリズムの基礎と応用」pp12-18 (1997)
- [11]平野廣美:「遺伝的アルゴリズムプログラミング」pp29-35(1995)
- [12]坂和正敏,田中雅博「遺伝的アルゴリズム」 pp13-30 (1995)

#### 連絡先:高木 正人

早稲田大学大学院情報生産システム研究科 〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-7

Phone + Fax: 093-692-5179 Mobile: 090-3464-4929

E-mail: junzow@osb.att.ne.jp

# 複数の知的エージェント間の交渉プロトコルに対する提案

Protocol for Negotiations among Intelligent Agents

星野敬太

Keita Hoshino 桐蔭横浜大学

Toin University of Yokohama

田崎栄一郎教授

Eiichiro Tazaki

桐蔭横浜大学

Toin University of Yokohama

Abstract; This article suggest a methodology for the negotiation between multiple intelligent agents which can be used when the agents must jointly select some action or decision alternative. This approach makes use of a linguistic scale to represent the information used by the agents represent their preferences with respect to the different available alternatives. We note that in the case of using numeric values this operation usually corresponds to taking an average. The technique we shall use is based upon the ordered weighted averaging (OWA) operators introduced by Yager and extended to the linear scale environment.

#### 1 はじめに

現在インターネットが全世界に爆発的に普及している。しかし、この速すぎる進歩のために、発信される情報量が急激に増えたため必要な情報のみを探し出せるような機能が求められている。そこで人工知能分野においてエージェントと呼ばれるソフトウェアが注目を集めている。今、エージェントの課題としては他のエージェントと協調的にタスクをこなすことを求められる。そこで本研究ではこのエージェント間のアクション、そして意思決定の合意形成をとるときの交渉の方法を検証する。

#### 2 システムの概要

#### 2.1 知的エージェントとは

エージェントとは、主に、自律的、協調、交渉などといった人工システムの擬人化を考慮する。またエージェントは果たすべき役割に応じて、様々なタイプに分類される。ここで知的エージェントとは、ユーザの要望に従いインターネット上の多くのタス

クをこなすソフトウェアコンピュータである。この とき多くのタスクをこなすときには必ずユーザ間の 知的エージェントの干渉が必要となる。

#### 2.2 OWA 演算子 [1]

先に述べた知的エージェントの相互干渉は現在多くの注目を集めている。本研究では OWA 演算子を用いることで総合評価を求める例を表す。これは論理学の論理和 (OR)、論理積 (AND) に柔軟性を持たせ、あいまいさを許容することができる。ここで定義を述べると

$$I^n \to I \ (where I = [0, 1])$$

からの写像 F が次元 n の OWA 演算子となる。ここで重み付きベクトル W は

$$W = \begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_m \end{bmatrix} \quad W_i \in (0,1) \quad \sum_i W_i = 1$$

より

$$F(a_1, a_2, ...a_n) = W_1b_1 + W_2b_2 + \cdots + W_nb_n - *$$

このときの  $b_i$  は集合  $a_1$  から  $a_n$  までの大きい要素順に並べたものである。ここで  $b_i \in [0,1]$  かつ j>i のとき  $b_i \geq b_j$  が成り立つならば、b の集合ベクトル B ができる。

# 3 交渉プロトコルについて

#### 3.1 概要

エージェントにおける交渉とは、ユーザ同士のや り取りを自動化である。オークションにおける自動 取引がその例である。そこで、本研究では、これら のエージェント等の可能な選択を総合的に評価し、 エージェントの評価を繋ぎ合わせ総合評価を検出 する。

#### 3.2 原理[2][3]

交渉プロトコルを Q という集合体の関数とする。この関数は、エージェントがスクリーンを通過するための交渉のつなぎを与えるための考え方を一般化している。ここで Q における性質は

(1) エージェントが意思決定の満足度あるいは信頼の増加の一致が一方より多ければ

$$Q(i) \ge Q(j) \ i \ge j$$

(2) 全てのエージェントが最も高い評価を満足するなら、

$$Q(r) = Perfect$$

(3) もし、意思決定の評価を支えるためには全てのエージェントの了解が必要なら

$$Q(i) = none \ Q(r) = perfect \ i < r$$

(4) もし、あるエージェントのサポートが評価するのに十分なら、

$$Q(i) = perfect for all i$$

(5) もし、少なくとも m のエージェントのサポートが考慮に必要なら、

$$Q(i) = none \ i \le j \ Q(i) = perfect \ i \ge j$$

ここで(3)から(5)までの性質は2値論理に基づいている。ここでOWA演算子を用いることで、条件を緩め多値論理に基づいて計算できる。このため

に関数 Q を定めるためには数値 a に接近している整数値を返す演算子 Int[a] を紹介する。ここで尺度 S の集合の基数 (尺度) を q とし、また参加するエージェントの数を r とする。この関数は、 $Q_A$  として表し、全ての i=0,1,...r に対し

$$b(k) = Int[1 + (k * \frac{q-1}{r})] - **$$

$$Q_A(k) = S_{b(k)}$$

となる。このとき q と r の値がどんな値でも、

$$Q_A(0) = S_1 \ Q_A(r) = S_q$$

が成立する。ここでこれらの式の具体例を挙げると、もし、r=3 そして q=7 のとき

$$b(k) = Int[1 + (k * \frac{6}{3}) = Int[1 + 2k]]$$

となるので各値は

$$Q_A(0) = S_1 \ Q_A(1) = S_3$$

$$Q_A(2) = S_5 \ Q_A(3) = S_7$$

となる。この Q の評価によって個々のエージェントの評価の集合体に対し OWA 法の線形尺度を用いている。それぞれの k 種類のエージェントが i 個の選択に対する個々の評価を  $X_{ik}$  とおく。ここで OWA 演算子の\*を用い評価を高い順に並べかえることで得られた関数を  $B_j$  として表す。このとき現した i 個の総合的な評価  $X_i$  を求めるために下の式を計算する。

$$X_i = Max_{j=1,\dots r}[Q(j) \wedge B_j].$$

#### 4 実験

重みの等しい 10 個の知的エージェントを用いて、合意形成を測る。ここで本研究では、車の購入をテーマとした。これは、車を購入するとき、希望する車が、A 車、B 車、C 車のうち 1 つを選択する。そのため 10 個の知的エージェントに OWA 演算子を取り入れることでどれにするか決める。

# 5 実験方法

各車ごとのエージェントの与えられた 5 段階の言語的評価 (左から大きい順に P,H,M,L,N) から、上記の計算式を用いて総合評価を求め、3 つの車で最も大きい評価をとる。ここで 1 例として A 車の総合評価を求める。まず、A の車の各評価を  $A_{ik}$  とおき総合評価を  $A_i$  とする。

$$A_i = Max_{j=1,\dots,10}[Q(j) \land B_j]$$

より、このときの総合評価は M である。同じように B 車の総合評価は L ,C 車の総合評価は N となる。

#### 6 結論

実験より、A車が最も高い総合評価を得られた。 よって、A車を購入するのが一番いいと結論付けられる。本研究では、言語的尺度をベースとし、OWA 法からの論理積の柔軟化を用いて個々の知的エー ジェントによる評価の結合をすることで総合的な評価が決まる。

# 参考文献

- [1] 浅居喜代治: ソフトコンピューティング 海文 堂 (1998年)
- [2] Yager.R.R. Man and Cybernetics 18,183-190,1988.
- [3] C.Carlsson et al:Problem solving with multiple interdependent criteria

#### 連絡先

田崎栄一郎

桐蔭横浜大学大学院工学研究科

横浜市青葉区鉄町 1614

Phone: 045-974-5070 Fax: 045-978-1311

E-mail: tazaki@intlab.toin.ac.jp

# ファジィシステムによるサッカーエージェントの行動獲得

# Acquiring the Behavior of a Soccer Agent by Fuzzy Systems

高谷 将裕

中島 智晴

有働 昌代

石渕 久生

Masahiro Takatani, Tomoharu Nakashima, Masayo Udo and Hisao Ishibuchi 大阪府立大学 大学院工学研究科

# Department of Industrial Engineering, Osaka Prefecture University

**Abstract** In this paper, we show three applications of fuzzy rule-based systems to soccer agents who address the ball intercept problem. We first introduce the system for acquiring the behavior. The learning agents determine whether to dash or to turn based on it. The other two fuzzy rule-based systems are used to determine details for each action. That is, the second system determines turn angles, and the third one the degree of dash power. Through computational experiments, we show that the learning agents can successfully acquire the behavior according to situations.

#### 1 はじめに

動的で複雑な環境におけるマルチエージェント研究における重要な課題として, "状況に即して行動する,経験から自律的に学習する"などが挙げられる.このような問題に対して,試行錯誤を通じて未知の環境に適応する学習制御の枠組である強化学習[1]は,自律エージェントの最適な行動獲得のための手法としてますます重要な研究分野になりつつある.

強化学習の最も有名な学習手法として,Q学習がある [2]. 通常の Q 学習では,状態空間と行動空間は,ともに離散的であることが想定されており,状態と行動の各組に対して Q 値と呼ばれる価値が割り当てられている.エージェントは Q 値に基づいて行動を決定し,その結果に応じて Q 値を更新する.これらの過程を繰り返し行なうことによって,エージェントは最適な行動を獲得する.

②学習において連続した状態空間と行動空間を扱うことを目的として、中島ら [3] は、ファジィ理論により拡張されたファジィ②学習を提案した、そこでは、ボールインターセプト問題 [4] と呼ばれる問題を扱うエージェントに対して、提案手法が適用されている。[3] において、エージェントはパスされたボールをインターセプトすることを学習する。つまり、エージェントは他のエージェントによってパスされたボールに近づき、捕えようとする。この手法において、状態空間はエージェントが持つ内部情報によって表され、②値はそれらの知覚情報からファジィ推論を用いて計算される、状態空間は、それを構成する要素(すなわち、状態変数)に対して、それぞれファジィ分割されることによって、複数のファジィ

部分空間として定義される.ここでは,各ファジィ部分空間がファジィ状態として扱われる.[3]では,ボールとエージェントの距離が短くなった時,あるいは,エージェントがボールを捕えることができたときに,エージェントに対して報酬が与えられる.

本論文における構成は以下の通りである.最初に,学習エージェントが扱うボールインターセプト問題について説明する.次に,この問題における turn/dash の意思決定に対するファジィシステムについて述べる.続いて,インターセプトに要する無駄な時間の減少を目的とした,各行動に対する 2 つのファジィシステムを説明する.すなわち,turn 選択時の角度決定,dash 選択時の速度決定に対して,それぞれファジィシステムが適用されている.

また,数値実験の結果から提案手法に対する評価を行い,エージェントが状況に応じて適した行動を選択することを示す.

#### 2 ボールインターセプト問題

本研究では、RoboCup Soccer Server ver.9.4.5 をテストベッドとして用いている・中島ら [3] はこれまでに、ボールインターセプト問題に対して、ファジィシステムに基づく強化学習を提案している・ここで、学習エージェントの課題は、他のエージェント (Passer) によってキックされたボールを捕えることである・これを図1に示す・

まず、Passer はボールを蹴ることができる範囲までボールに近づき、ボールを蹴る、学習エージェントは蹴られたボールを捕えようとする、この問題において、学習エージェントが利用できる情報を次に示す、

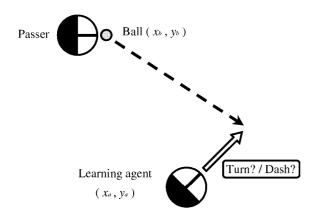


図 1: ボールインターセプト問題

## [利用可能な情報]

- 学習エージェントの絶対位置  $(x_a, y_a)$
- ボールの絶対位置 (x<sub>b</sub>, y<sub>b</sub>)
- ullet 学習エージェントの絶対速度  $(v_{ax},v_{ay})$
- ボールの絶対速度 (v<sub>bx</sub>, v<sub>by</sub>)

また,この問題における目的は,学習エージェントがボールを捕えるのに要する時間の最小化であるとみなす事ができる.

ここで,本論文におけるボールインターセプト問題を, 以下のように定義する.

#### [条件設定]

- 学習エージェントは,ボールをできるだけ早く捕らえることを目的とし,turn/dashの意思決定を 毎タイムステップ決定しなくてはいけない.
- dash を選択すると, 学習エージェントは直進する.
- turn を選択すると, 学習エージェントは進行方向を調整する.

以上より,もしボールがエージェントの進行方向にない状態での dash の選択は,ボールに近づくよりもむしろ,遠ざけるという結果を招き得ると考えられる.また,turn の選択によって,エージェントは進行方向を正しく修正することができるが,それは同時にエージェントの減速を導くことになる.したがって,エージェントはインターセプトに要する時間を浪費しないように,状況に応じた行動を適切に選択することが必要である.

# 3 ファジィシステムによる行動獲得

## 3.1 ファジィIf-Then ルール

学習エージェントは,毎ステップの turn/dash の意思 決定に関して,学習エージェント自身とボールの位置, 及び速度の情報を用いる.中島ら[3]は,ボールインター セプト問題に対するファジィQ学習を提案している.そ こでは,以下の形式のファジィIf-Then ルールが用いら れている.

 $R_i$ : If  $x_r$  is  $A_{i1}$  and  $y_r$  is  $A_{i2}$ 

and  $v_{rx}$  is  $A_{i3}$  and  $v_{ry}$  is  $A_{i4}$ 

then turn with  $w_i^{turn}$  and dash with  $w_i^{dash}$ ,

$$i = 1, \dots, N \qquad (1)$$

ここで,

$$x_r = x_b - x_a \tag{2}$$

$$y_r = y_b - y_a \tag{3}$$

$$v_{rx} = v_{bx} - v_{ax} \tag{4}$$

$$v_{ry} = v_{by} - v_{ay} \tag{5}$$

また, $R_i$  は i 番目のファジィIf-Then ルールのラベル, $A_{i1},\ldots,A_{i4}$  は各状態変数に対するファジィ集合, $(w_i^{turn},w_i^{dash})$  はそれぞれ turn,dash に対するファジイ If-Then ルールの重みベクトルであり,N はルールの総数を示す.状態変数として,利用可能であるエージェント自身とボールの速度,及び位置から,エージェントに対するボールの相対位置,相対速度を求める.

また,ファジィ集合としては,三角型,台形型,ガウス分布型など,任意の形状のものを用いることができるが,本論文では,If-Then ルールに用いられている各状態変数に対して,図 2 に示すファジィ集合を用いる.従って,ルールの総数 N は  $N=3^4=81$  個となる.

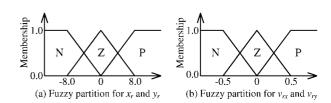


図 2: ボールインターセプト問題におけるファジィ分割

#### 3.2 意思決定

ここで,タイムステップtにおける学習エージェントの状態ベクトルを $\mathbf{s}=(x_r,y_r,v_{rx},v_{ry})$ と定義する.学

習エージェントは状態ベクトル s を観測後,次に示すファジィ推論を用いて各行動(すなわち,turn/dash)の支持度を計算する.

# [ファジィ推論]

$$W_k = \frac{\sum_{i=1}^{81} w_{ik} \cdot \mu_i(\mathbf{s})}{\sum_{i=1}^{81} \mu_i(\mathbf{s})}, \quad k = turn, dash$$
 (6)

ここで ,  $\mu_i(\mathbf{s})$  は , ファジィIf-Then ルール  $R_i$  と状態ベクトル  $\mathbf{s}$  との適合度であり , 以下の積演算によって定義される .

$$\mu_i(\mathbf{s}) = \mu_{i1}(x_r) \cdot \mu_{i2}(y_r) \cdot \mu_{i3}(v_{rx}) \cdot \mu_{i4}(v_{ry}) \tag{7}$$

ここで, $\mu_{ij}(\cdot)$ ,j=1,2,3,4 は前件部ファジィ集合  $A_{ij}$ ,j=1,2,3,4 におけるメンバシップ関数であり,最終的な行動決定は, $W_k$  の大きさに応じたルーレット選択により決められる.

# 3.3 ファジィシステムの学習

学習エージェントによって選択された行動が実行された後、状態の変化に応じて報酬と罰のいずれかが学習エージェントに与えられる。すなわち、ボールインターセプト問題においては、ボールをうまくインターセプトできたときに報酬を、また、ボールをパスされてからあらかじめ決められた時間内にインターセプトできなかったときに、罰として負の報酬を与える。

ここで , 式 (6) によって選択された行動を行ったエージェントに対してのみ , 報酬 r が与えられるとする . そのとき , ファジィIf-Then ルールにおける重みベクトルは次式により更新される .

$$w_i^k := (1 - \alpha_{ik}') \cdot w_i^k + \alpha_{ik}' \cdot (r + \gamma \cdot W_{max}) \tag{8}$$

ここで,r は学習エージェントに対する報酬, $W_{max}$  は $w_i^k$  更新前の  $W^k$  の最大値, $\gamma$  は正の定数である.また,lpha' は学習率であり,以下の等式に従って決められる.

$$\alpha'_{ik} = \alpha \cdot \frac{\mu_i(\mathbf{s})}{\sum_{l=1}^{81} \mu_l(\mathbf{s})}$$
(9)

ここで, $\alpha$  は正の定数である.

# 4 ファジィシステムによる turn 選択時の角 度決定

本論文で扱うボールインターセプト問題において,学習エージェントは dash/turn の決定を,毎サイクル行

わなくてはいけない.学習エージェントが turn を選択したとき,インターセプトに要する無駄な時間を減らすために,turn の角度は適切に決定される必要がある.これを図3に示す.ここで,ボールの位置と速度といった情報に基づく,turn の角度決定に対する第2のファジィシステムを適用する.また,この付加的なファジィシステムを角度決定システムと呼ぶことにする.

はじめに,上で挙げた情報から以下の等式より,2つの値を得る.1つはボールと学習エージェント間のユークリッド距離であり,もう1つは学習エージェントに対するボールの相対速度の自乗である.したがって,以下の等式が成り立つ.

$$d^2 = x_r^2 + y_r^2 (10)$$

$$|V_r|^2 = v_{rx}^2 + v_{ry}^2 \tag{11}$$

ここで, $(x_r,y_r)$ , $(v_{rx},v_{ry})$  はそれぞれ,学習エージェントに対するボールの相対位置,相対速度である.得られた状態  $\mathbf{s}'=(d^2,|V_r|^2)$  から turn の角度を決定するため,以下の形式のファジィIf-Then ルールを用いる.

$$R'_1$$
: If  $d^2$  is near and  $|V_r|^2$  is slow  
then Look at 2 cycles ahead (12)

$$R'_2$$
: If  $d^2$  is near and  $|V_r|^2$  is fast  
then Look at 5 cycles ahead (13)

$$R_3'$$
: If  $d^2$  is  $far$  and  $|V_r|^2$  is  $slow$  then Look at 5 cycles ahead (14)

$$R'_4$$
: If  $d^2$  is  $far$  and  $|V_r|^2$  is  $fast$  then Look at 10 cycles ahead (15)

すなわち,このファジィIf-Then ルールは,学習エージェントが何サイクル先のボールの位置へ体を向けるように turn するべきであるかを決定する.また, $(d^2,|V_r|^2)$  は,それぞれ図 4 に示すようにファジィ分割され,上式における"near","far","slow","fast"の 4 つの項は,それぞれ図 4 の各ファジィ集合に対応している.ここで,求めるサイクル数を  $\hat{f}$  とすると,エージェントは状態 s' を観測後,以下の式に基づいて  $\hat{f}$  を決定する.

$$\hat{f} = \frac{\sum_{l=1}^{4} f_l \cdot \mu'_l(\mathbf{s}')}{\sum_{l=1}^{4} \mu'_l(\mathbf{s}')}$$
(16)

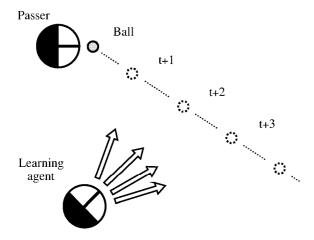


図 3: turn 選択時の角度決定

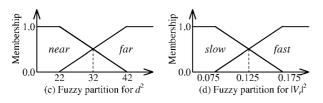


図 4: turn の角度決定に対するファジィ分割

ここで  $f_l$  ,l=1,2,3,4 はファジィ If-Then ルール  $R_l'$  の結論部実数である.すなわち, $f_l$  は 2,5,10 のうちのいずれかをとる.また, $\mu_l'(\mathbf{s}')$  はファジィ If-Then ルール  $R_l'$  に対する状態ベクトル  $\mathbf{s}'$  の適合度である.

ただし,中島ら [3] によるボールインターセプト問題では,この追加的な角度決定システムは考慮されていない.すなわち [3] において,学習エージェントは turn を行うとき,ある決められたサイクル数だけ先のボールの位置へと体を向けていたことに注意されたい.

# 5 ファジィシステムによる dash 選択時の速 度決定

学習エージェントが dash を選択したとき,その速度もまた状況に応じて調整される必要がある.ここで,dash の速度決定に対して第3のファジィシステムを適用する.以下では,これを速度決定システムと呼ぶ.入力情報としては,4節の turn 選択時の角度決定システムと同じく, $d^2$  と  $|V_r|^2$  を用いる.

この速度決定システムにおいては,エージェントが何%の力で dash を行うのかを決定するものとし,これを $\hat{D_p}$  と定義する.

エージェントは状態  $s'=(d^2,|V_r|^2)$  を観測後,以下に示すファジィ If-Then ルールに従って  $\hat{D_p}$  を決定する.

$$R'_1$$
: If  $d^2$  is near and  $|V_r|^2$  is slow  
then Dash by 50 percent (17)

$$R'_2$$
: If  $d^2$  is near and  $|V_r|^2$  is fast then Dash by 75 percent (18)

$$R'_3$$
: If  $d^2$  is  $far$  and  $|V_r|^2$  is  $slow$  then Dash by 75 percent (19)

$$R'_4$$
: If  $d^2$  is  $far$  and  $|V_r|^2$  is  $fast$  then Dash by 100 percent (20)

状態  $s'=(d^2,|V_r|^2)$  は,本論文ではそれぞれ図 5 に示すようにファジィ分割される.

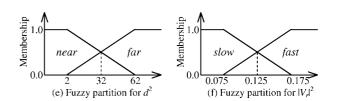


図 5: dash の速度決定に対するファジィ分割

エージェントは , dash に用いる力の割合  $\hat{D_p}$  を以下の等式によって決定する .

$$\hat{D_p} = \frac{\sum_{l=1}^{4} P_l \cdot \mu'_l(\mathbf{s'})}{\sum_{l=1}^{4} \mu'_l(\mathbf{s'})}$$
(21)

ここで  $P_l$  ,l=1,2,3,4 はファジィIf-Then ルール  $R_l'$  の 結論部実数である.すなわち, $P_l$  は 50,75,100 のいずれかをとる.また, $\mu_l'(\mathbf{s}')$  はファジィIf-Then ルール  $R_l'$  に対する状態ベクトル  $\mathbf{s}'$  の適合度である.

#### 6 数値実験

ボールインターセプト問題に対するファジィシステムの有効性を示すため,数値実験を行った.数値実験の結果として,学習エージェントがインターセプトに要した時間を図6に示す.ここには,インターセプト回数が3000回に達するまでの結果が示されている.実験結果より,試行を重ねるにつれて,より短い時間でボールをインターセプトできるようになることがわかる.図6に

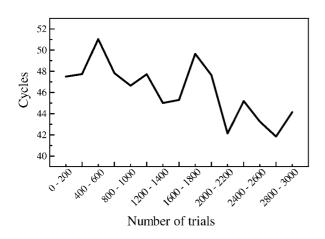


図 6: インターセプトに要した時間

おいて示されている所要時間が単調減少ではない理由の一つとして, RoboCup Soccer Server がボールやエージェントの動き,及び位置や速度に関する情報にノイズを付加していることが考えられる.

また,図7にインターセプトするまでの学習エージェントとボールの軌跡を示す.この図において左から右に移るにつれて,エージェントは学習を重ねている.

この図より,学習初期ではうまくインターセプトできていないのに対して,十分に学習を重ねるにつれて,学習エージェントがより滑らかにボールまで到達するように移動していることがわかる.

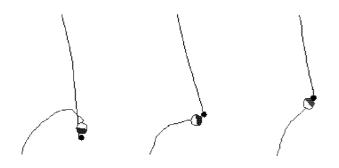


図 7: ボールをインターセプトするまでの軌跡

#### 7 おわりに

本論文では、サッカーエージェントの行動学習に対する 3 種類のファジィシステムの適用を示した.まず最初に、ボールインターセプト問題における行動獲得のためにファジィシステムを適用した.ここでは、ファジィQ 学習の形式でファジィIf-Then ルールの重みが更新される.また、インターセプトに要する無駄な時間を減少させることを目的として、各行動に対して 2 つのファジィ

システムを適用した.すなわち, turn 選択時の角度決定, dash 選択時の速度決定に対して,それぞれファジィシステムが用いられている.

また、本論文でテストベッドとして扱った RoboCup Soccer Server においては、実時間処理、情報の欠如に対する不完全情報処理といった複雑な課題も考慮する必要がある。なぜなら、それらに対する性能が直接エージェントの性能に影響を及ぼすからである。そのため、本論文において用いられたファジィシステムは、入力情報数、ファジィ分割数などを考慮し、制限する必要があった。しかしながら、そのような制約下においても、各ファジィシステムがうまく機能していることが、数値実験の結果から示された。

また,本論文ではエージェント自身とボールに関する情報に基づくファジィシステムを提案したが,味方,敵といった他のエージェントの状態も考慮に入れた意思決定を行うことが,今後の課題として挙げられる.

# 参考文献

- [1] R.S.Sutton and A.G.Barto, "Reinforcement Learning: An Introduction," MIT Press, 1998.
- [2] C. J. C. H. Watkins and P. Dayan, "Q-learning", Machine Learning, Vol.8, pp.279-292, 1992.
- [3] T. Nakashima, M. Udo and H. Ishibuchi, "A Fuzzy Reinforcement Learning for a Ball Interception Problem", *RoboCup Symposium* 2003 (in press).
- [4] P. Stone, Layered Learning in Multiagent Systems - A Winning Approach to Robotic Soccer, MIT Press, 2000.

#### 連絡先

〒 599 - 8531 大阪府堺市学園町 1 - 1 大阪府立大学 工学部 経営工学科 中島 智晴

電話 : 072 - 254 - 9350

FAX: 072 - 254 - 9915

E-mail: nakashi@ie.osakafu-u.ac.jp

# 免疫型マルチエージェントニューラルネットワークの構成

A Synthesis of immune multi agent neural networks

大枝 真一

Shinichi Oeda

木更津工業高等専門学校情報工学科 Dept. of Information and Compter Eng'g

Kisarazu National College of Techonology

市村 匠

Takumi Ichimura

広島市立大学情報科学部

Fac. of Information. Science.,

Hiroshima City Univ.

**Abstract:** Both immune system and neural network are complex biological systems. These systems are capable of learning, memory, and pattern recognition. Many classification algorithms have been developed in a field of the information processing. In this paper, we propose the immune multi agent neural networks where each immune agent employs different neural networks to handle a subset of training cases. This proposed method is limited to the behaviors of the macrophage, B-cell, and T-cell to realize a good classification capability. To verify the validity and effectiveness of the proposed method, we tested a MONK's problems as training data and reported techniques for extracting If-Then rules from the trained networks.

# 1. はじめに

生体における免疫は,数種類の免疫細胞が体内に侵入する抗原を認識し,互いの協調動作により排除する高度な並列分散処理を行っていると考えられている.また,免疫学的記憶とよばれる学習能力を有し,同じ抗原が侵入した場合,速やかに排除する機能も持っている.このような免疫系メカニズムの特徴から,免疫型システムは自律分散システムの1つのモデルとして考えられるだろう[1,2].

そこで,我々は免疫型マルチエージェントニューラルネットワークを提案した[3].これは,複数のエージェントが相互作用的に抗原を認識・排除する,生体免疫システムの動作に着目した手法である.提案する手法は,ニューラルネットワークで構成された複数のエージェントが,相互作用的に訓練事例をサブセットに分割することにより学習を遂行するものである.・トワーク[4]を用い,B細胞は進化論に基づくニューラルネットワークの構造適応学習アルコゴリーラルネットワークの構造適応学習アルコゴリーラルネットワークの構造適応学習アルコゴリーラルネットワークの構造の有効性を検証するために,ベンチマーク問題である MONK's Problem の分類問題[6]を用いた.

# 2. 格子構造ニューラルネットワーク[4]

まず,格子構造ニューラルネットワークでは,格子状に中間ニューロンが割り当てられる.これらの中間ニューロンは,ネットワークへの入力信号とそのニューロンの近傍  $N_i$  にあるニューロンの状態により,結合重みを変化させる.図 1 は 3 層からなる格子構造ニューラルネットワークである.入力ニューロン IN 個と出力ニューロン OT 個があるとき,1 辺が HN 個の正方形の格子状に並べられた中間ニューロンをおく.また,入力層 - 中間層間と中間層 - 出力層間で

は動作が異なっており,図2は入力層と中間層間での信号の流れを示している.

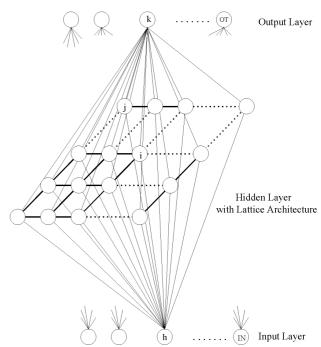
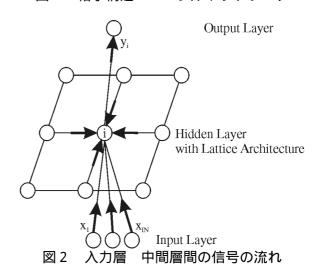
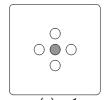
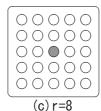


図1 格子構造ニューラルネットワーク









(a) r=1 (b) r=2 図 3 同次近傍システム

ここでそれぞれのニューロンi の近傍  $N_i$  は,格子状でi の周りにあるニューロンのグループから構成されている集合である.S がニューロンの集合を表し, $N=\left\{N_i\middle|i\in S\right\}$  はニューロンの近傍集合を表しているとするならば, $\left\{S,N\right\}$ の対は一般にグラフを形成することになる.ここで用いる近傍は図 3 のような,同次近傍システムと呼ばれ,式(1)で定義される.

$$N = \left\{ N_i \middle| i \in S \right\}, \quad N_i = \left\{ j \middle\| \ell_j - \ell_i \middle\|^2 \le r, i \in S \right\}$$

$$\tag{1}$$

S はニューロンの集合で ,  $\ell_i$  ,  $\ell_j$  はそれぞれニューロンi , j に対する格子上の位置を表している . r は図 3 のように ,ニューロンの近傍領域の範囲を示している .

格子上のニューロンi には 2 つの変数  $z_i$  と  $y_i$  があり, $z_i$  はプレシグモイド活性レベルであり, $y_i$  はポストシグモイド活性レベルである.これらの変数  $z_i$  と  $y_i$  は,式(2)を満たしている.

$$z_{i}[t] = a_{1}F(Met(x[t], \mathbf{w}_{i}^{IH})) + a_{2} \sum_{j \in N_{i}} y_{j}[t-1]\mu_{ij}$$

ここで  $z_i[t]$  は時刻 t でニューロン i のプレシグモ イ ド 活 性 レ ベ ル で あ り , x[t] は  $\mathbf{x}=(x_1,x_2,\cdots x_h,\cdots x_{IN})$  を満たす入力信号ベクトルである .

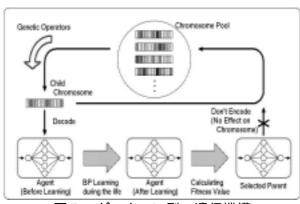


図 5 ダーウィン型の遺伝機構

また, $\mathbf{w}_{i}^{IH} = \left(w_{i1}^{IH}, w_{i2}^{IH}, \cdots, w_{ih}^{IH}, \cdots, w_{iN}^{IH}\right)$ は入力 重みベクトルと呼ばれ, $w_{ih}^{IH}$  は入力  $x_h$  とニューロン i との間の結合重みを示している(ただし, $1 \le h \le IN$ ).F()は正の単調減少関数で,パタン空間で入力ベクトルと入力重みベクトルとが接近しているとき,高い活性値を出力する.Met()は距離空間でこれらの 2 つの距離を示す.

# 3. 進化論に基づくニューラルネットワーク<sup>[5]</sup>

佐々木らは、進化論からの類推に基づき、個体における生涯での「学習」と、集団における世代をまたいだ「進化」といった、2つの異なる適応過程を、相互補完的なものとしてとらえた研究を行っている.ここでは、「学習」には BP学習、「進化」には GA を適用し、ラマルク型およびダーウィン型の進化論上のモデルで、シミュレーション評価実験が行われていた.

これらのモデルでは,集団内の各個体はニューラルネットワークで構成されており,BP 学習により結合荷重ベクトルを修正していた.

このうちダーウィン型と呼ばれる遺伝機構(図4)のモデルをもとに,ニューラルネットワークの構造適応型アルゴリズムを開発した.このダーウィン型では,修正された結合荷重ベクトルを次世代へ伝えることは行われておらず,自分が誕生したときの遺伝子を,そのまま次世代の子を作る際の遺伝子として GA の遺伝的操作を行っている.

学習環境の変化に適応可能な GA によるニュ ーラルネットワークの構造決定法が提案されて いる[5]. 文献[5]では, 学習中に教師信号に変化 が及ぶ動的環境でも,学習を初期状態から行う のではなく、ネットワーク構造や結合荷重ベク トル,学習パラメタ値などの継承を考慮した適 応的な学習を可能とする方法を提案している. また、探索対象となる全空間の一部である部分 空間のみしか訓練事例として与えられなかった 場合においても、全空間に適応可能な、つまり 探索空間内のどの訓練事例に対しても学習可能 な個体を持つ集団を獲得することに成功してい る.これらの手法では,動的に変化する環境に おいても適応的にネットワーク構造を変化させ ることで多様性を維持し,学習を可能としてい る.そこで我々は,免疫細胞の多様性の維持を 考慮し, MHC を分化させるために, 進化論に基 づくニューラルネットワークの構造学習法を適 用する<sup>[7]</sup>.

# 4. 免疫型マルチエージェントニューラルネットワーク

我々は,複数のエージェントが相互作用的に 抗原を認識・排除する,生体免疫システムの動 作に着目し、この機構を取り入れた免疫型マルチエージェントニューラルネットワークを提案する。本手法は、ニューラルネットワークで構成された複数のエージェントが、相互作用的に訓練事例をサブセットに分割することにより学習を遂行するものである。マクロファージは2節で述べた格子構造ニューラルネットワーク[4]を用い、B細胞は3節で述べた進化論に基づく構造適応学習アルゴリズム[5]で構成した。

# 4.1 生体における免疫細胞

生体における代表的な免疫細胞の種類は,マクロファージ,B細胞,T細胞とした.

#### 4.2 マクロファージ

抗原が体内に侵入したとき、マクロファージは抗原を取り込み、抗原のMHCを取り出す.このMHCは生体の自己・非自己を区別するための重要な役割をもっている.このため、マクロファージを構成するニューラルネットワークは、抗原である訓練事例から主要な特徴を抽出可能なネットワークを用いる必要がある.

そこで,我々はマクロファージを図 1 に示す格子構造ニューラルネットワークで構成する.格子構造ニューラルネットワークの中間層は 2次元平面上に配置され,同じような特徴をもつ入力パタンはマップ上で近い位置に出力する。また,格子構造ニューラルネットワークの学習では,中間ニューロンの生成と消去を行っている.最適なニューロン数となったマップ上のこる面は、中間に入力される事例をまとめて,これら前練事例のサブセットとする.これにより訓練事例を分類することが可能となる.

#### 4.3 B 細胞ニューラルネットワーク

マクロファージニューラルネットワークによって分類された訓練事例のサブセットを B 細胞ニューラルネットワークが学習を行う . B 細胞ニューラルネットワークが存在し , これらの B 細胞ニューラルネットワーク間を進化論の B 細胞ニューラルネットワーク間を進化論う高応学習アルゴリズムで学習を行合合基 . マクトルを BP 学習により更新し , 学習パテスでもよびネットワーク構造を GA により探索って付およびネットワーク構造を GA により探索って付およびネットワーク構造を GA により探索って対しましている . 図 5 は B 細胞ニューラルネットワークを表している .

#### 4.4 T 細胞ニューラルネットワーク

生体の T 細胞は,マクロファージから受け取った抗原の MHC をもとに,B 細胞を活性化させる働きがある.本章では,T 細胞は B 細胞に訓練事例を割り当てるために用いる.T 細胞ニュー

ラルネットワークは,格子構造ニューラルネットワークの下部である入力 - 中間層で構成される T 細胞ニューラルネットワークを図 6 に示す アクロファージニューラルネットワークに入力信号が与えられたときの格子状の中間層の活性出力を観察し,最大活性出力のニューロンの位置を T 細胞ニューラルネットワークに抗原情報として提示する.

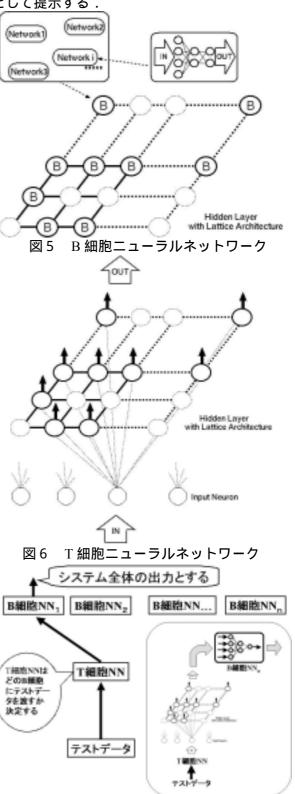


図7 前向き計算

#### 4.5 前向き計算

前向き計算では、それぞれの免疫細胞ニューラルネットワークが学習を行い、十分誤差が小さくなったとき学習を終了する.そしてテストデータは、T細胞ニューラルネットワークに入力し、前向き計算を行い、ネットワークとしての出力を得る.その出力値にもとづいてどのB細胞ニューラルネットワークにテストデータを与えられたB細胞ニューラルネットワークは前向き計算を行い、それをシステム全体の出力活性として推論出力を得る.前向き計算の概略を図7に示す.

# 5. MONK's Problems

#### 5.1 実験準備

MONK's Problems は分類問題のベンチマーク問題として広く公開されている[6]. MONK's Problems は 6 つの異なる属性を持つロボットの分類問題(432 種類の属性 3 個の問題)で,それぞれの問題の"ルールに対応するロボット"と,それ以外の"ルールに対応しないロボット"との2つのグループに分類することが目的となる. 各属性値に対応する要素を表1に示す.

#### 5.2 実験結果

マクロファージニューラルネットワークのネットワーク構造は、入力層のニューロン数 17 個,中間層のニューロン数  $4 \times 4$  個,出力層のニューロン数 1 個を用いた.格子構造ニューロンの近傍領域の範囲 r は,学習初期では 3 とし,学習が進みにつれて近傍領域を小さくし,学習終了時では 1 とした.マクロファージでは,学習回数が 55 , 108 , 163 , 194 , 202 回目でニューロンの生成が行われ,1000 回の学習で,誤差は 0.005 に収束した.

表 1 MONK's Problem おける 6 つの属性値

$x_1$	頭の形 = {丸,四角,八角}
	体の形 = {丸,四角,八角}
$x_3$	笑っている = {はい,いいえ}
$x_4$	持っている = {剣,旗,風船}
$x_5$	ジャケットの色 = {赤,黄,緑,青}
$x_6$	ネクタイをしている = {はい,いいえ}

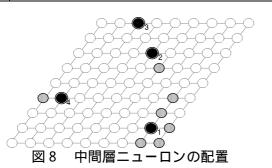


図 8 は,学習終了時の中間層ニューロンの配置であり,学習によって中間層は9×9の格子状となり,そのうち太丸で示す11個のニューロンの位置を示すマップを獲得した.得られた格子状マップは訓練事例に対して最適な構造であると考えられる.

T細胞ニューラルネットワークは入力層 1,出力層は図 8 に示した格子状マップのニューロンで構成し,入力信号をどのニューロンに割り当てるか決定する。T細胞ニューラルネットワークにデータを入力したときに,最大活性出力するニューロンにそのデータを割り当てていく。図 8の二重丸は訓練事例を与えたときの最大活性出力であるニューロンを示している。つまり,T細胞ニューラルネットワークによって訓練事例は 4 グループに分類された。

## 6. まとめ

エージェントの機能として,ニューラルネットワークを採用し,それらが複数動作する学習アルゴリズムを開発した.それぞれのエージェントの動作に対し,免疫システムを模倣した.その結果,非常に高い分類能力をもつニューラルネットワーク学習アルゴリズムが開発された.

# 参考文献

[1] 石田好輝, "免疫型システムとその応用", コロナ社, 1998.

[2] D. Dasgupta (Editor), "Artificial Immune System and Their Applications", Springer, 1999.

[3] T. Ichimura, S. Oeda, M. Suka, K. J. Mackin and K. Yoshida, "Adaptive Learning Methods of Reflective NN and Immune Multi-agent NN", In "Knowledge Based Intelligent System for Health Care.", T. Ichimura and K. Yoshida Eds., Advanced Knowledge International (to appear 2004).

[4] 市村匠, 大枝真一, 山下利之, 田崎栄一郎, "格子構造ニューラルネットワークの学習法の提案", 日本ファジィ学会誌 Vol. 14, No. 1, pp. 28-42, 2002. [5] 大枝真一, 市村匠, 寺内睦博, 高濱徹行, 磯道義典, "進化論に基づくニューラルネットワークの構造適応学習アルゴリズムの構成", 情報処理学会誌, Vol. 43, No. 8, pp. 2728-2738, 2002.

[6] S. B. Thrun et al. "The MONK's problems - a performance comparison of different learning algorithms", Technical report CMU-CS-91-197, Carnegie Mellon University, 1991.

#### 連絡先:

#### 市村匠

広島市立大学情報科学部知能情報システム工学科 〒731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1

Phone&Fax: 082-830-1690

E-mail: ichimura@its.hiroshima-cu.ac.jp

# 免疫型マルチエージェントニューラルネットワークによる 知識獲得手法の提案

A proposal of knowledge acquisition method by immune multi agent neural networks

大枝 真一

Shinichi Oeda

木更津工業高等専門学校情報工学科 Dept. of Information and Computer Eng'g Kisarazu National College of Technology

須賀万智

聖マリアンナ医科大学予防医学教室 Department of Preventive Medicine, St. Marianna University School of Medicine 市村 匠

Takumi Ichimura 広島市立大学情報科学部 Fac. of Information. Science., Hiroshima City Univ.

吉田勝美

聖マリアンナ医科大学予防医学教室 Department of Preventive Medicine, St. Marianna University School of Medicine

**Abstract:** Medical databases hold diagnostic information based on patient medical records. However, these medical records may not always hold enough information for standard learning algorithms. Sometimes contradictory cases may occur, in which the pattern of input signals is the same, but the pattern of output signals is starkly different. In this paper, we apply a learning method of the immune multi agent neural networks (IMANNs) to the medical disease databases. IMANNs have agents of the macrophages, B-cells, and T-cells. Each agent employs a different type of neural networks. Because their agents work cooperatively and competitively, IMANNs can classify training dataset into some subsets automatically, and successively each B-cell agent trains specially for the divided training subset. In order to verify the effectiveness of our proposed method, we tested the ICU(Intensive Care Unit) database as medical databases and reported techniques for extracting If-Then rules from the trained networks.

# 1. はじめに

我々は,免疫型マルチエージェントニューラ ルネットワークを提案した[1].また,その有効 性を検証するために、Monk's Problem[2]に適用し た結果,高い学習能力と分類能力があることが わかった[3].本研究では,免疫型マルチエージ ェントニューラルネットワークを用いて,医療 データベースに含まれる特徴を IF-THEN ルール として抽出する知識獲得手法を提案する、医療 データベースのデータはノイズや矛盾データを 含む場合が多く,既存の学習アルゴリズムでは 学習が困難であった.しかし,免疫型マルチエ ージェントニューラルネットワークでは、複数 のニューラルネットワークが協調動作しながら 学習を行うため、ノイズや矛盾データを含む医 療データベースに対しても,効果的な学習が行 われることが期待される.さらに,免疫型マル チエージェントニューラルネットワークでは, 訓練事例を部分集合に分割して学習を履行する ため,訓練事例の分類も可能となる.したがっ て、これら分類されたデータを解析することに より,データベースに内在するであろうルール を抽出できる可能性がある.また,T細胞ニュー ラルネットワークは,全訓練事例を分類するた めに学習を行うため,学習後の T 細胞ニューラ ルネットワークに全入力パタンを与えることに より,新しい規則の発見につながることも考え られるであろう.

ICU データベースからの生存死亡予測システムを構築し,ルール抽出を行う.

# 2. ICU データベースからの死亡生存予測 モデル構築

ICU データベースに対して免疫型マルチエージェントニューラルネットワークを適用し,死亡生存予測を行う推論システムを構築する.

#### 2.1 ICU データベース

実験に用いた ICU(Intensive Care Unit)データベ -スの詳細を述べる.2000年7月から2002年5 月の期間において,厚生労働科学研究参加34施 設から 27625 件の ICU 入室患者データを収集し た.このうち,年齢 16 歳以上, ICU 在室 48 時 間以上 1000 時間未満, 退院時転帰と予測死亡率 の情報が得られた 11796 件を対象とした. 退院 時転帰(生存,死亡)と予測死亡率(1~9,10 ~ 19, 20~ 29, 30~ 39, 40~ 49, 50~ 59, 60 以 上)のグループ毎にランダムに抽出して,70% (8257件)を学習用データベース,30%(3539 件)を検証用データベースとなっている.また, 学習用データベース,検証データベースは,ICU 入室から退院までの期間が0週目から2週間,0 週間から4週間,0週間から6週間,0週間から 8週間,0週間から10週間,0週間から12週間 の6グループに分けられている.これら6グル ープのうち D週間から2週間を扱うことにした. 学習用データベースおよび検証用データベース

において,この期間に該当するデータ数はそれぞれ7241件,686件となる.これらを訓練事例,テストデータとした.生存,死亡例の内訳は,訓練事例7241件のうち6569件が生存,672件が死亡となっている.同様に,テストデータ686件のうち402件が生存,284件が死亡となっている.

表 1 は ICU データベースの項目を示す.これらの項目のうち,連続値で与えられる年齢と予測死亡率は,カットオフ値を用いて変換した.

表 1 ICU データベースの項目

	1C 1 1C 7	7 · 7/0/5/H
性		男性, 女性
年齢		~ 44, 45 ~ 54, 55 ~ 64, 65 ~
		74, 75+
予測死亡?	率	1~9, 10~19, 20~29, 30
		~ 39 , 40 ~ 49 ,
		50 ~ 59 , 60+
手術	予定手術	なし,あり
	緊急手術	なし,あり
ICU 内	感性菌感染症	なし,あり
感染症	耐性菌感染症	なし,あり
人工呼吸	器	なし,あり
尿路カテーテル		なし,あり
中心静脈:	カテーテル	なし,あり

#### 2.2 計算機実験結果

免疫型マルチエージェントニューラルネット ワークによる計算機実験の結果について述べる. まず,マクロファージニューラルネットワーク の学習結果について述べる.マクロファージニ ューラルネットワークには,格子構造ニューラ ルネットワークを用いている[4]. 学習パラメタ として,入力層のニューロン20個,中間層のニ ューロン 15×15 個, 出力層のニューロン 1 個の ネットワーク構造を用いた.格子構造ニューロ ンの近傍領域の範囲rは,学習初期ではr=3と し,学習が進みにつれて近傍領域を小さくし, 学習終了時ではr=1となるように設定した.図 1 にマクロファージニューラルネットワークの 学習曲線を示す、学習中にニューロンの生成は 行われなかった . 1000 回までの学習で徐々に二 ューロンが消去され,最終的に中間層は 15×15 の格子状に61個のニューロンが存在する格子状 マップを獲得した.図2 に学習終了時の中間層 ニューロンの配置を示す.

次に、T細胞ニューラルネットワークによって、訓練事例を部分集合に分類する、T細胞ニューラルネットワークは入力層1、出力層は図2の格子状マップのニューロンで構成し、入力信号をどのニューロンに割り当てるか決定する。図2に示した格子状マップの二重丸が最大活性出力であるニューロンであり、そのようなニューロンが20個存在した。これにより、訓練事例は20

グループに分類される.

これらの分類された 20 グループに対して,それぞれ B 細胞ニューラルネットワークを割り当てる.B 細胞ニューラルネットワークにはダーウィン型ニューラルネットワークを用いた[5].1 グループの個体数を 30 個体と設定し,学習回数を 100 回とした.学習終了後,最も適合度の高かった個体を取り出し,そのグループの B 細胞ニューラルネットワークとする.その B 細胞ニューラルネットワークの学習曲線を図 3 に示す.

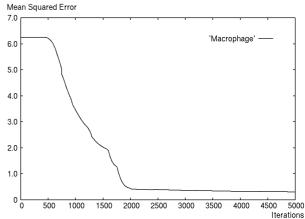


図 1 マクロファージニューラルネットワーク の学習曲線

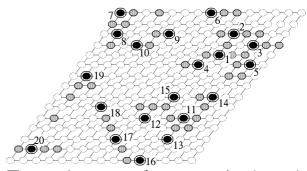


図 2 マクロファージニューラルネットワーク の中間層ニューロンの配置

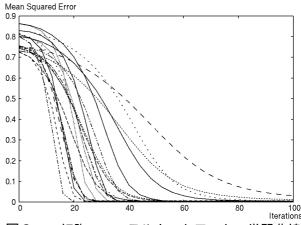


図 3 B 細胞ニューラルネットワークの学習曲線

学習終了後,マクロファージニューラルネットワーク,B細胞ニューラルネットワーク,T細胞ニューラルネットワークにデータを入力して,前向き計算を行う.このとき,システムの出力と教師信号との二乗誤差が0.1以下の場合,正答としてカウントした.訓練事例に対する正答率は96.9%(7013 / 7241)であった.このうち死亡事例に対する正答率は93.9%(631 / 672),生存事例に対する正答率は97.2%(6382 / 6569)であった.また,テストデータに対する正答率は90.4%(620 / 686)であった.このうち死亡事例に対する正答率は85.6%(243 / 284),生存事例に対する正答率は93.8%(377 / 402)であった.

## 3. ICU データベースからのルール抽出

我々は学習に用いた訓練事例の全空間の特徴を捉えた IF-THEN ルールの抽出を試みた.訓練事例 7241 件はマクロファージニューラルネットワークによって 20 グループに分類された.そして,20 個の B 細胞ニューラルネットワークが,それぞれ与えられたグループの訓練事例を学習する.このため,B 細胞ニューラルネットワークは全訓練事例の一部を学習していることになる.しかし,T 細胞ニューラルネットワークは、訓練事例をどのグループに分類するか決定している.そのため,T 細胞ニューラルネットワークには,訓練事例全体の特徴を捕らえた空間が形成されていると考えられる.我々はこの T 細胞ニューラルネットワークをもとにルール抽出を行う.

図 4 に示した分類された訓練事例から知識を 獲得する方法について述べる.

Step1) 分類された訓練事例の1個が,事例の 集合1グループを構成するとし,各グルー プから1個の事例を読む.

Step2) グループ内の訓練事例の総数 N のうち,入力ベクトルの成分i が発火している (たとえば,事例の区間が[0,1]であれば 1 とする)割合を  $P_i$  とする.

Step3) 閾値 c よりも大きい割合  $P_i$  をもつ成分 i に対し, $P_i$  の大きい順に成分を列挙した 前件部をもつ IF-THEN ルールを作成する.このとき,前件部をファジィ言語的真理値 として表する場合は, $P_i$ を表 2 の変換表を用いて表現する.

Step4) 作成された IF-THEN ルールの後件部は , 分類されたグループに対応するダーウィン型ニューラルネットワークに ,事例を与え ,前向き計算で得られる出力活性値をあてる .前件部と同じように ,後件部をファ

ジィ言語的真理値として表する場合は 出力活性値を表 2 の変換表を用いて表現する.

Step5) 閾値 c よりも大きい割合  $P_i$  を持つ成分から, すべての IF-THEN ルールを作成するまで, Step3 から Step4 を繰り返す.

**Step6**) すべてのグループが終了するまで, Step1 から Step5 までを繰り返す.

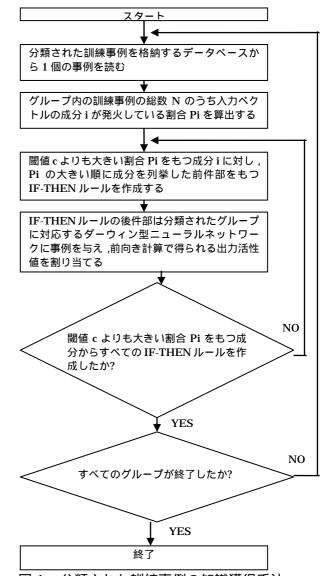


図4 分類された訓練事例の知識獲得手法

表 2 ファジィ言語的真理値への変換表

言語的真理値	数值的真理值
Very True	$0.925 < x \le 1.000$
True	$0.775 < x \le 0.925$
Rather True	$0.600 < x \le 0.775$
Unknown	$0.400 < x \le 0.600$
Rather False	$0.225 < x \le 0.400$
False	$0.075 < x \le 0.225$
Very False	$0.000 < x \le 0.075$

Group7)
,耐性菌感
Group1)
Group1)
Group1 ) //ery True,

ここで得られた IF-THEN ルールを医療従事者に,医学的見地から意見を述べてもらった.表3に示した Group7 に関する IF-THEN ルール No.1~3 は納得できるということであった.実際に,耐性菌感染症や緊急手術を行った患者の死亡率は高く,これらの項目は他の項目に比べて,患者死亡に与える影響が大きいということであった.

THEN Dead is Very True.

(存在割合 76.1%)

No. 3

次に,表4に示した Group1 に関する IF-THEN ルールを評価してもらった.すべての IF-THEN ルールは納得できるということであった.しかし,これらの IF-THEN ルールは当たり前のものであり,これらの IF-THEN ルールから積極的にその患者が死亡するとは言い難いということである.なぜなら,死亡率の高い患者は,そのほとんどが中心静脈カテーテル,人工呼吸器,尿路カテーテルの項目に該当しており,これらの組合せからなる IF-THEN ルールは至極当然だということであった.また,前件部がひとつかなる IF-THEN ルールも,これだけでは判断しかねるとのことであった.ただし,前件部が複数からなるルールについては,納得できるということであった.

我々が行った手法では,全入力パタンを与えてIF-THEN ルールを抽出するため,不要だと思われるルールをも抽出していた.しかしながら,医療従事者でない我々であっても,医療データ

からのルールを抽出できる点は有用であるといえるであろう.また,医療従事者であっても膨大なレコード数からなるデータベースから,漏れなくルールを抽出することは困難である.しかしながら,逆に我々の行った方法ではすべてのルールを抽出することが可能である.このようにして得られたルールから専門家が取捨選択することによって必要なルールに絞る方法が有効であると考えられる.

#### 6. まとめ

本研究では、ICU データベースを実験対象とし、免疫型マルチエージェントニューラルネットワークを用いて死亡生存予測モデルを構築した。その結果、正答率の高い推論結果を得るととができた。また、訓練事例をいくつかのグループに分類することが可能であり、これらのグループから IF-THEN ルールを抽出できた。これらの結果により、我々が提案する免疫型マルチエージェントニューラルネットワークは正答率の高い推論結果を得るとともに、知識獲得が可能であることが示された。

# 参考文献

[1] T. Ichimura, S. Oeda, M. Suka, K. J. Mackin and K. Yoshida, "Adaptive Learning Methods of Reflective NN and Immune Multi-agent NN", In "Knowledge Based Intelligent System for Health Care.", T. Ichimura and K. Yoshida Eds., Advanced Knowledge International (to appear 2004).

[2] S. B. Thrun et al. "The MONK's problems · a performance comparison of different learning algorithms", Technical report CMU-CS-91-197, Carnegie Mellon University, 1991.

[3] 大枝真一, 市村匠, "免疫型マルチエージェントニューラルネットワークの構成", ファジィシステムシンポジウム(FSS2004)(to appear 2004). [4] 市村匠, 大枝真一, 山下利之, 田崎栄一郎, "格子構造ニューラルネットワークの学習法の提案", 日本ファジィ学会誌 Vol. 14, No. 1, pp. 28-42, 2002. [5] 大枝真一, 市村匠, 寺内睦博, 高濱徹行, 磯道義典, "進化論に基づくニューラルネットワークの構造適応学習アルゴリズムの構成", 情報処理学会誌, Vol. 43, No. 8, pp. 2728-2738, 2002.

#### 連絡先:

市村匠

広島市立大学情報科学部知能情報システム工学科 〒731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1

Phone&Fax: 082-830-1690

E-mail: ichimura@its.hiroshima-cu.ac.jp

# 距離と方向が実数値の環境下における マルチエージェントの強化学習について

Reinforcement Learning of Multi-Agents
by a View in Real Number Distance and Direction

馬野 元秀 上森 規央 山村 忠義 瀬田 和久 Motohide Umano Norio Uemori Tadayoshi Yamamura Kazuhisa Seta

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
Department of Mathematics and Information Sciences
College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

Abstract A pursuit game is a multi-agent's benchmark problem. This is a problem that blue agents pursue and capture a red agent on a grid. In the previous research, we proposed a staged view from which input information differs, and showed that multi-agent learn effectively in such a situation. We have a plan to extend this problem to real number distance and direction. In this reserch, we don't use a staged view but an exact view, where blue agents know information of distance and direction clearly. Each agents's learning algorithm are based on Q-learning, where state in Q-table are represented by fuzzy set to discretize distance and direction.

#### 1. はじめに

マルチエージェントの標準問題に追跡問題がある。前回、我々はこの問題において距離と方向に応じて見え方が変わり、段階的に得られる情報が異なる視覚を提案した[1]。現在、我々はこの問題の設定を距離と方向が実数値になる環境に拡張することを考えている。

本研究では、その第一段階として段階的な視覚は用いないが、実数値の環境を考えることにした。各エージェントの学習アルゴリズムは Q-learning を基にして、距離と方向にファジィ集合を用いることで状態を離散化し、これにより 1 回の行動で複数の状態行動対の Q 値を同時に更新できる手法を用いる。

# 2. 環境とエージェントの設定

# (1) 実数値の追跡問題

縦と横の大きさが b の実数値空間上に、1 つの赤エージェントと 4 つの青エージェントがいる。青エージェントの目標は図 1 のように赤エージェントを囲むことである。空間の端は壁があって、そ

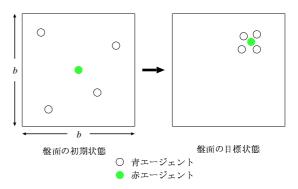


図 1: 実数値の追跡問題

れ以上進めない場合と、逆の側とつながっているトーラス状の場合とを考えることができる。赤エージェントは1 ターンに1 回、0 以上  $l_1$  以下のランダムな実数値距離を青エージェントとぶつからない方向ヘランダムに移動する。各青エージェントは1 ターンに1 回 Q-table に基づいて移動する位置を決定する。このとき方向は0 から $2\pi$ 、距離は0 以上  $l_2$  以下の実数値距離の範囲である。

#### (2) 青エージェントの大きさ

図 2 のように全てのエージェントは半径  $r_1$  の円形の大きさを持ち、各青エージェントは円の中心か

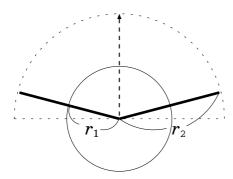


図 2: 青エージェントの手の範囲

ら長さ $r_2$ の手を2本ずつ持つ。また、各青エージェントは向きを持ち、手は正面方向から左右に $\frac{\pi}{2}$ ずつ半円の範囲を動かすことができる。したがって、半径 $r_1$ の円内に2つのエージェントが存在することができないし、赤エージェントは半径 $r_2$ の破線の半円内に入らないように移動することになる。

## (3)盤面の目標状態

4つの青エージェントが手をつなげる範囲内に 赤エージェントがいる盤面の状態を目標状態と見 なす(図3)。ターンの最後に盤面が目標状態であ るかどうかを判定し、目標状態であれば各青エー ジェントに成功報酬が与えられゲームを終了する。 目標状態でなければ失敗報酬が与えられ、ゲーム を続行する。

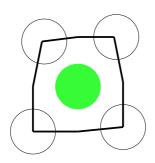


図 3: 盤面の目標状態

## (4) 青エージェントの視覚範囲

図4のように各青エージェントは自分の正面方向から左右に $\frac{\pi}{2}$ ずつ半円の方向で距離0以上 $r_3$ 以下の範囲を見ることができる。この範囲に他のエージェントがいるとき、青エージェントは正面方向から見た座標 (相対座標) の情報として、エージェントがいる距離d ( $0 \le d \le r_3$ ) と方向 $\theta$  ( $-\frac{\pi}{2} \le \theta \le \frac{\pi}{2}$ )を知ることができる。

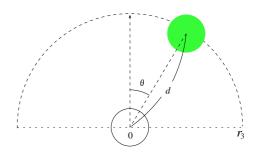


図 4: 青エージェントの視覚の範囲

# 3. 青エージェントの学習

青エージェントは環境から得られる情報 (視覚から得られた他のエージェントとの距離と方向および報酬) により、Q-learning を基にした方法で学習を行う。

#### (1) 状態集合

ここでは視覚から得られる情報のうちで、赤エージェントの方向と距離だけを考えることにする。これらの値は実数値なので、そのまま状態にすることはできない。そこで、文献[2]で用いられているのと同じ考え方で、状態をファジィ集合により離散化する。

〇距離 d に関するファジィ集合  $F_i$  (図 5)

近傍 :  $F_1 = \{Z(d; 0, \frac{r_3}{2})/d : d \in [0, r_3]\}$ 

近距離:  $F_2 = \{pi(d; 0, \frac{r_3}{2}, \frac{r_3}{2}, r_3)/d : d \in [0, r_3]\}$ 中距離:  $F_3 = \{S(d; \frac{r_3}{2}, r_3)/d : d \in [0, r_3]\}$ 

今回はファジィ集合に標準関数 Z、pi、S を用いた。Z、pi、S は実値の上で定義される標準関数で2次曲線により定義されている。

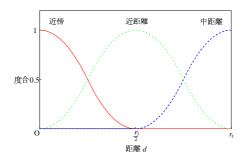


図 5: 距離に関するファジィ集合

〇方向 $\theta$ に関するファジィ集合 $G_i$ (図 6)

左:  $G_1 = \{Z(\theta; -\frac{\pi}{2}, 0)/\theta : \theta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]\}$ 

前: $G_2 = \{pi(\theta; -\frac{\pi}{2}, 0, 0, \frac{\pi}{2})/\theta: \theta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]\}$ 

 $\pi: G_3 = \{S(\theta; 0, \frac{\pi}{2})/\theta : \theta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]\}$ 

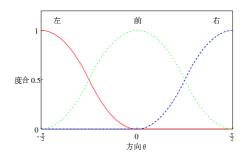


図 6: 方向に関するファジィ集合

状態集合 S は距離に関するファジィ集合  $F_i$  と方向に関するファジィ集合  $G_j$  の組み合わせに、赤エージェントの位置が不明である状態を加えて 10 個の状態とする。次のように各状態を  $s_{ij}$  で表し、不明な状態を  $s_{00}$  とする。

 $S = \{s_{00}$ :不明 (遠距離または背後にいる状態), $s_{11}$ :近傍左, $s_{21}$ :近距離左, $s_{31}$ :中距離左, $s_{12}$ :近傍前, $s_{22}$ :近距離前, $s_{32}$ :中距離前, $s_{13}$ :近傍右, $s_{23}$ :近距離右, $s_{33}$ :中距離右  $\}$ 

これを図で表すと図7のようになる。

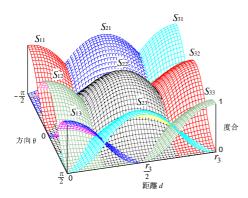


図 7: 青エージェントの状態

#### (2) 行動集合

行動は前後左右にそれぞれ距離  $l_2$  進むように構成し、それらをすべて方向ベクトルで表す。行動集合 A は次のようになる。

$$A = \{ (0, l_2), (0, -l_2), (-l_2, 0), (l_2, 0) \}$$

#### (3)Q-table

青エージェントは 10 個の状態と 4 個の行動の組み合わせにより、計 40 個の Q 値からなる Q-table を構成する (表 1)。この Q-table を基に青エージェントは学習し、移動する位置を決定して行動を行う。

	状態			行動		
距離 d	方向 θ	$s_{ij}$	(0,1)	(0,-1)	(-1,0)	(1,0)
不明	不明	$s_{00}$	• • •	•••	•••	•••
	左	$s_{11}$	• • •	•	•	•••
近傍	前	$s_{12}$	• • •	•••	•••	•••
	右	$s_{13}$	• • •	•••	•••	•••
	左	$s_{21}$	• • •	•	•	•••
近距離	前	$s_{22}$	• • •	•	•••	•••
	右	$s_{23}$	• • •	•••	•••	•••
	左	$s_{31}$	• • •	•••	•••	•••
中距離	前	$s_{32}$	• • •	•••	•••	•••
	右	$s_{33}$	•••	•••	•••	•••

表 1: Q-table

# (4) 移動と Q 値の更新

青エージェントの移動は Q-table を基にして、赤エージェントがいる距離 d と方向  $\theta$  によって次のように決定される。

# $\bigcirc 0 \le d \le r_3$ かつ $-\frac{\pi}{2} \le \theta \le \frac{\pi}{2}$ のとき

これは青エージェントが赤エージェントのいる 距離 d と方向  $\theta$  を知っているときである。このと き青エージェントは、まず最初に全ての状態  $s_{ij}$  と の一致度  $w_{ij}$  を考える。

$$w_{ij} = \mu_{F_i}(d) \cdot \mu_{G_i}(\theta) \tag{1}$$

次に、全ての状態  $s_{ij}$  において  $Q(s_{ij},a_k)$  から行動  $a_{k_{ij}}$  を求める。そして、行動  $a_{k_{ij}}$  に対する状態  $s_{ij}$  との一致度による重み付きの平均 a を求める。

$$a = \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=1}^{3} w_{s_{ij}} \cdot a_{kij}$$
 (2)

すなわちaは一致度を考慮した行動を表している。 行動  $a_{k_{ij}}$  は方向ベクトルなのでaも方向ベクトル であり、青エージェントはこれに従って移動する。 移動後は、移行した状態 s' が盤面の目標状態なら ば報酬 r を成功報酬  $r_s$  とし、そうでなければ失敗 報酬  $r_f$  とする。各状態の重み  $w_{ij}$  に応じて報酬 rを分配する。状態  $s_{ij}$  における報酬  $r_{ij}$  は次の式 (3) のようになる。

$$r_{ij} = w_{ij} \cdot r \tag{3}$$

これと次の Q-learning の更新式 (4) に適用して、全ての状態  $s_{ij}$  の Q 値を更新する。

$$Q(s,a) \leftarrow (1-\alpha)Q(s,a) + \alpha[r + \gamma \max_{a'} Q(s',a')] \quad (4)$$

ここで  $\alpha$  は学習率、 $\gamma$  は割引率を表す。以上の操作により、1 回の行動で複数の Q 値を更新することができる。

# $0 \le d \le r_3$ かつ $-\frac{\pi}{2} \le \theta \le \frac{\pi}{2}$ , 以外のとき

これを青エージェントの視覚範囲外に赤エージェントがいるときなので、不明な状態  $s_{00}$  である。このとき、青エージェントは  $Q(s_{00},a_k)$  から行動  $a_k$  を求め、そこに移動する。移動後は式 (4) により Q 値を更新する。

# (5) 行動の選択

今回は学習に幅を持たせるため  $\epsilon$  グリーディ手法を用い、Q 値を最大としない行動 a も  $\epsilon$  の確率で選択させる。また Q 値を最大とする行動が複数ある場合、その中からランダムに 1 つ選択する。各青エージェントは移動するときにその方向を向く。

#### (6) 実験

縦と横が大きさbの実数値空間上に、1つの赤エージェントと4つの青エージェントをランダムに初期配置する。1 ターンでは各青エージェントが赤エージェントの情報を基に移動位置を決定した後、赤エージェントから順に各エージェントが移動し、移動した状態に応じて報酬が与えられ各青エージェントが学習する。盤面が目標状態になったら成功として終了する。局所的な学習に陥らないようにターン数t になったら失敗として終了する。初期配置から終了までを1 ゲームとする。現在シミュレーション用のプログラムを作成中である。

#### 4. まとめ

本研究では追跡問題を実数値化し、ファジィ集合を用いた状態の構成と、それを利用した Q-table の更新法について述べた。今後シミュレーションを行い、さらに人間の持つ視覚に近いものとして、段階的視覚や連続的に見え方が変わっていく視覚とその場合の学習法について考えていく。

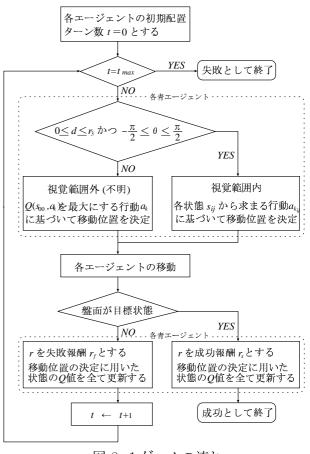


図 8: 1 ゲームの流れ

# 参考文献

- [1] 山村, 馬野, 宇野, 瀬田, 岡田: 「段階的な視界をもつマルチエージェントにおける強化学習について (その2)」, 第19回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.307-310 (2003)
- [2] 中島智晴, 有働昌代, 石渕久生: 「ファジィQ学 習によるサッカーエージェントの行動獲得」, 日 本知能情報ファジィ学会, 知能と情報, Vol.15, No.6, pp.98–103 (2003)
- [3] R. S. Sutton and A. G. Barto: Reinforcement Learning: An Introduction, MIT Press (1998) 三上貞芳, 皆川雅章 (共訳): 強化学習, 森北出版 (2000)

# [問い合わせ先]

〒599-8531 堺市学園町 1 - 1 大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科 馬野 元秀

TEL: 072–254–9675 FAX: 072–254–9930

Internet: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

# ファジィ関係補間型ファジィ推論法による上水道需要量予測モデル

Water demand prediction model by interpolated fuzzy relation type fuzzy reasoning method

島川 学 Manabu Shimakawa 村 上 周 太 Shuta Murakami

熊本電波高専

九州工業大学

Kumamoto National College of Technology

Kyushu Institute of Technology

**Abstract:** In this paper, we introduce a fuzzy prediction model for water demand prediction of a waterworks. The fuzzy prediction model employs an interpolative fuzzy reasoning method previously proposed by the authors. The fuzzy prediction model generates a fuzzy set consisting of a simple shape, which expresses both the representative value and the support interval of a predicted water demand. Because the fuzzy set's membership function has a simple shape, the waterworks operator is able to quantitatively interpret the predicted water demand quite easily, and can generate an appropriate plan for maintaining a stable water supply. This paper evaluates the effectiveness of the proposed method using actual waterworks data.

# 1.はじめに

上水道システムでは,安定したシステム運用のために,需要量予測,取水可能量推定,浄化能力などを考慮して取水計画を立てる必要がある.特に,需要量を予測することは,安定した運用を行う上で重要視されており,これまでにも回帰分析やカルマンフィルタなどを用いた研究がされている<sup>[1,2]</sup>.また,カオス理論を用いた需要量予測手法も提案されている<sup>[3,4]</sup>.

需要量は,天候や気温,曜日(平日・休日)などによって多様に変化する.また,前日からの天候の変化や曜日の変化にも影響を受ける.予測する日の天候や気温など不確定な項目に左右されるので,需要量を正確に予測することは困難である.このような曖昧さを含むシステムのモデル化を考えた場合,モデルの出力が単に実数値であるより,予測値の取り得る範囲をファジィ集合によって理解しやすく表現されることの利点は大きい.

そこで,本研究では,需要量の予測値がファジィ集合によって表現できるファジィ予測モデルを取り扱う.この予測値はオペレータが容易に理解する必要があるために,次の2つの事項を満たすようなファジィ推論法が必要とされる.

- (1) 推論結果を表すファジィ集合を特性付ける メンバーシップ関数の形状が複雑でなく,意 味の解釈が容易である.
- (2) 与えられる入力が曖昧になれば,それによって得られる推論結果も曖昧になる.

著者らは,これら2つの事項を満たすファジィ

推論法を提案している<sup>[5,6]</sup>.このファジィ推論法を「ファジィ関係補間型ファジィ推論法」または単に「補間型ファジィ推論法」と呼ぶ.

本稿では,この補間型ファジィ推論法を用いて,需要量を予測するファジィ予測モデルを構築する.さらに,補間型ファジィ推論法を線形式によって拡張し,モデリング精度の向上を図る.最後に実際の上水道システムにおいて観測されたデータを用いてファジィモデリングを行った結果を示し,提案手法の有効性を示す.

#### 2.上水道システム

本研究では、北九州市本城上水道システムを対象とし、北九州市水道局から提供して頂いたデータをもとにファジィモデリングを行う、この上水道システムは、2つの取水場、1つの浄水場、6つの配水池によって構成される、1日当たり 141,000[m³]の処理能力を有する、取水場は河川または貯水池から取水し、浄水場において浄化処理が施される、その後、分散した配水池に送水される、上水は、各配水地において一時的に貯蓄され、需要家からの要求に応じて供給される。

需要家の日々の需要量を直接観測することは 困難なため、その代わりとして各配水池からの 配水量を利用する.各配水池で観測されるデー 夕を表1に示す.提供して頂いた観測データは、 1996年9月から1999年8月までの3年分である. これらの観測データをモデル構築用とモデル検 証用に分割する.30ヶ月分の観測データをモデ ル構築ために使用し、残り6ヶ月分の観測デー タを用いてモデルの検証を行う.

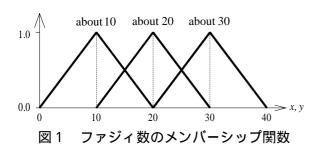
表1 観測データ

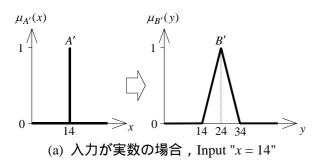
項目	内 容
D(k)	曜日 (1:平日,0:休日)
W(k)	天候 (2:晴,1:曇,0:雨)
T(k)	気温[]
H(k)	湿度 [%]
R(k)	雨量 [mm]
S(k)	配水量(需要量) [m³]

# 3.ファジィ関係補間型ファジィ推論法

著者らが提案している補間型ファジィ推論法についての詳細は割愛する.ここでは,次に示す1入力1出力の2つのファジィルールを用いて,その特徴を示す.

 $R_1$ : IF x is "about 10" THEN y is "about 20"  $R_2$ : IF x is "about 20" THEN y is "about 30" ここで, "about 10", "about 20", "about 30"はファジィ数であり,図1のように定義する.





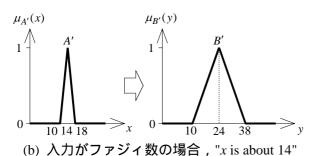


図 2 補間型ファジィ推論法による推論結果

図2は,入力として実数値"x=14"を与えた場合とファジィ数"x is about 14"を与えた場合の推論結果を示している. どちらの推論結果とも三角型メンバーシップ関数で表されており, 結果の解釈がしやすい. また,入力が曖昧になると推論結果も曖昧になっている.

#### 4.ファジィ予測モデル

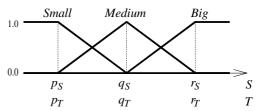
需要量を予測するファジィ予測モデルとして,補間型ファジィ推論法を用いたモデル(モデル1)と,線形式で拡張した(モデル2)を構築し,その比較を行う.

#### 4.1 モデル1

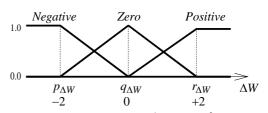
モデル1は,補間型ファジィ推論法を用いたファジィ予測モデルであり,以下に示すファジィルールによって構成される.

IF 
$$S(k-1)$$
 is  $A_{i1}$ ,  $\Delta W(k)$  is  $A_{i2}$ ,  $T(k)$  is  $A_{i3}$   
THEN  $\Delta S(k)$  is  $B_i$   $(i = 1,..., 27)$  (1)

ここで,S(k-1) は前日の配水量, $\Delta W(k)$  は前日からの天候の変化,T(k) は当日の気温, $\Delta S(k)$  は当日の配水量の前日からの変化分である.また, $A_{i^*}$  は前件部ファジィ集合, $B_i$  は後件部ファジィ集合である.前件部には,配水量 S(k) と相関の高い3つの変数 S(k-1), $\Delta W(k)$ ,T(k) を採用した.



(a) S(k-1) とT(k) のメンバーシップ関数



(b) Δ*W*(*k*) のメンバーシップ関数 図 3 前件部変数のファジィ分割

各前件部変数は,図 3 に示すように,それぞれ 3 つにファジィ分割する.メンバーシップ関数の形状は,パラメータ  $p_*,q_*,r_*$  によって定義される.このファジィ予測モデルは,前件部に 9

個のパラメータ,後件部に27個のパラメータを持つ.これらのパラメータは,遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて調整する.その手順を以下に示す.

Step 1: 前日からの天候の変化を表す変数  $\Delta W(k)$  は離散値である.そこで,パラメータ  $p_{\Delta W}$ ,  $q_{\Delta W}$ ,  $r_{\Delta W}$  は,それぞれ -2, 0, +2 に設定し,固定とする.その他の前件部変数 S(k-1) とT(k) のためのパラメータ  $p_*$ ,  $q_*$ ,  $r_*$  を遺伝子としてコード化する.したがって,1 つの個体は,ファジィ予測モデルの前件部を表す6つの遺伝子から構成される.

Step 2: 後件部ファジィ集合を図 4 に示す三角型メンバーシップ関数で定義する.調整すべきパラメータは,位置パラメータ $p_{i1}$ ,  $p_{i2}$ と,それぞれの高さパラメータ $h_{i1}$ ,  $h_{i2}$ である.この高さパラメータは, $h_{i1}=1.0$ ,  $h_{i2}=0.0$ に固定とする.ここでは,中心位置を表す $p_{i1}$ を調整する.このパラメータは,前件部のパラメータの値が求められた後に決定されなければならない.そこで,前件部のパラメータを表している個体ごとに,重み付き最小二乗法を用いて求める.

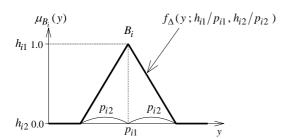


図4 三角型メンバーシップ関数とパラメータ

Step 3: GA は ,次の評価関数を用いて各個体が表すファジィ予測モデルを評価する.

$$Eval_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \frac{\left| S(k) - \hat{S}(k) \right|}{S(k)} \times 100$$
 (2)

ここで, $\hat{S}(k)$ ( $= S(k-1) + \hat{p}_1(k)$ )は配水量の予測値 N はデータ数である .この評価値  $Eval_1$  は観測データに対するモデリング誤差を表す指標となる.

 $\underline{\text{Step 4:}}$  続いて,後件部ファジィ集合  $B_i$  の拡がり を表すパラメータである  $p_{i2}$  を調整する.各フ

ァジィルールの後件部パラメータ  $p_{i2}$  を遺伝子としてコード化する. したがって, 1 つの個体は 27 個の遺伝子を持つ.

 $\underline{\text{Step 5:}}$  GA は,次の評価関数  $\underline{\text{Eval}}_2$  を用いて,各個体が表すファジィ予測モデルを評価する.

$$Eval_{2} = \varepsilon_{width} + \beta \cdot \varepsilon_{penalty}$$

$$\varepsilon_{width} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \hat{p}_{2}(k)$$

$$\varepsilon_{penalty} = \frac{1}{N_{out}} \sum_{k=1}^{N} \varepsilon_{out}(k)$$

$$\varepsilon_{out}(k) = \begin{cases} S(k) - \hat{S}_{max}(k) & \hat{S}_{max}(k) < S(k) \\ \hat{S}_{min}(k) - S(k) & S(k) < \hat{S}_{min}(k) \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

$$\hat{S}_{max}(k) = \hat{p}_{1}(k) + \hat{p}_{2}(k)$$

$$\hat{S}_{min}(k) = \hat{p}_{1}(k) - \hat{p}_{2}(k)$$

 $\hat{p}_1(k)$  と  $\hat{p}_2(k)$  が,モデル出力のファジィ集合  $\Delta \hat{S}(k)$  を表す.この評価関数  $Eval_2$  は,配水量の予測値を表すメンバーシップ関数の拡がりを評価するものであり,実測値がそのメンバーシップ関数のサポート区間内に含まれているかどうかを表す指標となる.評価関数  $Eval_2$  は,値が小さいほど評価は良いことを意味する. $N_{out}$  は,実測値がサポート区間 $[\hat{S}_{min},\hat{S}_{max}]$ の外にあるデータの個数を表す.実測値が予測値を表すメンバーシップ関数のサポート区間の外にあるとき,ペナルティが評価関数  $Eval_2$  に加えられる. $\beta$  はペナルティに加える重み係数であり, $\beta=1000$  とした.

# 4.2 モデル2

補間型ファジィ推論法では,後件部ファジィ集合  $B_i$  のパラメータを定数でなく,線形式で定義することもできる.モデル 2 は,後件部ファジィ集合の中心位置を表すパラメータ  $p_{i1}$  を次に示す線形式で定義したものである.

$$p_{i1}(\mathbf{x}) = a_{i0} + \sum_{j=1}^{9} a_{ij} x_j$$
 (5)

ここで $a_{i*}$  は係数であり, $x_j$  は以下のように定義された説明変数である.

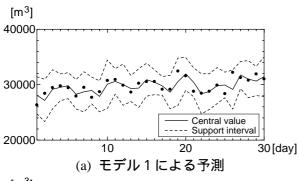
$$\begin{split} x_1 &= D(k) & x_2 &= \Delta D(k) \\ x_3 &= \begin{cases} 1 & W(k) = 2 & \text{; iff} \\ 0 & W(k) \neq 2 \end{cases} \\ x_4 &= \begin{cases} 1 & W(k) = 1 & \text{; iff} \\ 0 & W(k) \neq 1 \end{cases} \\ x_5 &= \begin{cases} 1 & W(k) = 0 & \text{; iff} \\ 0 & W(k) \neq 0 \end{cases} \\ x_6 &= \Delta W(k) & x_7 &= T(k) \\ x_8 &= \Delta T(k) & x_9 &= S(k-1) \end{split}$$

前件部および後件部のパラメータ調整の手順は モデル 1 の場合と同じである. ただし Step 2 に おいて,線形式の係数  $a_{ij}$  (i=1,...,27, j=1,...,9) を 重み付き最小二乗法により調整する.

## 5. 結果と考察

最初に、6ヶ所ある配水池の中から日峰配水池を選択し、ファジィモデリングを行った、図5は、日峰配水池における1998年4月の予測結果を示している。モデル1による予測値は、観測データの傾向を上手く表しており、ファジィ集合のサポート区間によってその誤差の範囲を表していることが分かる。しかし、サポート区間が拡がっており、的確さに欠けている。

線形式で拡張したモデル2の場合,予測の精度が向上し誤差が小さくなっている.また,サポート区間が狭くなっており,予測値を絞り込むことができている.



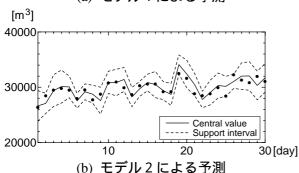


図 5 ファジィ予測モデルによる予測結果 (日峰配水池,1998年4月)

# 6. おわりに

著者らが提案した補間型ファジィ推論法を, 上水道システムにおける需要量予測のためのファジィ予測モデルに適用した.このファジィ推 論法の第一の特徴は「推論結果がシンプルな形 状のメンバーシップ関数によって得られる」と いうことである.このことは,上水道システム のオペレータが需要量の予測結果を表すメンバーシップ関数を視覚的に簡単に理解することが でき,より安定したシステム運用のための意思 決定のための手助けとして有用である.

ファジィモデリングの結果から,モデル1により需要量をファジィ集合によって予測することができることが示された.さらに線形式によって拡張したモデル2によって,予測精度を向上させ,絞り込んだファジィ集合によって需要量を予測できることを明らかにした.

今後の課題として,このファジィ予測モデルを実際の上水道システムに導入し,オペレータにとって効果的に機能するかどうかを評価する必要がある.

# 参考文献

- [1] 村上,前田:上水道システムにおける一日配水量推定,九州工業大学研究報告(工学), No.30, pp.65-70 (1975)
- [2] 村上,朴,他:北九州市の上水道系の水需要予測, 九州工業大学研究報告(工学), No.47, pp.49-59 (1983)
- [3] 五百旗頭,木村,他:決定論的非線形短期予測手法 の上水道需要量データへの応用,電気学会論文集D, Vol.114-D, No.4, pp.409-414 (1994)
- [4] 大島, 小須田: カオス需要予測を用いた配水池運用 (耐事故性と省エネルギーの両立), 環境システム計 測制御学会誌, Vol.1, No.1, pp.82-85 (1996)
- [5] M. Shimakawa, S. Murakami: Proposal of an interpolative fuzzy inference method, *Int. J. General Systems*, Vol.29, No.4, pp.585-604 (2000)
- [6] M. Shimakawa, S. Murakami: Fuzzy prediction model for water demand prediction using an interpolative fuzzy reasoning method, *Int. J. Systems Science*, Vol.34, No.14-15, pp.775-785 (2003)

# 連絡先:

# 島川学

熊本電波工業高等専門学校 情報工学科

〒861-1102 熊本県菊池郡西合志町須屋 2659-2

Phone: 096-242-2121 (代表) E-mail: shima@cs.knct.ac.jp

# ファジィ推論に基づく気象データによる需要予測

A Demand Forecast by Meteorological Data based on the Fuzzy Reasoning

中村 俊輔 Shunsuke Nakamura 西本 正博 Masahiro Nishimoto 古殿 幸雄 Yukio Kodono

大阪国際大学大学院 Graduate School of Osaka International University (株)ソフトウェアエンジニアリング Software Engineering Corp. 大阪国際大学 Osaka International University

**Abstract:** A consumer behavior model is proposed to explain the action by which consumers buy commodities and services. In this model, purchase of goods by the consumer is stimulated by marketing, advertisement, etc. However it is reported that consumer behavior is also influenced by meteorological factors. In this paper, we propose a demand-forecasting model by meteorological data based on the fuzzy reasoning.

# 1.まえがき

#### 2.データ調査

本研究では、消費者の需要予測モデルとして、ファジィ推論モデルを考えている。このファジィ推論では、おおまかな分類をする事により、基本的なルールを作成し、このルールから、実際のデータがおおまかな分類データに完全に合致しなくとも、推論が可能で、推論結果から非ファジィ化により結論を導く事が出来る。例えば、気温が高い日は、来客数が伸びるとか、気温が低い日は、来客数が下がるなどの傾向が見つかれば、次のようなファジイ推論ルールを作成する事が出来る。

ルール 1 : IF 気温は高い THEN 来客数は伸びる ルール 2 : IF 気温は低い THEN 来客数は下がる

etc

そして、実際の気温として、27.5 などのデータが入力され、ルール1とルール2の適合度から、

#### 来客数に関する出力を推論する。

そこで、1日の来客数とその日の気象データを調査する事にした。この時得られたデータの一部を表1,2に示す。

表 1 2001 年 5 月の営業管理データ

日付	曜日	売上高	来客数	客単価
1	特別火	23962	87	275
2	特別水	42067	77	546
3	祝木	58860	135	436
4	祝金	34722	111	313
5	祝土	54400	126	432
6	Ш	26923	117	230
7	月	196550	314	626

表 2 2001 年 5 月の気象データ

		/ -	U		
		平均	最高	最低気	
日付	曜日	気温	気温	温	日照時間
	特別				
1	火	18	24.6	13.1	2.1
	特別				
2	水	14.7	16.3	12.6	0
3	祝木	15	18	12.2	0.6
4	祝金	16.6	22.2	10.8	6.7
5	祝土	17.3	22.2	11.8	0.3
6	Ш	19.6	25	15.9	2.6
7	月	20.5	25.7	15.5	5.2

#### 3.分散分析

分散分析は、すべてのデータ変動(平方和)を、 偶然原因による誤差変動(残差平方和)の部分に 分解する事で、統計的な判定を下す手法である。 ここでは、分散分析によって、日々の来客数に影 響を与える要因について検討する。

表 1 のデータから、日や曜日によって売上高や 来客数に差があるのは、平日、土曜日、日曜日、 祝日、特別営業日で営業時間が異なるためである。 また、今回調査したフィットネスクラブでは、会 員費を毎月末にカード決済によって支払われるた め、毎日の実際の売上高が不明なので、本研究で は、平日の来客数を対象とすることにした。

そして、表 2 のデータからは、最高気温、平均気温、気温差(最高気温 最低気温) 日照時間のデータを取り上げる。これは、これらのデータに関する情報が比較的容易に入手する事が出来るため、これらのデータからモデルが構築されれば、予測を容易に行う事が出来ると考えたからである。

#### 4.分散分析結果

表 2 のデータより、平日の最高気温は、20.6~28.4 であった。これより、20~24 未満、24~27 未満、27 以上の3水準で分析を試みる。3水準に分けたのは、最高気温を低い、中位、高いと想定したからである。この時の結果が表3である。

表3 最高気温の分散分析

	自					
要	由			分散	F(0.0	F(0.
因	度	変動	分散	比	5)	01)
回			3569.9	5.15	3.591	
帰	2	7139.9	7	9	5	6.11
残		11763.				
差	17	9	691.99			
合		18903.				
計	19	8				

表3は分散比が有意水準1%で高度に有意ではなかったが、有意水準5%では有意であった。したがって、来客数は、1日の最高気温で、差があると考えられる。

次に、表2のデータから平均気温を検討してみる。データより平日の平均気温は、17.9~22.4であった。これより、17~20未満、20~21.6未満、21.6以上の3水準で分析を試みる。3水準に分けたのは、平均気温を低い、中位、高いと想定したからである。この時の結果は、分散比がF値よりも大きく、特に有意水準が1%でも有意である事から、高度に有意であった。したがって、来客数は、1日の平均気温で、差があると考えられる。

次に、1日の気温の変化を考えれば、それは、最高気温と最低気温の差によって表すことが出来ると考え、この気温差が大きい場合と小さい場合で来客数に変化が見られないだろうか。そこで表2のデータより1ヶ月間の気温差は、3.1~15 であった。これより、3~7 未満、7~12 未満、12以上の3水準で分散分析を試みる。3水準に分けたのは、気温差を低い、中位、高いと想定したから

である。この時の結果は、分散比が F 値よりも大きく、特に有意水準 1%でも有意であった事から、高度に有意であった。したがって、来客数は、1日の気温差で、差があると考えられる。

最後に、日照時間を検討してみる。1ヶ月間の日照時間は、0~11.4時間であった。これより、0~3時間未満、3~6時間未満、6時間以上の3水準で分散分析を試みる。3水準に分けたのは、日照時間を短い、中位、長いと想定したからである。この時の結果は分散比が F値よりも大きく、特に有意水準1%でも有意であった事から、高度に有意であった。したがって、来客数は、1日の日照時間で、差があると考えられる。

#### 5. 需要予測ファジイ推論モデル

以上の事より、次のようなファジイ推論モデル を構築する。

気温差から来客数を推論

- IF 気温差が低い THEN 来客数は少ない
- IF 気温差が中位 THEN 来客数は多い
- IF 気温差が高い THEN 来客数は普通
- 日照時間から来客数を推論
- IF 日照時間が短い THEN 来客数は少ない
- IF 日照時間が中位 THEN 来客数は多い
- IF 日照時間が長い THEN 来客数は普通
- 日照時間と気温差から来客数を推論

表 4 日照時間と気温差から来客数を推論

気温差			
日照時間	低い	中位	高い
低い	とても少ない	少ない	少し少ない
中位	少し多い	多い	やや少ない
高い	やや多い	とても多い	普通

実際に構築されたファジイ推論モデルを用いた 需要予測及び実データとの比較については、発表 時に譲りたい。

#### 参考文献

[1]西本正博:気象データを用いる需要予測ファジィ推論モデルの構築に関する研究,大阪国際大学大学院経営情報学研究科修士学位論文,2002

[2]古殿幸雄,西本正博:気象データを用いる需要 予測ファジィ推論モデル,大阪国際大学紀要, 国際研究論叢,第17巻,第1号,PP.95-112, 2003

#### [問い合わせ先]

〒573-0192 大阪府枚方市杉 3-50-1 大阪国際大学 経営情報学研究科 中村 俊輔 TEL(072)858-1616(代)

E-mail:m03m09@stu.oiu.ac.jp

# 先物取引のためのファジィポジションコントローラー The Fuzzy Position Controller for a Futures Trading

大阪府立大学 北埜裕子 中島智晴 石渕久生 Hiroko Kitano, Tomoharu Nakashima and Hisao Ishibuchi Osaka Prefecture University

Abstract In this paper, we propose a fuzzy rule-based system that performs position control for futures trading. A trading agent that autonomously makes a trading decision can obtain the ability to balance in the amount of bought and sold futures by the fuzzy position controller. Each fuzzy if-then rules in the fuzzy rule-based system has weights that correspond to actions for position control. The weights are updated every settlement based on the result of the futures trade. That is, the fuzzy position controller performs an off-line learning. In computer simulations, We show that the fuzzy rule-based system for the position controller improves the trading performance in a virtual futures market.

## 1 はじめに

近年,計算機の能力向上に伴って,社会現象のような 複雑な対象を計算実験によって解明する試みが盛んに 行なわれている、そのような試みのひとつとして、社 会システムの研究に対する Test-bed として開発された 仮想先物取引市場 U-Mart がある.以前の研究 [1] にお いて,我々は自律的に売買注文を行うファジィシステム によるオンライン学習型エージェントを開発してきた. ファジィシステムは,制御問題や関数近似,識別など, 様々な問題にうまく適用されてきた.ファジィシステム の大きな利点としては,その高い解釈性が挙げられる. ファジィシステムは言語値を用いた If-Then 形式のルー ルで表現されているため,人による言語的な意味の理解 が可能である.したがって,精巧さを求めるがゆえ複雑 になりがちなエージェントの戦略にファジィシステムを 用いることにより、より理解しやすい構造を実現するこ とができる.

本研究では、従来の取引エージェント [1] にポジションコントローラーを加えることにより、損益の観点での性能改善を目的とするオフライン学習システムを開発する・本論文では、まず仮想先物取引市場 U-Mart について述べ、提案する学習型エージェントの戦略・設計について説明する・続いて、数値実験の概要を述べ、本エージェントの実験結果を示す・ここではポジションコントローラーを導入していない従来のエージェント [1] との比較を行い、その性能を評価する・

#### 2 仮想先物取引市場 U-Mart

U-Mart とは, Unreal Market as Artificial Research Test-bed の略であり, 1999 年から U-Mart 組織委員会・ 実行委員会により開発,運営されている先物取引の仮想市場である.以下に,U-Martの特徴を列挙する.

- J30 と呼ばれる毎日新聞社が発表している株式指数を用いていることにより実世界との関連付けがある。
- システムの詳細が公開されているので、制度構造 の解析を可能とする。
- マシンエージェント (プログラム) と人間が共に 参加することができる環境である.

U-Mart システムは実際に教育の場でも使用されており, 効果的な教材である.これらを用いて開発したエージェントを,次章で説明する.

# 3 学習型先物取引エージェント

#### 3.1 適応的ファジィルールベース

本研究では,エージェントが取引の注文の際に行う3つの決定(売買,量,指値)のうち,売買と指値に注目した.エージェントは2つのファジィルールベースを持っている.一つは売買の決定を行い,もう一つはポジションコントロールを行い,指値を決定する.各ファジィルールベースで用いられるファジィIf-Then ルールを以下に示す.

# <売買決定>

$$R_i$$
: If  $x_1$  is  $A_{i1}$  and  $\cdots$  and  $x_n$  is  $A_{in}$   
then  $Buy$  with  $q_{i1}$  and  $Sell$  with  $q_{i2}$   
 $i = 1, ..., N_1$  (1)

#### <ポジションコントローラー>

 $T_j$ : If money is  $A_{j1}$  and position is  $A_{j2}$ then GoBuy with  $q_{j1}$ , GoSell with  $q_{j2}$ and NotGo with  $q_{j3}$ ,  $j=1,...,N_2$  (2)

ここで, $R_i$  と  $T_j$  はルールのラベルで,  $\mathbf{x} = (x_1,...,x_n)$ ,money と position はファジィルールベースへの入力ベクトルである. $A_{ik}$ , $A_{j1}$ , $A_{j2}$  は条件部ファジィ集合であり, $(q_{i1}$ , $q_{i2}$ )と  $(q_{j1}$ , $q_{j2}$ , $q_{j3}$ )はそれぞれ,(Buy,Sell)に対するルール i の重みと(GoBuy,GoSell,NotGo)に対するルール j の重みである. $N_1$  と  $N_2$  はそれぞれのルールベースに含まれるルール数である.

#### 3.2 注文決定

本節では,注文内容である3つの項目(売買区分,量, 指値)の決定について順を追って説明する.

ここでエージェントに対し,売買の意思決定の参考となる入力ベクトル ${f x}$  が与えられたとする.この時,以下のファジィ推論により,買いと売りに対する指標  $Q_{Buy}$ , $Q_{Sell}$  を求める.

$$Q_Y = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} i(\mathbf{x}) \cdot q_{iY}}{\sum_{i=1}^{N_1} i(\mathbf{x})}, \quad Y = Buy \text{,} Sell \quad (3)$$

ここで ,  $_{i}(\mathbf{x})$  は入力ベクトル  $\mathbf{x}$  のルール  $R_{i}$  への適合度であり , 以下のように積演算で定義される .

$$i(\mathbf{x}) = i_1(x_1) \times i_2(x_2) \times \dots \times i_n(x_n)$$
 (4)

エージェントは指標 Q を用いて意思決定を行う. すなわち, $Q_{Buy}>Q_{Sell}$  であれば買い, $Q_{Buy}<Q_{Sell}$  であれば売りをとる.  $Q_{Buy}=Q_{Sell}$  の時は注文を見送る. 注文数量は,決定の確信度合いを反映させるため, $Q\times 100$  とした.指値に関しては,k 期の指値  $P_k$  の設定を,以下のように設定した.

$$P_k = s_{k-1} \pm l \tag{5}$$

ここで, $s_{k-1}$  は最新の現物価格,l は指値幅である.売買決定の際に「売り」という決定を行った場合,正の値幅 +l が用いられ,反対に「買い」という決定を行った場合,負の値幅 -l が用いられる.従来のエージェント [1] は l の値を固定していたが,本研究では l の値をポジションコントローラーで動的に変化させることにより,市場の動きに柔軟な注文を出すことができる.ポジションコントローラーの詳細は,次節に示す.

#### 3.3 ポジションコントローラー

本節では,ポジションコントローラーにより前節で述べた値幅 l を動的に調整する方法を説明する.以下にファジィ推論を示す.

$$Q_Y = \frac{\displaystyle\sum_{j=1}^{N_2} {}_{j}(position, money) \cdot q_{jY}}{\displaystyle\sum_{j=1}^{N_2} {}_{j}(position, money)} \ ,$$
 
$$Y = GoBuy \ ,GoSell, NotGo \eqno(6)$$

ここで,ルール  $T_j$  への適合度  $_j(money,position)$  は式 (4) と同様に積演算で定義される.ファジィ推論により得られた  $Q_{GoBuy},Q_{GoSell},Q_{NotGo}$  の大小を比較して,指値幅 l を以下の式に従って更新する.

$$l_{new} = l_{old} + 1$$
 if  $Q_{GoBuy}$  is the biggest. (7)

$$l_{new} = l_{old} - 1$$
 if  $Q_{GoSell}$  is the biggest. (8)

$$l_{new} = l_{old}$$
 if  $Q_{NotGo}$  is the biggest. (9)

市場では,売りの場合は,高く売りたいと思うのが当然であるが,指値を高くすればするほど売り注文は成立しにくい.逆に,安く売る注文は,市場に迎合されやすく,注文が成立しやすい.このことから,売りに偏らせたい場合は安く,買いに偏らせたい場合は高く買おうとすると,注文が成立しやすい.もし $Q_{GoBuy}$ が3つのQのなかで最も大きければ式(7)を用いて買いに偏るよう指値を上げる,つまりlを増やす.同様に, $Q_{GoSell}$ が最も大きければ式(8)を用いてlを減らす. $Q_{NotGo}$ が最も大きければ式(9)のように,前回と同じlを用いる.

# 3.4 売買決定に関する重みの学習

本研究では,これまでの研究 [1] と同様に,売買決定に関するルールの重みをオンラインで学習させる.売買決定の評価として,現時点の最新の現物価格と先物価格の差を用いる.買いの時は先物価格が現物価格よりも低ければ良しとし,反対に売りの時は,先物価格が現物価格よりも高ければ良しとする.重み  $q_{i1}$ と  $q_{i2}$  は,前期の注文に対する評価を基にして更新される.この場合,ルールの重みの更新は,選ばれた意思決定に関連付けられているルールについてのみ行うことに注意する.重みの更新は,結果がうまくいった場合には選択された行動が再び選ばれやすくなるよう重みを増やし,逆にそうでない場合には再び選ばれにくくなるように重みを減らす.例えば,Y という意思決定を行ったとき,ルールの

重みは以下のように更新される.

$$q_{iY}^{new} = \begin{cases} q_{iY}^{old} + \cdot (1 - q_{iY}^{old}) \cdot i(\mathbf{x}) \text{,if successful} \\ q_{iY}^{old} - \cdot q_{iY}^{old} \cdot i(\mathbf{x}) \text{, otherwise} \end{cases}$$
(10)

ここで , は学習係数であり ,  $\in [0,1]$  とする .

#### 3.5 ポジションコントローラーに関する重みの更新

本節では,オフラインでのポジションコントローラーによる指値決定に関する重みの学習について説明する.指値決定では,最終的な損益を評価として用いる. 1 ゲームの終わりに利益が出ていれば良しと考え,重み $q_{j1}$ , $q_{j2}$ , $q_{j3}$  を更新して次のゲームに移る.ゲーム中には重みの更新を行わないので,オフライン学習となる.この場合,更新の対象となる重みは,各ルールに対応する重みの中で,ゲーム中のメンバシップ値のトータルが最も大きいものに限定される.つまり,結果として得られた損益に,より影響を与えた重みが更新される.更新は,3.4 節と同様の方法で行われる.

#### 4 数值実験

#### 4.1 エージェントの実装

エージェントの実装には Java 言語を用い,売買注文を出せるように設計した.売買決定のファジィルールに対する入力は,1 回前と 2 回前の現物価格との差,3~5 回前の価格の平均との差,8~10 回前の価格の平均との差の 3 次元データである.指値決定のルールに対する入力は,現時点での所持金とポジションの 2 次元データとする.また,各次元を図 1 のようにそれぞれ 3 つにファジィ分割する.ここで,M は 100 万,k は現在の注文期を示す.各軸を 3 分割するので,ルールにおける条件部ファジィ集合の組合せは,売買決定に関して  $3^3=27$  通

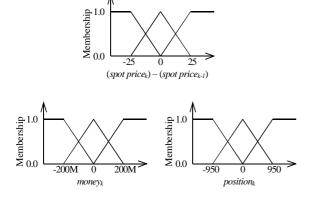


図 1: ファジィ分割

り,指値決定に関して  $3^2=9$  通りである.メンバシップ関数の形状を決定するパラメータの適切な値を調べるため,これまで研究されてきた従来の売買決定用のファジィシステムのみを用いたエージェント [1] での結果から,money と position の平均と分散を求め,三角形の中心を平均,隣り合うメンバシップ関数との交点が中心から分散だけ離れた所になるように値を決定した.

## 4.2 実験設定

本研究で提案する戦略と,従来のファジィエージェント [1] との比較を行う.各戦略の実験は同じ条件で行われたが,同時の実行は行っていない.実験は,開発キットに含まれているスタンドアロン型サーバ上で行った.ここで,実験のパラメータを表1に示す.実験では53

表 1: 実験の設定

使用時系列	5日ずつずれる53種類		
実験エージェント	パラメータの異なるエージェント		
取引対象	株価指数J30を現物価格として形成 される		
日数	30日		
一日の板寄せ回数	80		
初期所持額	10億		
敵としてのエージェン	敵はマシンエージェント20人		
比較対象	従来の売買決定のみを行う戦略		

個の時系列を1セットとし,10セット学習させた.敵 となるエージェントは20人のマシンエージェントで構 成される. 本実験では,提案手法を用いた2種類のエー ジェントA, Bを用意し、それぞれに対し同様の実験を 行った.エージェントAとBは前節で述べられたメンバ シップ関数で用いられるパラメータに関して,異なる値 を用いている.エージェントAはmoneyに対して2億, position に対して 950 を用いているのに対し, エージェ ントBは money に対して 4億, position に対して 1900 と,エージェントAの倍の値を用いている.これまでの 研究では,エージェントの設計に用いられたファジィシ ステムのパラメータは試行錯誤により決められている のが実状であった.本研究では,これまでの研究の結果 から推測した値をパラメータとして用いて, それがどの 程度結果に影響するかを考察する. それらの比較対象と して,ポジションコントローラー導入前の,ファジィシ ステムによる売買決定のみを行うエージェントを用意し た. 導入前エージェントに対しても, 同条件で実験が行 われた.

#### 4.3 実験結果

まず,各セットの平均損益を図2に,各セットの最大 と最小の損益を図3に示した.その詳細となる,1セッ ト目および10セット目の53個の時系列に対する損益を それぞれ図4,図5に示した.これらの結果より,エー ジェントAは導入前エージェントおよびエージェントB よりも優れた性能を示していることがわかる.そして, 図2と図3を比較すると,最小の動きよりも最大の動 きの方が,平均損益の動きと似通っている.このことか ら,損失よりも利益のほうが,平均に強く影響している ことがうかがえる.次に,各時系列に対する1セット目 の損益と10セット目の損益とを比較すると,損益の分 散が縮小していることが顕著に現れており,特に損失に 対する分散が改善されていることがわかった.これらの 図から、、ポジションコントローラー導入前の従来の手 法 [1] と比較すると,全体の平均損益ではAは10回中9 回, Bは10回中6回勝っている.このことから, Aは 損益という点で非常に優れた性能を示していることがわ かった. そして, AとBの比較からもわかるように,パ ラメータの設定の違いで,大きく性能が異なることが示 され,パラメータ設定の重要性が再確認された.

#### 5 おわりに

本研究では,U-Mart 市場に対するマシンエージェントの開発を行った.提案した戦略はエージェントのポジションに応じて指値を変化させることでより高い収益を目指した.数値実験では,従来のエージェントよりも,損益の大小という観点で優れた結果を示した.しかし,本エージェントも万能ではなく,しばしば起こる破産によって,1回きりのコンペティションなどで大敗する可能性がある.そのため,今後の研究では,苦手な時系列には大きく負けず,得意な時系列には大きく利益を得るようなエージェントを作ることを目指す.その上で,パラメータに関する学習を取り入れ,より市場の動きに適したファジィシステムを構築したい.また,現在はファジィシステムにおいてすべてのルールを用いているので,ルール選択手法を取り入れ,計算速度の速い,より優れたエージェントの開発も行いたい.

# 参考文献

[1] T. Nakashima, T. Ariyama, H. Ishibuchi, "On-Line Learning of a Fuzzy System for Futures Market", Proceedings of the 1st International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, Singapore, pp. 54-58, 2002.

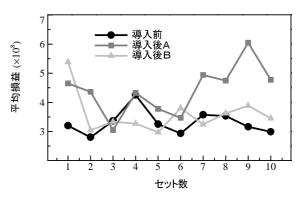


図 2: 各セットの平均損益

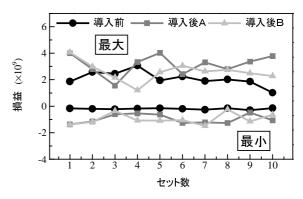


図 3: 各セットの最大と最小の損益

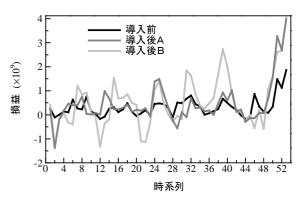


図 4: 1 セット目の各時系列に対する損益

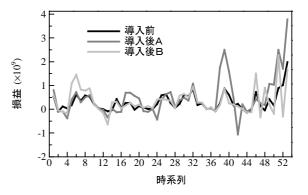


図 5: 10 セット目の各時系列に対する損益

# 量限定子を持つファジィルールの抽出手法の改良(その2) ―補助ルールの抽出―

Improvement of Extraction Method of Fuzzy Rules with Fuzzy Qualifiers
—Extraction of auxiliary rules—

馬野 元秀 村上 真一 宇野 裕之 瀬田 和久 岡田 真 Motohide Umano Shin-ichi Murakami Yushi Uno Kazuhisa Seta Makoto Okada

# 大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科

Department of Mathematics and Information Sciences College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

**Abstract** We proposed a method to extract knowledge about associations between attributes of data by fuzzy sets and fuzzy qualifiers such as "Most data of  $\{A_1 = \text{small}\}$  are  $C_1$ ." When the knowledge covers the small rate of data, it is better to extract more knowledge. We, therefore, remove data explained by the knowledge from all data, and extract auxiliary knowledge from the rest of data. We show a simulation result for extraction of auxiliary knowledge.

#### 1. はじめに

データベースに蓄えられた大量のデータには有用な知識が含まれている. これを取り出して有効に利用しようというのがデータマイニングである [1].

しかし、データベースのデータには誤りやノイズが 多く含まれており、きちんとした形の知識として抽出 するのが難しいことが多い。また、抽出された知識は 人間にとって理解しやすい形で表現することが重要で ある。

我々は以前、「属性 A の値が大きいほとんどのデータはクラス  $C_1$  である」のような自然言語に近い形でルールを抽出する手法を提案した [2]. 「大きい」や「小さい」等のファジィ集合と、「ほとんどの」や「だいたい半分以上の」などのファジィ量限定子を用いることにより、データの不確かさと人間にとっての分かりやすさに対処している.

本論文では、従来の手法により抽出されるルールでは説明しきれないデータが残っている場合に、さらに説明を加える必要があるかどうかを判定し、必要な場合には補助ルールを抽出する方法について述べる.

# 2. 抽出されるルールについて

まず本手法で抽出されるルールとその抽出法について、表1のデータ及び図1のファジィ集合を用いて説明する.いま、表1のデータのクラス $C_2$ を説明するルールを抽出したいとする.No.1 $\sim$ 5のデータを図1のmiddleで限定し、図2のように左側に $A_1$  = middleであるデータを、右側に $A_1$  ≠ middleであるデータを集める.このとき、 $A_1$  = middle により限定されたデー

$$p = \frac{0.5 + 0.6}{0.32 + 0.04 + 0.5 + 0.6 + 0.41} = 0.588$$

となる. したがって、このときクラス $C_2$ を説明するN

58.8% of data  $\{A_1 = \text{middle}\}$  are  $C_2$ 

というルールを抽出できる.

いまは 58.8%という具体的な数値を用いてルールを表現した. しかし、ファジィ集合 middle はあいまいさを含んだ概念であり、このような具体的な数値による割合の表現は適切ではないと考えられる. そこで、このデータの割合に対してファジィ量限定子 most、almost all、more than about 50% などの割合上で定義されたファジィ量限定子を用いて表現する.

ファジィ量限定子が図3のように定義されているとすると、先ほどのルールは、例えば、more than about 50% を用いると

More than about 50% of data  $\{A_1 = \text{middle}\}\$ are  $C_2$ 

のように表現できる.

このようにファジィ集合とファジィ量限定子を用いることによりデータについての情報を自然言語に近い形で表現でき、ユーザにとって理解しやすくなると考えられる。また、ファジィ集合とファジィ量限定子で表現されたルールは緩い制約での記述となっているので、データにノイズや誤りが含まれていたり、データが不完全な場合にも対処できる。

表 1: Fisher のアヤメのデータ (一部抜粋)

No.	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	class
1	5.1	3.5	1.4	0.2	$C_1$
2	4.7	3.2	1.3	0.2	$C_1$
3	7.0	3.2	4.7	1.4	$C_2$
4	6.9	3.1	4.9	1.5	$C_2$
5	7.1	3.0	5.9	2.1	$C_3$

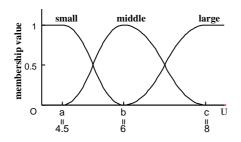


図 1: 属性 A のファジィ集合

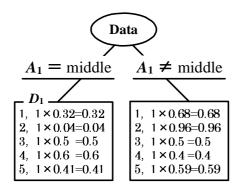


図 2: データの限定

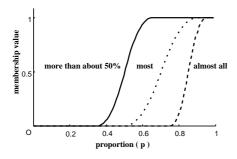


図 3: ファジィ量限定子のメンバーシップ関数

この例では  $A_1 = \text{middle}$  を限定する条件と考えたが、一般的には限定する条件としてどの属性のどのファジィ集合を使用するのがよいかを決める必要がある。また、どのファジィ量限定子を用いるのがよいかを決めなければならない。

さらに  $A_1 = \text{middle}$  で限定されたデータ集合  $D_1$  を 別の属性のファジィ集合でさらに限定した方がよいか も知れない. 複数の条件で限定する場合, その条件の

組合せを決める必要がある. このように

- (1) どの属性のどのファジィ集合を用いて何段階の条件で限定を行なうか
- (2) どのファジィ量限定子を用いるのがよいか について考える必要があり、その際の選択方法および 評価方法について前の論文[3]で述べた.

#### 2.1 ルールの抽出および評価

ルールは以下の評価値が最大となるようなファジィ 集合の組合わせを用いる.

評価値は、説明したいクラスを  $C_V$  としたとき、

- 1. クラス  $C_Y$  の出現率 p
- 2. クラス  $C_Y$  のカバー率 c
- 3. 限定するファジィ集合の数 L

#### により評価する.

第一の評価項目は、ファジィ集合の組合せにより限定されたデータ集合  $D_i$  内にクラス  $C_Y$  が現れる割合を示す。これは、

$$p = \frac{\sum_{d \in D_i} (\mu_{D_i}(d) \times \mu_{C_Y}(d))}{\sum_{d \in D_i} \mu_{D_i}(d)}$$
(1)

と計算される. ここで,  $\mu_{D_i}(d)$  はデータ集合  $D_i$  のデータ d の確信度,  $\mu_{C_Y}(d)$  は説明したいクラス  $C_Y$  に対するデータ d の一致度である.

第二の評価項目は、全データ $D_0$ 中のクラス $C_Y$ であるデータに対して、ファジィ集合の組合せにより限定されたデータ集合 $D_i$ 内でクラスが $C_Y$ であるデータの割合を示す、これは、

$$c = \frac{\sum_{d \in D_i} (\mu_{D_i}(d) \times \mu_{C_Y}(d))}{\sum_{d \in D_0} \mu_{C_Y}(d)}$$
(2)

と計算される.

第一,第二の評価項目の値は,高い方が望ましく,低いものは有効でないと考えられるので,それぞれ閾値 $\theta_n$ ,  $\theta_c$  を設定する.この2つの値が主な評価項目となる.

第三の評価項目は、ルールがユーザにとってわかりやすいかどうかを示す。限定に使用するファジィ集合が多いほどデータは厳密に分類される。しかし、ユーザに分かりやすく説明することを目的とすると限定する条件が少ない方がよい。したがって、限定に使用するファジィ集合の数Lを評価し、少ないファジィ集合で表現されたルールの評価を高くするような値を用いた。

そして、上記の3つの評価項目を用いて、ファジィ集合の組合せの評価値Eを次式のように、

$$E = w_1 \times p + w_2 \times c + w_3 \times \mu(L) \tag{3}$$

とする. ここで、 $w_1, w_2, w_3$  は各要因を考慮する重みである.

そして,この値が最大となるファジィ集合の組合せ を探し出し,ルールの候補として,

$$Q$$
 data of  $\{A_{i_1} = F_{i_1j_1}\}\{A_{i_2} = F_{i_2j_2}\}$  ··· are  $C_Y$ 

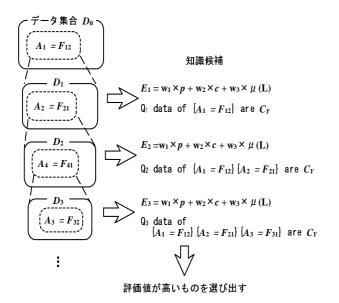


図 4: ファジィ集合の組合せの決定

の形で抽出する (図 4).

#### 2.2 ファジィ量限定子の評価

次にファジィ量限定子を決定する. その際, 使用するファジィ量限定子は

- 1. ファジィ量限定子の確信度  $\mu_q$
- 2. ファジィ量限定子の評価  $E_a$

により評価し,決定する.

第一の評価項目は、使用するファジィ量限定子に対するデータ  $D_i$  におけるクラス  $C_Y$  の出現率 p のメンバーシップ値である.

第二の評価項目は、ファジィ量限定子自体に対する評価で、どのファジィ量限定子を用いたルールが有効かを評価するものである。 図 3 の 3 つのファジィ量限定子の例では more than about 50% よりも most を、most よりも all most を使った方が望ましい。そこで、本論文ではファジィ量限定子を定義するメンバーシップ関数のメンバーシップ値が 0.5 となる p の値を採用する。図 3 のファジィ量限定子では more than about 50%, most, all most 0  $E_Q$  は、それぞれ、0.5, 0.7, 0.85 となる.

この2つの評価値を用いて

$$E_Q = \mu_q \times E_q$$

が最大となるファジィ量限定子を用いてルールを表現 する.

上記の評価値を用いてファジィ集合の組合せおよび 使用するファジィ量限定子を決定しルールを抽出する。 そして、最初に選択されたファジィ集合を使用可能な ファジィ集合から除き次のルールを抽出することによ り、複数のルールを抽出する [3].

# 3. 補助ルールの作成

データによっては抽出されたルールでは説明できていないデータが多く残っている場合がある。すなわち、ルールのカバー率cが低い場合である。このような場合には、1つのルールでは説明できていないので、さらにルールを抽出し説明を付け加えた方が良いと思われる。そこで、そのルールにより説明できるデータを一致度分だけデータ集合 $D_0$ から除き、除いた後のデータ集合から再度ルール抽出を行う。このようにして、補助ルールを抽出する (図 5)。

その際、補助ルールを抽出するのは抽出されたルールによるデータのカバー率cが閾値 $\theta_a$ 未満の場合である。補助ルールの抽出を含めた本手法のアルゴリズムは次のようになる。

- 1. ルールとして説明したいクラス (属性の値) を  $C_Y$  とし、各属性が持つすべてのファジィ集合の集合を A とする.
- 2. データ集合 Dに対して,集合 Aに含まれるすべてのファジィ集合に対して評価値 E を算出し, $C_Y$ の出現率が限定前に比べて増加し,カバー率が閾値  $\theta_c$  以上のファジ 集合の中で,E が最大となるものを求める.これが次に限定するファジィ集合になる.そして,D を限定したデータ集合を新たに D とする.
- 3. ルール抽出終了条件を満たさない場合は、2 において使用した属性のファジィ集合を A から削除し 2 へ戻る. ルールの抽出条件を満たした場合は、ルールを抽出しカバー率が閾値  $\theta_a$  以上であれば終了し、閾値未満であれば 4 へ進む.
- 4. 抽出されたルールにおいて使用されたファジィ集合をAから削除し、データ集合Dのそれぞれのデータから、抽出されたルールに対する一致度を引き2を実行する(ただし、この際にはカバー率の閾値は考慮しない).

ルール抽出終了条件は次のものを用いる.

- a. クラス  $C_V$  の出現率が 1 となったとき
- b. 限定条件の数がユーザが定めた値を超えたとき
- c. クラスを説明するためにすべての属性を使用した とき
- d. 限定後に  $C_Y$  の出現率が増加しなくなったとき

このように補助ルールを抽出する事により、1つのルールでは説明できないデータに対して、補助ルールと合わせた視点からデータを説明できるようになり、ユーザにとって有効であると考えられる.

#### 4. ワインデータによるシミュレーション

ワインデータを用いてシミュレーションを行った [4]. このデータは、3 種類のワインについて 13 種類の属性

# 抽出されたルールで説明 $D_0$ $D_{\theta}'$ $= F_{12}$ $A_3 = F_{31}$ $D_1$ $D_1'$ $A_4 = F_{42}$ $A_2 = F_{21}$ $D_2$ $D_2'$ -ル抽出 補助ル -ル抽出

図 5: 補助ルールの作成

値を測定したもので、178個のデータが存在する、

そして、それぞれの属性に対して、図1のようにファ ジィ集合 small, middle, large を定義した. ただし, 図 1におけるパラメータは、それぞれ、a=属性値の最小 値,b=属性値の平均値,c=属性値の最大値とした。そし て, 図3のファジィ量限定子を用いてルール抽出を行っ た. ただし, 閾値  $\theta_p = 0.7$ ,  $\theta_c = 0.2$ , 補助ルール抽出 のための閾値  $\theta_a = 0.6$ , E に対する重みは  $w_1 = 0.5$ ,  $w_2 = 0.2$ ,  $w_3 = 0.3$  とした. その結果, 次のような 14 個のルールと7個の補助ルールが抽出された.

1. Almost all data of {A01 = large}{A07 = middle} are {class = C1} (Cf 0.984954) (P 0.932653) (C 0.367847) or else

Almost all data of {A04 = small}{A03 = large}

- are {class = C1} (Cf 1) (P 0.952064) (C 0.0161309) 2. More than about 50% data of {A07 = middle}{A10 = middle}
- are {class = C1} (Cf 1) (P 0.740433) (C 0.691825) 3. More than about 50% data of {A04 = small} are {class = C1} (Cf 1) (P 0.713795) (C 0.304308)

Most data of {A13 = middle}{A12 = large} are {class = C1} (Cf 0.791555) (P 0.770866) (C 0.203602)

- 4. Most data of {A13 = middle}{A12 = large}
  are {class = C1} (Cf 0.937141) (P 0.829087) (C 0.303343)
- 5. Almost all data of {A01 = small} are {class = C2} (Cf 0.994987) (P 0.939987) (C 0.334551)

Almost all of {A03 = small}{A13 = small}

are {class = C2} (Cf 1) (P 0.981354) (C 0.061125) 6. Almost all data of {A10 = small}{A13 = small} are {class = C2} (Cf 0.950975) (P 0.918687) (C 0.551865) or else

Almost all of  $\{A03 = small\}\{A05 = middle\}$ 

are {class = C2} (Cf 1) (P 0.999804) (C 0.00771248)
7. Almost all data of {A13 = small}{A07 = middle}
are {class = C2} (Cf 0.836131) (P 0.892752) (C 0.52268) or else

Almost all data of {A05 = large}{A09 = large} are {class = C2} (Cf ) (P 0.992486) (C 0.0173904)
8. More than about 50% data of {A12 = middle}{A05 = small}

- are {class = C2} (Cf 1) (P 0.721903) (C 0.406273) 9. More than about 50% data of {A05 = small}{A07 = middle} are {class = C2} (Cf 1) (P 0.728603) (C 0.401634)
- 10. Most data of {A12 = small}
- are  $\{class = C3\}\ (Cf\ 0.975744)\ (P\ 0.855949)\ (C\ 0.760198)$
- 11. Almost all data of {A07 = small}{A11 = small}
   are {class = C3} (Cf 0.997571) (P 0.94303) (C 0.651362)

- 12. More than about 50% data of {A11 = small}
- are {class = C3} (Of 1) (P 0.739194) (C 0.732104) 13. Most data of {A06 = small}{A10 = middle} are {class = C3} (Cf 0.983381) (P 0.863537) (C 0.403577) or else

Almost all data of {A02 = middle}{A08 = large} are {class = C3} (Cf ) (P 0.958081) (C 0.0410625) 14. More than about 50% data of {A09 = small}{A10 = middle} are  $\{class = C3\}\ (Cf\ 1)\ (P\ 0.731938)\ (C\ 0.432528)$ or else

Almost all data of {A08 = large}{A01 = large} are {class = C3} (Cf 0.904529) (P 0.906303) (C 0.0259177)

ここで, or else の次のルールは補助ルールである. Cf は使用するファジィ量限定子に対する確信度, Pは出現 率. C はカバー率である.

抽出されたこれらのルールにより、ワインデータの クラスについて説明ができる. また, ルール 3 のみで はカバー率が約30%であるが、補助ルールを用いる事 により合計約50%のデータについて説明することがで きている.しかし,ルール1の場合のように,カバー 率が低くなってしまうことがある. これは補助ルール を抽出する際にカバー率の閾値を用いていないが、評 価値はルール抽出時と同じにしているからである.

# 5. おわりに

本論文では,補助ルールの抽出方法について述べた. 補助ルールを用いることにより、より広い範囲のデー タを説明する事ができるようになった. 今後は補助ルー ルを抽出する際の条件についても考えていかなければ ならない.

#### 参考文献

- [1] G.P. Shaporo and W.J. Frawley: Knowkedge Discovery in Database, AAAI/MIT Press (1991)
- [2] 馬野 元秀, 岡田 貴祐, 鳩野 逸生, 田村 坦之:「デー タベースからのファジィ知識の発見」, 第 23 回知能 システムシンポジウム資料, pp.13-18 (1996)
- [3] 馬野 元秀, 村上 真一, 宇野 裕之, 瀬田 和久, 岡田 真: 「ファジィ量限定子を用いたファジィルールの抽出」 第 19 回ファジィシステムシンポジウム, pp.323–326 (2004)
- [4] ftp://ftp.ics.uci.edu/pub/machine-learningdatabases/wine/wine.names

#### [問い合わせ先]

〒599-8531 堺市学園町 1-1 大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科 馬野 元秀

TEL: 072-254-9675 FAX: 072-254-9930

Internet: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

# ファジィベキ級数展開

## **Fuzzy Power Series**

稲井田 次郎
Jiro Inaida
日本大学
Nihon University

御前 憲廣
Norihiro Misaki
日本大学
Nihon University

金川 秀也 Syuya Kanagawa 武蔵工業大学 新海 公昭 Kimiaki Shinkai 早稲田大学

Musashi Institute of Technology

Waseda University

**Abstract:** It is well known that fuzzy mapping plays an important and fundamental role in fuzzy analysis. In this paper, we attempt to determine extensive classes of these fuzzy mappings that are represented by their power series. And as applications, we give some examples.

概要:拡張原理により、実関数 f(x)の定義域をファジィ数空間上に延長し、 f(u)とおく。特に、解析関数 f(x)に対し、そのベキ級数  $Pf(x; x_a)$  における変数 x を形式的にファジィ数 u に置き換えた

 $Pf(u; x_a)$  を考え、この $Pf(u; x_a)$ がf(u)に一致するかどうか考察してみた。

検索語:ファジィ数,ファジィ数列, Cauchy 列,ファジィベキ級数

#### 1. はじめに

**R**上の関数 f(x) が、 $x=x_o$ で解析的であるというのは、f(x) が  $x_o$ の近傍で  $x-x_o$ のべキ級数で表されることである。この関数 f の定義域を複素数平面Cに延長したとき、複素関数

f(z) が z の近傍で解析的であるというのは z -z のべき級数で表されることと定義できる。この意味で,解析性は定義域を実数集合から複素数平面に延長しても,保存されることが分る。この関数 f の定義域を実数集合からファジィ数空間へ延長したとき,解析性がどうなるかは1つの問題である。

## 2. ファジィ数

#### 定義1 ファジィ数

数直線上のファジィ集合のうち, 正規, 凸, そ

のメンバーシップ関数が上に半連続で、台が有界であるものをファジィ数という。ファジィ数を u, v, w 等で表すことにする。ファジィ数全体を E<sup>1</sup> とおく。

# 定理1 <u>ファジィ数における表現定理</u> u がファジィ数ならば

- i)  $[u]^{\alpha}$ ,  $0 \le \alpha \le 1$  はすべて空でない有 界閉区間である。
- ii)  $0 \le \alpha_1 \le \alpha_2 \le 1$  ならば  $[\mathbf{u}]^{\alpha_1} \supset [\mathbf{u}]^{\alpha_2}$
- iii) 単調増加な正数列  $\{\alpha n\}$  が  $\alpha \in (0,1)$  に収束すれば、

$$\bigcap_{n=1}^{\infty} [u]^{\alpha n} = [u]^{\alpha}$$

が成立する。逆に、任意の $\alpha \in [0,1]$  に対し、クリスプ集合  $P_{\alpha} \subset R$  が存在し、上のi)  $\sim iii$ ) に

相当する

- i)  $P_{\alpha}$ ,  $0 \le \alpha \le 1$  はすべて空でない有界閉区間 である
- ii)  $0 \le \alpha_1 \le \alpha_2 \le 1$   $\alpha_1 \le \alpha_2 \le 1$   $\alpha_2 \le 1$
- iii) 単調増加な正数列 $\{\alpha_n\}$  が $\alpha \in (0,1]$  に収束すれば、

$$\bigcap_{n=1}^{\infty} P_{\alpha n} = P_{\alpha}$$

が成立するならば、ただ1つのファジィ数uが存在し

$$[u]^{\alpha} = P_{\alpha}, \quad \alpha \in (0, 1]$$

かつ

$$[\mathbf{u}]^0 = \overline{\bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\mathbf{u}]^{\alpha}} \subset P_0$$

をみたす。

この定理よりファジィ数が区間により特徴付けられることが分る。したがって、実数における様々な概念が区間を通してファジィ数に対して定義できる。

定義2 ファジィ数間の順序

ファジィ数 u, vのα-レベル集合は

$$[\mathbf{u}]^{\alpha} = [\underline{u}(\alpha), \ u(\alpha)],$$
$$[\mathbf{v}]^{\alpha} = [\mathbf{v}(\alpha), \ \overline{\mathbf{v}}(\alpha)], \ 0 \le \alpha \le 1$$

のように閉区間となる。このとき

 $\underline{u}(\alpha) \leq \underline{v}(\alpha), \ \overline{u}(\alpha) \leq \overline{v}(\alpha), \ 0 \leq \alpha \leq 1$ ならば

 $u \leq v$ 

とおく。これは、任意の実数 r を

$$r = [r, r]$$

と考えれば、実数間の順序の拡張になっている。 定義3 ファジィ数間の距離

u,  $v \in E^1$ とするとき, u, v 間の距離を次式で定義する:

d (u, v) = 
$$\sup_{0 \le \alpha \le 1} \{ | \underline{v}(\alpha) - \underline{u}(\alpha) |$$

$$\vee | \overline{v}(\alpha) - \overline{u}(\alpha) | \}$$
 (1)

定義4 ファジィ数の和とスカラー倍

 $u, v \in E^{-1}$  とする。このとき、和 u+v は拡張原理により次のように定義される:

$$(u+v)(x) = \sup_{s+t=x} (u(s) \land v(t)), x \in X$$

また、kを実数とするとき、スカラー倍kuは 次式で定義される:

$$(ku)(x) = \begin{cases} u(x/k), & k \neq 0 \\ 0(x), & k = 0 \end{cases}$$

定義5 ファジィ数の差

 $u, v \in E^1$ とする。ある  $w \in E^1$  が存在して,u=v+w が成立すれば, $w \in E^1$  を  $u \in V$  の差といい

u-v

で表す。

#### 3. ファジィ関数

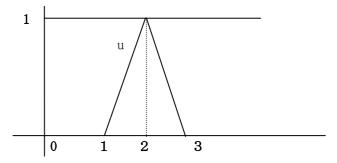
f がファジィ関数であるとは、部分ファジィ数空間に属するファジィ数 u に対し、 f(u) がファジィ数になることである。すなわち、

$$f: u \rightarrow f(u)$$

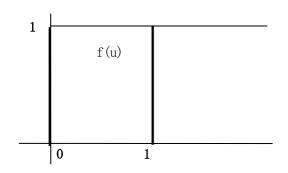
となる写像が $E^1$ の中に存在することである。 定理  $2 \quad f(x)$  を区間 I で定義された連続な実関数とする。このとき、u をファジィ数として

- i)  $\exists x_0 \in R$ ,  $A(x_0)=1$ ,  $f(x_0) \in I$
- ii)  $\exists M > 0$ , |f(x)| < M,  $x \in [u]^0 \cap I$  ならば、f(u) はファジィ数となる。 f(x)が連続でないと f(u) がファジィ数とならな

<u>い例</u> f(x)をDirichlet の関数とする。

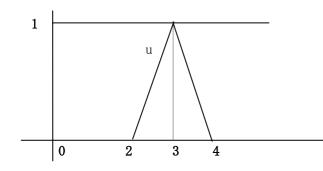


とすれば



となって f(u) はファジィ数ではない。 条件 i)が成立しないと f(u) がファジィ数となら ない例

$$f(x) = 1, x \in [0, 1]$$



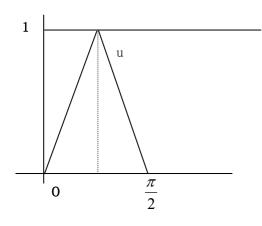
のとき

$$f(u)(x)=0, x\in(-\infty, \infty)$$

であるから、f(u)はファジィ数ではない。

条件ii)が成立しないとf(u) はファジィ数とならない例

$$f(x) = \tan x, x \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$$



このとき, 任意に大きいxに対して

$$f(A)(x) \neq 0$$

よって, $[f(A)]^0$  は有界でないから,f(A)はファジィ数でない。

例 uをファジィ数とするとき, e "は常にファジィ数となる。したがって, e "はファジィ数空間上で定義されたファジィ関数となる。こ の関数に対し, 実関数と類似の公式が成立する。

$$e^{u} e^{v} = e^{u+v}$$
,  $u, v \in E^{1}$  (2)

例  $f(x) = x^n$ ,  $x \in (-\infty, \infty)$ ,  $n=1, 2, \cdots$  に対して

$$f(u) = u^n$$
,  $u \in E^1$ 

#### 4. ファジィ数列

ファジィ数列  $\{un\}$  がファジィ数u に収束する とは、任意の正数  $\epsilon$  に対して、ある番号Nが存在 して、n>N なるすべての n に対して

$$d(u_n, u) < \epsilon$$

が成立するときをいう。

例 
$$e^{u} = \lim_{n \to \infty} \left(1 + \frac{u}{n}\right)^{n}$$
 (3)

#### 5. ファジィ級数

ファジィ級数 $\Sigma_{\pm}$ unがファジィ数uに収束する とは、級数の第n部分和

$$v_n = \sum_{i=1}^n u_i$$

がすべて存在し、ファジィ数列 $\{v_n\}$ がu に収束するときをいう。ここで、 $v_n = \Sigma_{\pm} ui$  の各項の間の演算は和あるいは差である。

定理3 関数 f(x) が、 $x=x_o$  で解析的であるとする:

$$Pf(x; x_a) = \sum k_n (x - x_a)^n \qquad (4)$$

このとき, ある正数 $\delta < \rho$  が存在して,

$$0 \le u - x_o < \delta < \rho$$

なるすべてのファジィ数uに対して

$$f(u) = P_f(u; x_a), f(u) = (-1)P_{-f}(u; x_a)$$
 (5)

のいずれかが成立する。ただし、 $\rho$  は式(4)の 収束半径である。

注. 関数 f(x) が、 $x=x_o$  で解析的ならば、形式的に

$$\mathbf{f}(\mathbf{u}) = \mathbf{P}\mathbf{f}(\mathbf{u}; \ \mathbf{x}_o), \ \ 0 \leq \mathbf{u} - \mathbf{x}_o < \delta < \rho$$
 とおくことにする。

系 さらに、f(x)を奇関数とすれば、式(5)は  $0 \le |u-x_o| < \delta < \rho$  なるすべての ファジィ数に対して成立する。

例 
$$e^{u} = 1 + u + \frac{1}{2!} u^{2} + \dots + \frac{1}{n!} u^{n} + \dots, u \ge 0$$

例 
$$\cos u = (-1) \left( -1 + \frac{1}{2!} u^2 - \frac{1}{4!} u^4 + \cdots \right)$$
  
=  $1 - \frac{1}{2!} u^2 + \frac{1}{4!} u^4 - \cdots$ ,  $0 \le u \le \sqrt{6}$ 

$$\Re \sin u = u - \frac{1}{3!} u^3 + \frac{1}{5!} u^5 - \dots, \quad -\sqrt{2} \le u \le \sqrt{2}$$

$$e^{iu} = 1 + i u + \frac{1}{2!} (i u)^2 + \dots + \frac{1}{n!} (i u)^n + \dots,$$

$$0 \le u \le \sqrt{2}$$
(7)

#### 参考文献

- [1] A. Kaufmann and M. M. Gupta: Introduction to Fuzzy Arithmetic, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1991. (邦訳:ファジィ数理と応用:田中 英夫, 松岡 浩訳, オーム社, 1992.)
- [2] Wu Congxin and Wang Guixiang: Convergence of sequences of fuzzy numbers and fixed point theorems for increasing fuzzy mappings and application, Fuzzy Sets and Systems, 130, 383-390, 2002.
- [3] Wu Congxin: Some advances on the calculus of fuzzy mappings, The 19<sup>th</sup> Fuzzy System Symposium Proceeding, 2003.

#### 連絡先

稲井田 次郎

日本大学理工学部

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

Phone + Fax: 047-469-5234

E-mail: inaida@penta.ge.cst.nihon-u.ac.jp

# ファジィ情報システムにおける希少さを用いた類似度

# Similarity dealing with uniqueness measure in fuzzy information system

江本 全志 松本 麻奈美 向殿 政男

Masashi Emoto Manami Matsumoto Masao Mukaidono

# 明治大学

Meiji University

**Abstract:** We have proposed similarity based on uniqueness measure in binary information system before. We get this similarity by using uniqueness of attribute values in subset of all objects in an information system. We regard this subset as knowledge. This similarity has a property that is able to change order of similarities by knowledge. In this paper, we extend binary information system into fuzzy information system and propose the similarity based on uniqueness measure in fuzzy information system. Also, we consider clustering using the similarity.

# 1 はじめに

これまで多くの種類の類似度が提案されてきた。 2003 年、私達は情報システムにおける属性値の希少さを考慮した類似度を提案した。この類似度では、情報システムの全ての対象の集合の部分集合を知識と見なし、この知識が考慮され、類似度が計算される。希少さを考慮した類似度に関するこれまでの私達の論文 [1, 2, 3] では、類似度の概念を分かりやすく説明するために、2値情報システムを取り扱った。本論文では、1つの属性において2個以上の属性値を持つ情報システムにおいて、どのように類似度を計算するのかを考える。また、この類似度を用いてクラスタリングを行なう。

# 2 ファジィ情報システム

ファジィ情報システムにおける希少さを考慮した 類似度を定義する前に、まず情報システムとファジィ 情報システムを定義し、情報システムをファジィ情 報システムへ変換する方法を示す。

#### 定義 1 情報システムとファジィ情報システム

情報システム  $I=(U,A,V,\rho)$  は、対象の集合 U、属性の集合 A、属性値の集合 V、関数  $\rho$  から構成される。関数  $\rho$  は、 $\rho:U\times A\to V$  である。また、ファジィ情報システムは属性値の集合を V=[0,1] としたものである。

表 1 は情報システムの例であり、表 2 はファジィ情報システムの例である。表 1,2 のように、情報シ

ステムの属性値は自由な値を取るが、ファジィ情報 システムでは属性値は [0,1] の値を取る。

表 1: 情報システム

	身長	体重	年齢	年収	性別
$u_1$	180cm	70kg	20 歳	200 万円	男
$u_2$	155cm	40kg	15 歳	0 万円	女
$u_3$	$165 \mathrm{cm}$	70 kg	55 歳	900万円	男
$u_4$	190cm	100kg	45 歳	300 万円	男
$u_5$	165cm	55 kg	40 歳	3000 万円	女
$u_6$	145cm	45 kg	25 歳	300 万円	女
$u_7$	180cm	85 kg	60 歳	5000 万円	男

2 つの対象の類似度を求めるのに、表1 のような情報システムのままでは計算がしにくい。一方、ファジィ情報システムは属性値の値が[0,1] なので、類似度を計算するのに扱いやすい。

ここで、表 1 のような情報システムを表 2 のようなファジィ情報システムにどのように変換するかを考える。

情報システムの属性値は、人によって評価が変わってくる。例えば、145cm と155cm は近いと感じる人がいたり、また遠いと感じる人もいる。また、145cm と155cm、180cm と190cm はともに10cm 差であるが、それぞれ2つの値の近さは人によって違う。ここで、私達はファジィ集合を用いて情報システムをファジィ情報システムに変換する。

表 2 のファジィ情報システムは、図 1 のファジィ 集合を用いて、表 1 の情報システムを変換した例で ある。変換の仕方は例を見れば明らかなので、ここ では特に説明はしない。

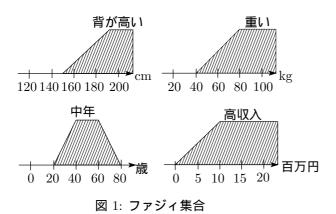


表 2: ファジィ情報システム

	高い	重い	中年	高収入	男
$u_1$	0.75	0.75	0	0.2	1
$u_2$	0.125	0	0	0	0
$u_3$	0.375	0.75	1	0.9	1
$u_4$	1	1	1	0.3	1
$u_5$	0.375	0.375	1	1	0
$u_6$	0	0.125	0.25	0.3	0
$u_7$	0.75	1	1	1	1

# 3 ファジィ情報システムにおける 希少さを考慮した類似度

2 値情報システムにおける希少さを考慮した類似度を 2003 年に私達が提案した [1, 2, 3]。ファジィ情報システムでもこの類似度を取り扱えるように、次にファジィ情報システムにおける希少さを考慮した類似度を定義する。

人間は知識にある対象同士の類似度より知識にない対象同士の類似度の方が類似度が高くなる傾向がある。なぜなら、人間は知識にある対象をよく知っており、それらを区別できるようになっている。例えば、暗い所に慣れている状態から暗い場所を見るとその場所の物をある程度区別できるが、明るい所に慣れている状態から暗い所を見ると全て黒く見え区別できない。知識によって属性値の距離を変えるため、まず知識における属性値を定義する。

#### 定義 2 知識における属性値

知識  $X\subseteq U$  における属性  $a_k\in A$  の値を次のように定義する。ただし、 $MIN(a_k,X),MAX(a_k,X)$  を知識  $X\subseteq U$  の中の対象の属性  $a_k\in A$  の値の最小値、最大値とする。

$$W(u_i, a_k, X) = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \times \rho(u_i, a_k) + \frac{x_1 \times y_2 - x_2 \times y_1}{x_1 - x_2}$$
(1)

#### ただし、

- If  $\rho(u_i, a_k) < MIN(a_k, X)$ , then  $x_1 = 0$ ,  $y_1 = 0$ ,  $x_2 = MIN(a_k, X)$ ,  $y_2 = 1 - \sqrt{1 - MIN(a_k, X)^2}$ .
- If  $MIN(a_k, X) \le \rho(u_i, a_k) \le MAX(a_k, X)$ then  $x_1 = MIN(a_k, X), y_1 = 1 - \sqrt{1 - MIN(a_k, X)^2}, x_2 = MAX(a_k, X), y_2 = \sqrt{1 - (MAX(a_k, X) - 1)^2}.$
- If  $\rho(u_i, a_k) > MAX(a_k, X)$ then  $x_1 = MAX(a_k, X), y_1 = \sqrt{1 - (MAX(a_k, X) - 1)^2}, x_2 = 1, y_2 = 1.$

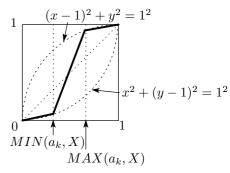


図 2: 知識における属性値

#### 定義 3 一致度

属性  $a_k \in A$  における 2 つの対象  $u_i, u_j \in U$  の一致度を次のように定義する。

$$M(u_i, u_j, a_k, X) = 1 - |W(u_i, a_k, X) - W(u_j, a_k, X)|$$
(2)

#### 定義 4 知識における属性値の割合

対象  $u_i \in U$  の属性  $a_k \in A$  の値の知識  $X \subseteq U$  における割合を次のように定義する。

$$P(u_i, a_k, X) = \frac{\sum_{u_j \in X} M(u_i, u_j, a_k, X)}{|X|}$$
(3)

### 定義 5 知識における属性値の組み合わせの希少さ

知識  $X\subseteq U$  における 2 つの対象  $u_i,u_j\in U$  の属性  $a_k\in A$  の値の組み合わせの希少さを次のように定義する。

$$C(u_{i}, u_{j}, a_{k}, X)$$

$$= 1 - (2 - M(u_{i}, u_{j}, a_{k}, X)) \times P(u_{i}, a_{k}, X) \times P(u_{j}, a_{k}, X)$$
(4)

#### 定義 6 希少さを考慮した類似度

希少さを考慮した類似度を次のように定義する。 ただし、 $u_i, u_j \in U$ 、 $X \subseteq U$  とする。

$$S(u_i, u_j, X) = \frac{\sum_{k=1}^{|A|} (C(u_i, u_j, a_k, X) \times M(u_i, u_j, a_k, X))}{\sum_{k=1}^{|A|} C(u_i, u_j, a_k, X)}$$
(5)

#### 例 1 表 2の情報システムでの類似度

ここでは、表 2 の情報システムにおいて、知識を  $X=\{u_3,u_4,u_5,u_7\}$  として計算をした。知識は「中年」の度合が高い対象とした。計算された類似度は、表 3 である。

表 3: 類似度表

	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$
$u_1$	1	0.50	0.64	0.84	0.21	0.50	0.65
$u_2$	0.50	1	0.36	0.34	0.77	0.98	0.07
$u_3$	0.64	0.36	1	0.44	0.55	0.38	0.74
$u_4$	0.84	0.34	0.44	1	0.04	0.36	0.65
$u_5$	0.21	0.77	0.55	0.04	1	0.79	0.34
$u_6$	0.50	0.98	0.38	0.36	0.79	1	0.09
$u_7$	0.65	0.07	0.74	0.65	0.34	0.09	1

 $u_1$  と  $u_2$ 、 $u_3$  と  $u_4$  の類似度を見ると、 $S(u_1,u_2,X)$  = 0.50,  $S(u_3,u_4,X) = 0.44$  となっている。しかし、表 2 での対象の差の合計は、 $u_1,u_2$  が 2.575 であり、 $u_3,u_4$  が 1.475 である。 $u_1,u_2$  の差の方が大きいのに類似度は  $u_1,u_2$  の方が高くなっている。これは知識を中年の度合が高いものにしたからである。この類似度の詳しい概念の説明は、[1,3] を参照下さい。

#### 例 2 画像の色における類似度

人間は、暗いのに慣れている状態で暗い所を見るとよく見ることができる。すなわち、暗い色の違いをちゃんと識別できる。また、明るいのに慣れている状態で暗い所を見るとすべてのものが同じ色に見えてします。すなわち、暗い色の違いを識別できていない。希少さを考慮した類似度を用いると、上記を実現することができる。

まず、下記で設定された図3の画像を用意する。下記の設定や表4の32,64,96は、RGB形式における(32,32,32),(64,64,64),(96,96,96)にあたる。RGB形式において、(0,0,0)は黒で、(255,255,255)は白となる。すなわち、(x,x,x)において、xが0に近いほど暗くなり、xが255に近いほど明るくなる。

32 : 線、ディスプレイの枠

● 64 : 背景,

96 : 花びら、ディスプレイの中

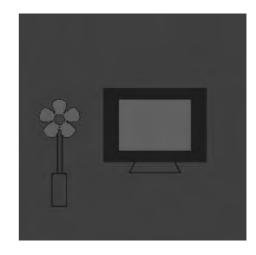


図 3: 画像

表 4: 色

	色の値		色の値
$u_1$	0	$u_6$	160
$u_2$	32	$u_7$	192
$u_3$	64	$u_8$	224
$u_4$	96	$u_9$	255
$u_5$	128		

ここでの情報システムは、表 4 とする。この情報システムとファジィ集合「明るい」(0 の度合いを 0、255 の度合いを 1 とし、この 2 点を結んだファジィ集合)を使い、知識を  $\{u_1,u_2,u_3,u_4\}$ (暗い知識)また  $\{u_6,u_7,u_8,u_9\}$ (明るい知識)とした場合の類似表  $\{u_2,u_3,u_4\}$ 間のみ)を表 5 に示す。

表 5: 暗い・明るい知識の場合の類似度表

暗い	$u_2$	$u_3$	$u_4$	明るい	$u_2$	$u_3$	$u_4$
$u_2$	1	0.74	0.48	$u_2$	1	0.96	0.91
$u_3$	0.74	1	0.74	$u_3$	0.96	1	0.96
$u_4$	0.48	0.74	1	$u_4$	0.91	0.96	1

表 5 の類似度を比較すると、暗い方の色である  $u_2,u_3,u_4$  において、暗い知識を用いた類似度の方が、明るい知識を用いた類似度より値が低くなって いる。すなわち、暗い知識を用いた方が  $u_2,u_3,u_4$  を 区別していることとなる。

# 4 Irisのクラスタリング

ここでは、Iris のデータを希少さを考慮した類似度を用いてクラスタリングをする。

クラスタリングの仕方は、まず情報システム、ファジィ集合、知識を与え、対象間の類似度を求める。そして、対象間の類似度を カットをし、類似度を 0,1にする。 $\alpha$  カットした類似度表から対象を分類する。この類似度表では推移律が成り立っていないので、もし S(A,B,X)=S(B,C,X)=1 なら S(A,C,X)=1 として成り立つようにし、対象をグループ分けする。

次に、Iris のデータについて説明する。Iris のデータとは、対象が 150 個、属性が 4 つ (がくの長さ、がくの幅、花びらの長さ、花びらの幅)のデータである。それぞれの対象が Setosa、Versicolour、Virginica のクラスどれかに属す。本論文では、Setosa をクラス1、Versicolour をクラス 2、Virginica をクラス 3 と表す。150 個の内、Setosa、Versicolour、Virginica それぞれ 50 個ずつである。([6] を参照)

## 実験

ファジィ集合、知識をランダムに決め、分類のエラー が少ないものを探した。分類のエラーが最も少なかっ たものを次に示す。

耒	6.	台形型フ	7ァジ,	4 集合
ユて	ο.	<b>ロルキノ</b>		$-\infty$

	左下	左上	右上	右下
がく・長	5.4	7.4	7.5	7.6
がく・幅	4.3	4.4	4.4	4.5
花·長	2.1	6.8	6.9	7.0
花·幅	0.1	1.0	1.4	2.0

表 7: 実験結果の知識の情報

No	がく・長	がく・幅	花·長	花·幅	クラス
61	5.0	2.0	3.5	1.0	2
92	6.1	3.0	4.6	1.4	2
107	4.9	2.5	4.5	1.7	3
130	7.2	3.0	5.8	1.6	3
142	6.9	3.1	5.1	2.3	3
144	6.8	3.2	5.9	2.3	3
146	6.7	3.0	5.2	2.3	3
148	6.5	3.0	5.2	2.0	3

表 6 のファジィ集合、表 7 の知識、 $\alpha$  カットの値 0.87 を用いクラスタリングをした時、エラーが最も 少なかった。この設定の時のエラー個所は、6 箇所であった。No.71 の対象:2 である所が 3、No.78 の対象:2 である所が 4、No.107 の対象:3 である所が 2、No.120 の対象:3 である所が 2、No.134 の対象:3 である所が 2、No.135 の対象:3 である所が 2 であった。

# 5 終わりに

私達は、[3] で提案した希少さを考慮した類似度をファジィ情報システムでも計算できるように類似度の式を改良した。そして、いくつかの例を用いて、類似度の特徴を示した。また、この類似度を用いてIris のデータのクラスタリングを試みた。今後、さらに希少さを考慮した類似度を用いたクラスタリングの精度を上げるため、いろいろな改良を試みていきたい。

# 参考文献

- [1] M. Matsumoto, M. Emoto, R. Intan, M. Mukaidono, "A Proposal of Similarity between Two Objects based on Uniqueness Measure", Proceeding of Intech 2003, pp.354-358.
- [2] M. Emoto, R. Intan, M. Matsumoto, M. Mukaidono, "Mathematical Properties of Similarity Dealing with Uniqueness Measure", Proceeding of Intech 2003, pp.812-817.
- [3] 松本 麻奈美, 江本 全志, インタン ローリー, 向殿 政男: "属性値の希少さを考慮した類似度の提案", 第 19 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.693-696, (2003).
- [4] 山口 智浩, 脇谷 康一, 谷内田 正彦: "情報量を 考慮した関係記述の類似度に基づく家の初期構 造概念の学習", 情報処理学会誌, Vol37, No.11, pp.1906-1917, (2001).
- [5] L.A. Zadeh, "Similarity Relations and Fuzzy Orderings", Inform. Sci.3(2), pp.177-200, (1970).
- [6] UCI repository of machine learning databases and domain theories, http://www.ics.uci.edu/ mlearn/MLRepository.html

## 連絡先

江本 全志 明治大学 経営学部

〒 214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1 6404

Phone: 044-934-7442, Fax: 044-934-7912

E-mail: masashi@isc.meiji.ac.jp

# 言語表現に基づく時系列データの検索について

# Retrieval of Similar Data of Time Series with Natural Language Expression

馬野 元秀 篠原 貴之 瀬田 和久 Motohide Umano Takayuki Shinohara Kazuhisa Seta

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科
Department of Mathematics and Information Sciences
College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

**Abstract** We have many kinds of data of time series such as daily temperatures and daily stock prices. Methods of analyzing it usually assume stochastic model. We, however, understand it through its global trend such as "mildly increasing," and "sharply decreasing." In this paper we propose a method to express trends of time series in natural language and we apply the method to retrieval of similar data of time series.

## 1. はじめに

時系列データとは、時間順に並んだ数値データのことで、例えば、毎日の気温の変化や株価の移り変わりなど、我々の身近に数多く存在している。時系列データを解析するための手法は、確率過程モデルを想定しており[1]、これに基づいた計算機用ソフトウェアも数多く存在している。しかし、我々人間は時系列データを理解するのに、確率モデルを用いているとは思えない。全体的な傾向を言葉で表現することによって理解しているように思われる(もちろん、特徴的な局所的傾向にも注目しており、全体的な傾向と局所的な特徴を組み合わせて時系列データを理解していると思われる)。

例えば、図 1 は横軸に時間軸 t、縦軸に値 x を とった時系列データのグラフである。このグラフは、はじめは 50 付近を行ったりきたりしていて、少しずつ増加しているので、例えば、「全体的に緩やかに増加していく」と表現することができるだろう。本研究は、このように時系列データを言葉によって表現し、さらに与えられた時系列データと類似したものを言葉レベルの類似度に基づいて大雑把に検索できるシステムを作成することを目的としている。

本論文では、与えられた時系列データの全体的な傾向を言葉により表現する方法と、これを用いた時系列データの類似検索の方法について述べる。

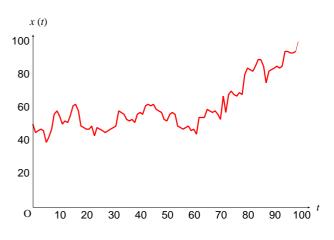


図 1: 時系列データの例(その1)

# 2. 時系列データの言葉による表現

時刻0から $t_c$ までに適当な時間間隔でサンプリングされたデータについて考える。

## (1) ファジィ集合による時系列データの区間分割

まず、時間が進むにつれてどのようにデータが変化するかを、前期、中期、後期という区間に分けて考える。このとき、前期、中期、後期は明確に分ける事ができないので、図2のようなファジィ集合と考える。これらのファジィ集合は時系列データの種類などによって変える必要があるため、ユーザーが定義できるようにしている。デフォルトの

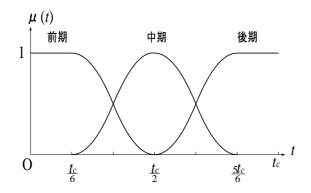


図 2: 区間のファジィ集合

定義は次のようにしている。

$$\mu_{\text{fil}}(t) = Z(t; \frac{t_c}{6}, \frac{t_c}{2}) \tag{1}$$

$$\mu_{\text{ph}}(t) = pi(t; \frac{t_c}{6}, \frac{t_c}{2}, \frac{5t_c}{6}) \tag{2}$$

$$\mu_{\text{\&H}}(t) = S(t; \frac{t_c}{2}, \frac{5t_c}{6}) \tag{3}$$

ここで、関数 Z、pi、S は実数値上で定義される標準関数で 2 次曲線により定義されている [2]。

#### (2) 重み付き平均値の算出

全体的な傾向を調べるために、まず、前期、中期、後期における代表的な値を求める。ここでは平均値を用いる。しかし、前期、中期、後期はファジィ集合なので、ファジィ集合のメンバシップ値による重み付き平均値 m を次の式により求める。

$$m_{\boxtimes \parallel} = \frac{\sum x(t)\mu_{\boxtimes \parallel}(t)}{\sum \mu_{\boxtimes \parallel}(t)} \tag{4}$$

そして、前期から中期への、中期から後期への変化の仕方を調べるために、それぞれの変化量dを次の式で計算する。

$$d_{\hat{\mathbf{n}}\hat{\mathbf{H}}\to\mathbf{p}\hat{\mathbf{H}}} = m_{\mathbf{p}\hat{\mathbf{H}}} - m_{\hat{\mathbf{n}}\hat{\mathbf{H}}} \tag{5}$$

$$d_{\text{中} \text{\tiny{$\mathfrak{H}}} \to \text{\tiny{$\mathfrak{K}}$} \text{\tiny{$\mathfrak{H}}$}} = m_{\text{\tiny{$\mathfrak{K}}$} \text{\tiny{$\mathfrak{H}}$}} - m_{\text{\tiny{$\mathfrak{P}}$} \text{\tiny{$\mathfrak{H}}$}} \tag{6}$$

図 1 の時系列データの場合は、重み付き平均値は、 $m_{\rm fil}$  が 48.76、 $m_{\rm til}$  が 50.84、 $m_{\rm til}$  が 74.28となり、 $d_{\rm fil}$   $d_{\rm til}$   $d_$ 

#### (3)変化量のファジィ集合

次に、求まった各変化量を言葉に変換する。そのために図3のような変化量のファジィ集合を用いる。これにより、変化量を言葉とそのメンバシッ

プ値に変換できる。この変化量のファジィ集合も区間のファジィ集合と同様、時系列データの種類によって変える必要があるため、ユーザーが定義できるようにしている。デフォルトの定義は次のようにしている。 $x_a$  をその時系列データ x(t) 全体の最小値、 $x_b$  を最大値とするとき、

$$\mu_{$$
大きく減少 $}(d) = Z(d; x_a - x_b, \frac{x_a - x_b}{2})$  (7)

$$\mu_{ \oplus \circlearrowleft \, \mathrm{SN減少}}(d) = pi(d; x_a - x_b, \frac{x_a - x_b}{2}, \frac{x_a - x_b}{6}) \quad (8)$$

$$\mu_{\text{$\psi$-\sigma_d$}}(d) = pi(d; \frac{x_a - x_b}{2}, \frac{x_a - x_b}{6}, 0)$$
 (9)

$$\mu_{\text{IELET}}(d) = pi(d; \frac{x_a - x_b}{6}, 0, \frac{x_b - x_a}{6}) \tag{10}$$

$$\mu_{\mathcal{P} \cup \dot{\mathcal{H}}_{m}}(d) = pi(d; 0, \frac{x_b - x_a}{6}, \frac{x_b - x_a}{2})$$
 (11)

$$\mu_{\text{中ぐらい増加}}(d) = pi(d; \frac{x_b - x_a}{6}, \frac{x_b - x_a}{2}, x_b - x_a)$$
 (12)

$$\mu_{\text{tid} < \text{#m}}(d) = S(d; \frac{x_b - x_a}{2}, x_b - x_a)$$
 (13)

これらのファジィ集合に対する  $d_{\rm nijj \to phj}$  と  $d_{\rm phj \to \ell j}$  の値を計算し、メンバシップ値が正になるものが対応する言葉となる。このとき正になるメンバシップ 関数が 2 つあるようにする。

図 1 の時系列の場合は、x(t) の最大値が 100、最小値が 40 なのでファジィ集合は次のようになる。

$$\mu_{$$
大きく減少 $}(d)=Z(d;-60,-30)$ 
 $\mu_{$ 中ぐらい減少 $}(d)=pi(d;-60,-30,-10)$ 
 $\mu_{$ 少し減少 $}(d)=pi(d;-30,-10,0)$ 
 $\mu_{$ ほぼゼロ $}(d)=pi(d;-10,0,10)$ 
 $\mu_{$ 少し増加 $}(d)=pi(d;0,10,30)$ 
 $\mu_{$ 中ぐらい増加 $}(d)=pi(d;10,30,60)$ 
 $\mu_{$ 大きく増加 $}(d)=S(d;30,60)$ 

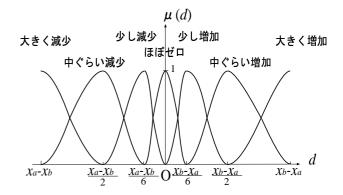


図 3: 変化量のファジィ集合

表 1: 評価表

中期 → 後期 前期 → 中期	大きく減少	中ぐらい減少	少し減少	ほぼゼロ	少し増加	中ぐらい増加	大きく増加
大きく減少	急激に減少	急激に減少	緩やかに減少	緩やかに減少	緩やかに減少	一時的に減少	一時的に減少
中ぐらい減少	急激に減少	急激に減少	緩やかに減少	緩やかに減少	緩やかに減少	一時的に減少	一時的に減少
少し減少	緩やかに減少	緩やかに減少	緩やかに減少	だいたい一定	だいたい一 定	緩やかに増加	緩やかに増加
ほぼゼロ	緩やかに減少	緩やかに減少	だいたい一定	ほぼ一定	だいたい一定	緩やかに増加	緩やかに増加
少し増加	緩やかに減少	緩やかに減少	だいたい一定	だいたい一定	緩やかに増加	緩やかに増加	緩やかに増加
中ぐらい増加	一時的に増加	一時的に増加	緩やかに増加	緩やかに増加	緩やかに増加	急激に増加	急激に増加
大きく増加	一時的に増加	一時的に増加	緩やかに増加	緩やかに増加	緩やかに増加	急激に増加	急激に増加

これらに基づいて各変化量を言葉に変換すると、 $d_{\rm nim}\to \rm phy$  に対して、0.97のメンバシップ値で「ほぼゼロ」が、0.03のメンバシップ値で「少し増加」が言える。同様に、 $d_{\rm phy}\to \rm ky}$  に対しては、0.46のメンバシップ値で「少し増加」が、0.54のメンバシップ値で「中ぐらい増加」が言える。

## (4) 全体の評価と確信度

ここまでで、前期から中期にかけての変化と、中期から後期にかけての変化を言葉に変換できたので、最後に、これらを用いて全体的な評価を得ることを考える。そのために表1を用いる。

表1は縦に前期から中期への変化量のファジィ集合を、横に中期から後期への変化量のファジィ集合をとり、表の対応する要素をみると全体的な結果が分かる。変化量のファジィ集合のすべての組合せについて全体評価を求め、さらに各変化量のファジィ集合のメンバシップ値の積をその評価の確信度とする。ひとつの時系列データに対する評価が、表より同じ全体的評価が得られる場合は、和をその評価の全体的な確信度とする。

この表1も時系列データの種類などによって変える必要があるため、ユーザーが定義できるようにしている。

図1の場合は、前期から中期への変化と、中期から後期への変化の組合せが、(ほぼゼロ 少し増加)の確信度が0.45、(ほぼゼロ 中ぐらい増加)の確信度が0.51、(少し増加 少し増加)の確信度が0.01、

(少し増加 中ぐらい増加) の確信度が 0.02 であるので、表によりそれぞれ、「だいたい一定」の確信度が 0.45、「緩やかに増加」の確信度が 0.51、「緩やかに増加」の確信度が 0.01、「緩やかに増加」の確信度が 0.02、となり、まとめると、「だいたい一定」の確信度が 0.45、「緩やかに増加」の確信度が 0.54 である。

この方法は、前期から中期への変化量と、中期から後期への変化量を用いて、表1のようなファジィルールを用いて、×-+法でファジィ推論をしていることになる(結論部が数値ではないので、重心をとることはできない)。

#### (5) 例

以上の方法を他の例に適用すると図 4~図 6 のようになる。言葉による全体的な傾向の表現はグラフの下に書いてある。確信度がしきい値よりも小さいものは省略することも可能であるが、今回は省略せずに、すべてを書いてある。

## 3. 類似データ検索への応用

多くの時系列データが存在している時に、1つの 時系列データを与え、これと似ているものを検索 する場合への応用について考える。

そのためには、2つの時系列データAとBが与えられたときに、それらがどのくらい類似しているかを示す指標として、AとBの距離を定義できれば、距離が小さい程、より類似していることに

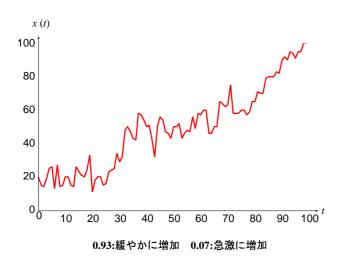


図 4: 時系列データの例 (その2)

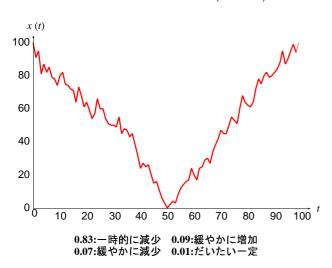


図 5: 時系列データの例 (その3)

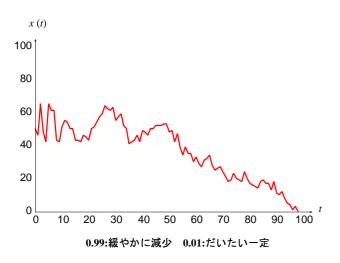


図 6: 時系列データの例(その4)

なる。全体評価の言語表現の集合 W を

W = { 急激に減少、緩やかに減少、 だいたい一定、ほぼ一定、 緩やかに増加、急激に増加 }

とするとき、時系列データAとBの距離D(A,B)は次の式によって求める。

$$D(A, B) = \sum_{w \in W} |C_w(A) - C_w(B)|$$
 (14)

ここで、 $C_w(A)$  は時系列データAの全体評価がwの確信度を指す。

例として、図1と図4の距離を求めると、両方の全体評価を見比べて、確信度の差は、「だいたい一定」が0.45、「緩やかに増加」が0.93-0.54=0.39、「急激に増加」が0.07であり、和をとると0.91であるので、図1と図4の距離は0.91となる。

同様に図 1 と図 5、図 1 と図 6 の距離を求めると、それぞれ、1.79、1.97 となり、図 1 と最もよく類似している時系列データは、図 4 となる。

## 4. おわりに

本論文では、各区間の平均値の変化量を求める ことによりグラフの増減傾向を捉えて、時系列デー タの全体的な傾向を言葉によって表現する方法に ついて述べた。

今後は、平均値だけではなく分散やその他の統計量を用いて、グラフの増減傾向以外の特徴を捉えることにより、言葉のバリエーションを増やして行きたい。

また、今回は全体的な傾向だけを考えたが、グラフの一部分が特徴的な場合が考えられる。そのような場合についても検討していきたい。

# 参考文献

- [1] 赤池 弘次、北川 源四郎、時系列解析の実際 I、朝 倉書店 (1994)
- [2] Zadeh, L.A., "Fuzzy Logic and Approximate Reasoning," Synthese, Vol.30, pp.407–428 (1975).

[問い合わせ先]

〒 599-8531 堺市学園町 1-1 大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科 馬野 元秀

TEL: 072–254–9675 FAX: 072–254–9930

E-mail: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

# ファジィ制約と遺伝的アルゴリズムによる選挙区の区割り画定

# Electoral Districts Determination Using Genetic Algorithm and Fuzzy Constraints

中尾一成

畠中利治

魚崎勝司

Issei Nakao Toshiharu Hatanaka Katsuji Uosaki

大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

Abstract: Electoral districts determination is a complex issue that is performed with not only consideration of fairness but also the circumstances of municipalities. We have proposed the optimization based determination method for single seat election using the genetic algorithm. Our method gives desirable districts, but it required much computation burden because of strict constraints. In this paper, we introduce fuzzy constraints in search process of the genetic algorithm to reduce computational cost. Numerical studies show that the districts by the modified approach are equivalent to the previous result.

# 1 はじめに

小選挙区の区割りは、1票の格差を小さくすることに加え、選挙区の地理的条件などを考慮して、できるだけコンパクトな選挙区となるようになされている。このような区割りの決定や改定の作業が人手で行われると、非常に大きなコストを要することになり、さらに、恣意的な区割りが行われる危険性も指摘されている。また、近年、いわゆる平成の大合併として、市町村の合併が進んでいる。このために、国政選挙のみならず、地方選挙においても、選挙区の見直し作業が必要になることが予想され、計算機による支援システムの開発により、これらの作業負荷を大きく低減できると期待されている。

このため、最適化に基づく選挙区の区割り問題 [1] が研究されてきており、日本の衆議院の小選挙区を対象に、斉藤らは相互結合型のニューラルネットワークを利用した区割り画定法を提案している [2].これに対して、我々は地域のつながりを定量評価するための隣接情報テーブルと遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた小選挙区の区割り手法を提案した [3].この手法では、GAを用いていることから、評価関数や制約条件の設計に自由度があり、実際の選挙区画定への応用が容易であったが、選挙区の満たすべき制約条件が厳しい場合に、探索課程において致死遺伝子が多く発生してしまい、計算負荷が大きいという問題点があった.

一方で、Bhuvanesh らは、制約条件をファジィ化し目的 関数として考えるファジィ制約条件を提案している[4]. ファジィ制約条件を導入することにより制約条件が緩和 され、探索課程における致死遺伝子の発生を減少させることができる.そこで、本研究では、ファジィ制約条件を導入し制約条件を緩和することで、GAの探索性能を向上させるとともに、初期集団の生成法や突然変異を改良し、探索を効率化し計算量を軽減できることを示す.また、実際の大阪府のデータに基づいたシミュレーション結果を示し、本手法の妥当性を示す.

#### 2 選挙区の区割り問題の設定

小選挙区の区割りは , 一般的に以下のことを考慮して なされている .

- 1. 選挙区の人口格差を小さくする.
- 2. 関係の深い行政区画から選挙区を構成する.
- 3. 飛び地を持つ選挙区が存在しないようにする.
- 4. 都道府県に割り当てられた定数を増減させない.

ここで、飛び地を持つ選挙区とは地理的に離れた行政 区画を含む選挙区であり、4. は行政区画を持たない選挙 区を作らないことを意味する、従来の手法では、1 と 2 の条件を目的関数とし、3. および 4. を制約条件として いた、そのため、3 の条件を満たさない致死遺伝子が大 量に生成され、探索効率を阻害しているという問題点が あった、

そこで,本研究では,3 の条件をファジィ制約条件として目的関数とすることを考える.飛び地の数,行政区画を持たない選挙区の数(以下では,NOAREA の数という)をそれぞれ  $\psi_1,\psi_2$  とすると,それぞれに対するファ

ジィ制約条件  $f_i$ , (i = 1, 2) は,次のように表せる.

$$f_{i} = \mu(\psi_{i})$$

$$\mu(\psi_{i}) = \begin{cases} 1 & (\psi_{i} \leq 0) \\ \alpha & (\psi_{i} = x, 0 \leq x \leq \varepsilon) \\ 0 & (\varepsilon < \psi_{i}) \end{cases}$$

ただし, $\alpha, \varepsilon$  は,オペレータの決めたメンバーシップ関数によって決まる値である.以上のようにして,制約条件のファジィ化を行い, $f_i$  を目的関数として用いる.これによって,制約条件が緩和され,探索効率の向上が期待できる.

### 3 アルゴリズムの設計

#### 3.1 個体表現

個体表現は,交叉,突然変異によって致死遺伝子にならないような個体表現でなければならない.そこで,個体は図1に示すように,区割り対象の都道府県における選挙区を構成する市および郡や町村などの行政区画に等しい長さの数列で構成されるものとする.異なる選挙区に分割される人口の多い市については,あらかじめ適当な複数のエリアに分割して扱うようにする.また,各遺伝子座は,その行政区画が編入される選挙区の番号を遺伝子として持つものとする.

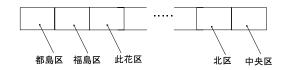


図 1: 個体表現

#### 3.2 隣接行列

隣接行列を求めるには,まず,図2に基づいて地理的条件,政治的条件,歴史的条件等ごとに,行政区画同士の関係を数値化したものを行列として用意する.そして,それぞれの行列からファジィ推論を用いて隣接行列を求めるという手順で隣接行列を作る.このときも,図2のファジィ集合に基づいてを用いる.非ファジィ化には Min-Max 法を用いる.ただし,隣接していない行政区画同士の値は0とする.

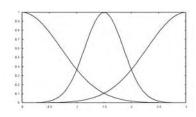


図 2: ファジィ集合

#### 33 初期集団の生成

初期集団は、選挙区が飛び地を持たず、その選挙区が 行政区画を持たないということがないように生成され る、以下の手順によって初期集団を生成する.

- 1. 選挙区に1つずつ行政区画を選び,それぞれ隣接している行政区画を候補とする.
- 2. 選挙区を 1 つ選び,候補の中から行政区画を選ぶ. 候補がなければ,選挙区を選び直す.
- 3. 選ばれた選挙区は候補を作成し直し,選ばれた行政区画を全ての選挙区の候補から削除する.
- 4. どの選挙区にも属さない行政区画があれば 2 へ . 例を図 3 に示す .

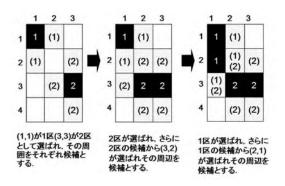


図 3: 初期集団の生成方法の例

#### 3.4 適応度

選挙区の区割りは,人口格差を小さくすることだけでなく,地域の歴史的つながり,道路や鉄道によるつながりなどが考慮される.ここでは,人口格差に対する適応度,地域同士の関係に対する評価量に加え,ファジィ制約条件の3つの目的関数を rank で評価することとする.

#### 3.4.1 人口格差に対する評価

人口格差に対する適応度は,人口が最大の選挙区と人口が最小の選挙区の人口比を考える.

$$f_1 = \frac{\min_{j \in [1,K]} Q_j}{\max_{j \in [1,K]} Q_j} \tag{1}$$

ただし,

$$Q_j = \sum_{i \in S_j} P_i$$

である.

また , ここで ,  $f_1$  , K , j (=1,2,,K) ,  $S_j=\{i|X_i=j\}$  , および  $P_i$  は , それぞれ , 人口格差に対する適応度 , 選挙区数 (都道府県に割り当てられた議員定数) , 選挙区番号 , 選挙区j に属する行政区画の集合 , および遺伝子

座iにおける行政区画の人口である. $f_1$ が小さいほど人口格差が大きいということになり,1票の格差も大きくなる.

#### 3.4.2 地域同士の関係に対する評価

地域同士の関係に対する適応度は,あらかじめ各行政 区画が他のどの区画と隣接しているかを示す隣接行列を 与えておくことで求められる.行列の要素を各地域同士 のつながりの強さを示す数値にすることで,地域同士の 関係に対する適応度を決めることができる.

$$f_2 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^{K} R_j \tag{2}$$

ここで, $f_2$ , $R_j$ ,M は,それぞれ,地域同士の関係に対する適応度,隣接行列における選挙区 j に属する行政区画同士の関係値の和であり,M はすべての行政区画の関係値の和である.

#### 343 ファジィ制約条件

飛び地の数と,NOAREA の数に対して,2 章で述べたファジィ制約条件(それぞれ  $f_e,f_n$ )を用いる.ただし,世代が進むのに伴って $\varepsilon$  の値が小さくなるように決める.提案手法で用いたメンバシップ関数は両方同じものである.メンバシップ関数を4 に示す.ここで, $\varepsilon=\beta_1-[N/\beta_2]$  である([] はガウス記号). $\beta_1,\beta_2$  は適当に決められる正の整数であり,N は世代数である.目的関数として用いるファジィ制約条件  $f_c$  は,

$$f_c = \frac{f_e + f_n}{2}$$

とする.また, $f_e=0$  または  $f_n=0$  である個体は致死遺伝子とする.

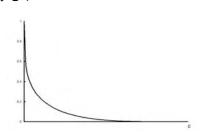


図 4: ファジィ制約条件のメンバシップ関数

#### 344 個体の評価

個体の適応度は,人口格差に対する適応度  $f_1$ ,地域同士の関係に対する適応度  $f_2$ ,ファジィ制約条件  $f_c$  の 3目的最適化問題として,rankにより評価し,パレート最適解を得る.

#### 3.5 選択

親の選択はトーナメント選択を用いる.トーナメント選択に置けるエントリー数は任意に決定できるよう

にした.また,エリート保存選択も併せて用いるものと する.

#### 3.6 遺伝的操作

遺伝的操作として,交叉と突然変異を施す.交叉は, ここでは,一様交叉を採用した.また,突然変異は,選 ばれた遺伝子座に対して小さな確率で,隣り合った選挙 区番号とランダムな選挙区番号のどちらかに変えるもの とした.

## 4 シミュレーション

3 節で述べた遺伝的アルゴリズムを用いて,大阪府の人口などのデータに基づいて,小選挙区の区割りを実際に作成した.

また,行政的なつながりを数値化した行列と,交通機関のつながりを数値化した行列を用意し,それらをファジィ推論を用いて隣接行列を作成した.遺伝的アルゴリズムの設定は,個体数 200,エリート保存 25 交叉確率 1.0,および突然変異確率 0.1 とし,トーナメント選択に置けるエントリー数は 50 とした.また,パラメータは,それぞれ  $\beta_1=5$ , $\beta_2=50$  とした.シミュレーションは 50 回試行した.5000 世代の世代交代を行ったときの, $f_1,f_2,f_c$  の平均を図に示す.図 50 が全個体の平均であり,図 50 がエリート個体の平均である.

また,5000 世代の世代交代の後,提案手法によって作成された選挙区のうち, $f_1+f_2$  の値が最も大きい個体の選挙区の区割りを図7に示し,比較のため現在の選挙区を図8に示す. シミュレーションでは,5000 世代交代でほぼ良好な結果が得られたが,必ずしも収束したとは言えないため,さらに探索世代を重ねる必要があると考えられる.しかし,実際の選挙区の区割りと提案手法による選挙区の区割りの人口格差を比べると,実際の人口格差は約1.46 倍であり,提案手法による選挙区の区割りにおける人口格差は約1.40 倍であり,十分に良い結果と判断できる.以前の手法と比べても得られた選挙区は同等であり,計算時間が大きく短縮されている.その他のシミュレーション結果の詳細は講演に際して示す.

#### 5 結論と課題

本研究では、小選挙区の区割りに遺伝的アルゴリズムを適用し、区割りの最適化を行った.さらに、初期個体の生成と突然変異の方法の改良、ファジィ制約条件の導入により、探索課程において致死遺伝子が大量に発生してしまうという問題点を解消し、計算負荷を軽減した.

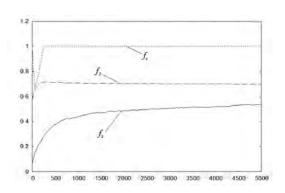


図5:全個体の平均

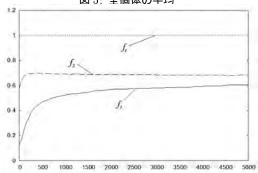


図 6: エリート個体の平均

また,人口格差と選挙区を構成する自治体の関係の度合いという2つの評価量に関する多目的最適化問題のパレート最適解を与えることが可能になった.

しかし,オペレータの知識を表現するためのメンバシップ関数といくつかのパラメータや隣接行列には,情報公開や公平を期すという観点からの工夫が必要があると考えられ,これらの決定法を検討しなければならない.また,提案手法は,選挙区の画定以外にも,社会的な資源の配分問題への適用が可能であることから,このような他の問題への適用も今後の課題としたい.

# 参考文献

- A. Mehrotra, E. L. Johnson and G. L. Nemhauser
   An Optimiz ation Based Heuristic for Political Districting, Management Science, Vol.44, No.44, pp.1100-1113, 1998
- [2] 斎藤, 武藤: ニューラルコンピューティングによる 小選挙区区割り手法,情報処理学会論文誌, Vol.37, No.4, pp.588-596, 1996
- [3] 中尾, 畠中, 魚崎: 遺伝的アルゴリズムによる小選挙 区の区割り決定に関する研究, 第 19 回ファジィシス テムシンポジウム講演論文集 pp.481-484,2003
- [4] Vijayakumar Bhuvaneshwaran and Reza Langari: Design Optimization using Genetic Algorithms

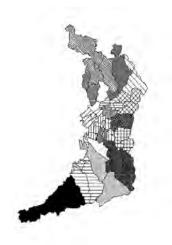


図 7: 提案手法による選挙区の区割り



図 8: 実際の選挙区の区割り

and Fuzzy Constraints and Fitness Functions , The IEEE International Conference on Fuzzy Systems , pp. 354-359 , 2003

- [5] A. Mehrotra, E. L. Johnson and G. L. Nemhauser : An Optimiz ation Based Heuristic for Political Districting, Management Science, Vol.44, No.44, pp.1100-1113, 1998
- [6] J.H.Holland: Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, 1975

#### 連絡先: 中尾一成

大阪大学大学院情報科学研究科情報数理学専攻 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 大阪大学 工学研究科 応用物理学系棟内 Phone:06-6879-7834 E-mail:issei\_n@ist.osaka-u.ac.jp

# 確率変数係数を含む2レベル線形計画問題に対する 単純リコースモデルに基づく対話型ファジィ計画法

Interactive fuzzy programming based on simple recourse model for two-level linear programming problems involving random variable coefficients

加藤 浩介 坂和 正敏 片桐 英樹 松永 佐斗志 Kosuke Kato Masatoshi Sakawa Hideki Katagiri Satoshi Matsunaga 広島大学 広島大学 広島大学 広島大学 広島大学

Hiroshima University Hiroshima University Hiroshima University

Abstract In actual decision making situations, we must often make a decision on the basis of vague information or uncertain data. In this research, focusing on the case that right side constants are random variables in two-level linear programming problems involving two decision makers with different priority, we reformulate it as two-level simple recourse problem and propose interactive fuzzy programming to derive a satisfactory solution through interaction in cosideration of balance between the satisfactory level to the DM at the upper level and those to the DMs at the lower level.

#### 1. はじめに

現実の社会においては,不確実なデータや情報に基づいて意思決定を行わなければならない場合が多く見受けられる.このよう不確実性を含む意思決定問題に対して,確率計画法やファジィ計画法がさまざまな形で発展してきている.

本研究では,優先権の異なる二人の意思決定者 (DM)を含む 2 レベル線形計画問題の制約式の右辺が確率変数である場合を考え,2 レベル単純リコース問題として定式化し,二人の意思決定者の協力関係の仮定の下で上位 DM との対話により下位 DM の満足度とのバランスを考慮した上位 DM の満足解を導出するという対話型ファジィ計画法 [4] の適用について考察する.

#### 2. 確率変数を含む 2 レベル線形計画問題

上位レベルの DM (DM1) と下位レベルの DM (DM2) がそれぞれの目的関数  $z_1', z_2'$  を最小にする問題で条件式の右辺の定数が確率変数であるような次のような問題

minimize 
$$z_1(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{c}_{11}\boldsymbol{x}_1 + \boldsymbol{c}_{12}\boldsymbol{x}_2$$
minimize  $z_2(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{c}_{21}\boldsymbol{x}_1 + \boldsymbol{c}_{22}\boldsymbol{x}_2$ 
subject to  $A_1\boldsymbol{x}_1 + A_2\boldsymbol{x}_2 = \boldsymbol{b}(\omega)$ 
 $\boldsymbol{x}_1 \geq \boldsymbol{0}, \boldsymbol{x}_2 \geq \boldsymbol{0}$ 

$$(1)$$

について考察する.ここで, $x_l$ ,l=1,2 は  $\mathrm{DM}l$  の  $n_l$  次元決定変数列ベクトル, $c_{1l}$ , $c_{2l}$  は  $n_l$  次元係数行ベクトル, $A_l$  は  $m\times n_l$  係数行列, $b(\omega)$  は m 次元確率変数列ベクトルである.

この問題に対する各意思決定者の満足解を導出する ためのアプローチとして,ここでは,単純リコースモ デルに基づく対話型ファジィ計画法について考察する.

#### 3. 2 レベル単純リコース問題

問題 (1) で, $A_1x_1+A_2x_2$  と $b(\omega)$  との差異を確率変数 ベクトル  $y^+=(y_1^+,\dots,y_m^+)^T$  と  $y^-=(y_1^-,\dots,y_m^-)^T$  を用いて  $y^+-y^-$  で表せば,定数ベクトル  $p_l,q_l,l=1,2$  と  $y^+,y^-$  から定められる  $R_l(x)=E\left[\min_{y^+,y^-}(p_ly^++q_ly^-)\right]$  をペナルティ(リコース)とした 2 レベル単純リコース問題は次のように定式化される.

$$\begin{array}{l}
\underset{\substack{\text{DM1 (} \pm \text{ft})\\\text{DM2 (} \mp \text{ft})}}{\text{minimize}} \ z_1'(x) = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + R_1(x) \\
\underset{\substack{\text{minimize}\\\text{DM2 (} \mp \text{ft})}}{\text{subject to}} \ z_2'(x) = c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + R_2(x) \\
subject to \ A_1x_1 + A_2x_2 + y^+ - y^- = b(\omega) \\
x_1 \ge 0, x_2 \ge 0, \ y^+, y^- \ge 0
\end{array} \right\}$$
(2)

いま, $b_i(\omega),\ i=1,\dots,m$  が互いに独立であると仮定すれば,それらの確率分布  $F_i(\cdot)$  を用いて

$$R_{l}(x) = E\left[\min_{y^{+}, y^{-}} (p_{l}y^{+} + q_{l}y^{-})\right]$$

$$= \sum_{i=1}^{m} p_{li}E[b_{i}] - \sum_{i=1}^{m} (p_{li} + q_{li}) \int_{-\infty}^{(Ax)_{i}} b_{i}dF_{i}(b_{i})$$

$$- \sum_{i=1}^{m} p_{li}(Ax)_{i} + \sum_{i=1}^{m} (p_{li} + q_{li})(Ax)_{i}F_{i}((Ax)_{i})$$

と表される .ただし , $(Ax)_i=\sum_{j=1}^{n_1}a_{ij}^1x_{1j}+\sum_{j=1}^{n_2}a_{ij}^2x_{2j}$ である . このとき

$$Z_{l}(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{m} p_{li} E[b_{i}]$$

$$+ \sum_{i=1}^{n_{1}} \left( c_{lj}^{1} - \sum_{i=1}^{m} a_{ij}^{1} p_{li} \right) x_{1j} + \sum_{i=1}^{n_{2}} \left( c_{lj}^{2} - \sum_{i=1}^{m} a_{ij}^{2} p_{li} \right) x_{2j}$$

$$+ \sum_{i=1}^{m} (p_{li} + q_{li}) \left\{ (Ax)_{i} F_{i}((Ax)_{i}) - \int_{-\infty}^{(Ax)_{i}} b_{i} dF_{i}(b_{i}) \right\}$$

とおけば,問題(2)は次の問題と等価となる.

minimize 
$$Z_1(x)$$
 $DM1(上位)$ 
minimize  $Z_2(x)$ 
subject to  $x \ge 0$ 

$$(3)$$

このとき, $Z_1(m{x}),\,Z_2(m{x})$  は凸関数であることが示されるので,問題(3) は2 レベル凸計画問題である.

## 4. ファジィ目標の導入と対話型ファジィ計画法

2 レベル単純リコース問題 (2) において,各意思決定者の目的関数  $z_l'(x)$ ,l=1,2 に対する判断のあいまい性を考慮するために,  $z_l'(x)$  をだいたいある値以下にしたい」というようなファジィ目標を導入すると,問題 (2) は次のように表せる.

$$\begin{array}{l} \underset{\text{DM1 ( 上位)}}{\text{maximize}} \ \mu_1(z_1'(x)) \\ \underset{\text{DM2 ( 下位)}}{\text{maximize}} \ \mu_2(z_2'(x)) \\ \text{subject to} \ A_1x_1 + A_2x_2 + y^+ - y^- = b(\omega) \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \ y^+, y^- \geq 0 \end{array} \right\} \ (4)$$

すなわち,

maximize 
$$\mu_1(Z_1(x))$$
 maximize  $\mu_2(Z_2(x))$  subject to  $x \ge 0$  (5)

である.問題(5)の満足解を導くために,坂和らにより提案された2レベル計画問題に対する対話型ファジィ計画法の適用について考察する.

まず ,  $\mathrm{DM1}$  と  $\mathrm{DM2}$  のうちで小さい方の満足度を最大化する問題

$$\underset{\boldsymbol{x} \geq \boldsymbol{0}}{\text{maximize}} \quad \min\{\mu_1(Z_1(\boldsymbol{x})), \mu_2(Z_2(\boldsymbol{x}))\} \tag{6}$$

を解くことから開始する.ここで,補助変数 v を導入すれば,問題 (6) は次のように書き換えられる.

$$\begin{array}{l}
\text{maximize } v\\ \underset{\boldsymbol{x} \ge 0, v}{\boldsymbol{x} \ge 0, v}\\ \text{subject to } \mu_l(Z_l(\boldsymbol{x})) \ge v, \ l = 1, 2
\end{array} \right}$$
(7)

ここで,メンバシップ関数  $\mu_l(\cdot)$  が非増加凹関数であるとすれば,問題 (7) は凸計画問題となるので逐次 2 次計画法 [2] などにより比較的容易に解くことができる.

問題(7)を解いて得られた解が DM1 にとって満足できる解であるならば,満足解に到達したことになるが,必ずしも DM1 がその解に満足するとは限らない.そこで得られた解に対するレベル間の満足度の比 $\Delta=\mu_2(Z_2(x))/\mu_1(Z_1(x))$  を考慮して,DM1 は自己のメンバシップ関数  $\mu_1(Z_1(x))$  に対する満足度の最小

許容度  $\hat{\delta} \in [0,1]$  を主観的に設定し, $\mathrm{DM1}$  の満足度を  $\hat{\delta}$  以上にするという条件を前提に,与えられた制約条件のもとで  $\mathrm{DM2}$  の満足度の最大化を試みるものとする.すなわち,問題

$$\begin{array}{l}
\text{maximize } \mu_2(Z_2(x)) \\
x \ge 0 \\
\text{subejct to } \mu_1(Z_1(x)) \ge \hat{\delta}
\end{array} \tag{8}$$

が解かれることになる.ここでもメンバシップ関数が 非増加凹関数であれば,問題(8) は凸計画問題となる ことから逐次2次計画法[2] により解くことができる.

問題 (8) を解くことによって  $\mathrm{DM1}$  は自己の設定した満足度に対する最小許容度  $\hat{\delta}$  以上の解が得られることになるが,最小許容度  $\hat{\delta}$  の設定値が高いほど, $\mathrm{DM2}$  の満足度は低くなるので, $\mathrm{DM1}$  と  $\mathrm{DM2}$  の満足度の相対的な差が大きくなり,両レベルの意思決定者の満足度のバランスが極端に悪くなってしまうことがある.このようなことを避けるために, $\mathrm{DM1}$  が最小許容度  $\hat{\delta}$  の値を譲歩することも考慮しなければならない.

 $\mathrm{DM1}$  は両レベルの意思決定者の満足度のバランスを考慮するために,両レベルの満足の比  $\Delta$  に許容範囲  $[\Delta_{\min}, \Delta_{\max}]$  を設ける.もし  $\Delta > \Delta_{\max}$  ならば, $\mathrm{DM2}$  の満足度に対して  $\mathrm{DM1}$  の満足度が小さすぎると考え, $\mathrm{DM1}$  は自己の最小許容度  $\hat{\delta}$  の値を増加させて更新する.更新された問題 (8) を解くことにより, $\mathrm{DM1}$  の満足度を増加させ, $\mathrm{DM2}$  の満足度を減少させる. $\Delta=1$  であれば,両レベルの意思決定者の満足度が等しくなる.

#### **5.** おわりに

本研究では確率変数係数を含む 2 レベル線形計画問題に対して,単純リコースモデルに基づく定式化を行った後,対話型ファジィ計画法の適用について考察し,対話型ファジィ計画法において解かれる問題がある条件の下で凸計画問題となることを示した.

#### 参考文献

- [1] 石井博昭, "確率論的最適化", 伊理 他編: 数理計画 法の応用 (理論編), 産業図書, pp. 1-40, 1982.
- [2] 坂和正敏, "数理計画法の基礎", 森北出版, 1999.
- [3] 坂和正敏, 石井博昭, 西崎一郎, "ソフト最適化", 朝倉書店, 1995.
- [4] 坂和正敏, 西崎一郎, "ファジィ2 レベル計画法", 石井 他編: ファジィOR, 朝倉書店, pp. 67-81, 2001.

#### 問い合わせ先

〒 739-8527 東広島市鏡山 1-4-1 広島大学大学院工学研究科 加藤 浩介

TEL: 082-424-7693, FAX: 082-422-7195 E-mail: kato@msl.sys.hiroshima-u.ac.jp

# 感性情報の分析を目的としたファジィ決定木の構成

# **Fuzzy Decision Tree Construction for Investigation of Kansei Information**

徳丸 正孝 村中 徳明 今西 茂 Masataka Tokumaru

Shigeru Imanishi Noriaki Muranaka

## 関西大学 工学部

Faculty of Engineering, Kansai University

Abstract: In recent years, a constructor is required to develop a product which is not only highly efficient and functional, but also attractive and easeful for users. It is difficult for constructors to investigate which part and element of product is closely related to attraction and ease-of-use with products. So we propose a method for investigation of Kansei information with Fuzzy C4.5 decision tree. In the case of investigating Kansei information from constructed decision tree, the rules decided by the tree are required to be simple and easy to understand. In this paper, we investigate construction of Fuzzy C4.5 decision tree by using an example of Kansei information such as usability of golf clubs. We examined variation in sensitivity of player's hitting golf balls with variable golf clubs. They answered the feeling of hitting with a golf club with SD method and we got some rules to judge the ease-of-hitting with golf club.

#### 1. はじめに

近年,製品の企画や設計において,定量的に評価 可能な製品の仕様のみでなく,製品の魅力や使いや すさが重要視されるようになった.このため,魅力 ある製品の分析や,使いやすい製品の設計を行うた めの工学的技術, すなわち魅力工学や人間工学に基 づいた製品設計手法が盛んに行われてきた.これら の手法では,既存の多くの製品について,被験者が 魅力的に感じるか、あるいは使いやすく感じるかな ど,被験者の感性に関わる評価をアンケートにより 調査し、それらの回答と製品の様々な物理量との関 係を解析している. 著者らは文献[1]において, C4.5 決定木により製品の使いやすさと魅力を分析する手 法を提案し,適用例としてゴルフクラブの「打ちや すさ」と「好み」について分析を行った.本手法は, ゴルフクラブの使用感について様々な項目について 感性評価を行い、「打ちやすさ」や「好み」がどのよ うな感性評価項目と密接に関係しているかを決定木 を用いてルール化している.感性評価は7段階のSD 法を用いて行ったが, C4.5決定木により有効なルー ルを得るためには,任意の閾値によって7段階の回 答値を23個のクラスに分類する必要がある.その ため,7段階のアンケートの回答が充分に反映され ないという問題がある.

そこで著者らは,堀ら[2]が提案したファジィC4.5 を用いて,アンケートの7段階の回答値を反映し,ア ンケートの回答に内在する曖昧性を考慮した分析手 法を提案した[3].作成された決定木から感性情報に 関するルールを抽出する場合,なるべく簡単で理解 しやすいルールが抽出されることが要求される.抽 出されるルールの複雑性やルール数は, 作成される 木の規模や構造により大きく変化するため、決定木 の構成を最適化することが重要である.そこで本研 究では , 構成された決定木における事例の分類誤差 に基づき,知識の抽出に最適な決定木規模および木 構造を決定する.

#### 2. ゴルフクラブの試打実験

本実験では,市販されているゴルフクラブについ て,クラブの特徴を表す36種類の物理量を計測し, なるべくスペックが異なるようにして選出した11本 のドライバー(1番ウッド)を用いて試打アンケート を実施した.今回の調査では,なるべく正確な評価 が行われるようにするため,ゴルフ上級者20名を被 験者とした.本実験で採用した被験者の平均年齢は 42歳, ハンディキャップは平均15である. 試打アン ケートは屋外ゴルフ練習場にて実施した.被験者は 各ドライバーについて,実際に数回球を打ち,その ドライバーの印象についての感性評価を7段階のSD 法で回答してもらった.

一般に試打によるゴルフクラブの感性評価では, 打球という行為における一連の動作が全て関係して いると考えられる. つまり, 被験者は球を打つ瞬間 の感触のみでなく,バックスイングや振りはじめの 感触、さらには打球時の音質などの様々な要素に よってクラブを評価していると考えられる.そこで, アンケートに用いた感性評価項目には,クラブの寸 法に関連した「長さ(長い 短い)」や「重さ(重い 軽い)」, 打球に直接関係する「インパクトのタイ ミング(取りやすい 取りにくい)」や「シャフトの

表1 試打アンケートに用いた属性

アンケート	属性	
打ちにくい	打ちやすい	打ちやすさ
飛ばない	飛ぶ	飛距離
飛距離パラツク	飛:安定	飛距離安定性
方向性良	方向性悪	打球方向性
球高い	球低い	打球高さ
高:安定	高:パラツク	打球高さ安定性
スピンかからない	スピンかかる	バックスピン量
構え易い	構え難い	構えやすさ
細しい	太い	グリップ太さ
重い	軽い	クラブ重さ
楽に振れる	しんどい	スイングの労力
振り難い	振り易い	クラブの操作性
タイミング取り易い	難い	インパクトのタイミング
頼りない	しっかり感	シャフトの剛性
打感悪	打感良	打球感
球離速い	球離遅い	球離れ
粘りある	粘りない	シャフトの粘性
球捕まる	球捕まらない	球の捕まり度
打球音悪	音良い	打球音質
打球音高い	音低い	打球音高
打球音小さい	音大きい	打球音量
好き	嫌い	好み
打球が右へ	左へ	打球方向
長い	短い	クラブ長さ

剛性(しっかり感がある 頼りない)」などに加え,「打球音質(良い 悪い)」や「飛距離安定性(安定ばらつく)」など,打球という行為の結果生じる要素に関しても項目に採用した.表1にアンケートに用いた24種類の感性評価項目を示す.感性評価項目の中には,本研究の目的である製品の「使いやすさ」を調査するための項目も含まれている.今回実験に採用した製品であるゴルフクラブは,その用途は球を打つことであるので,「ゴルフクラブの使いやすさ」を表す指標として感性評価項目「打ちやすさ(打ちやすい 打ちにくい)」を採用した.

試打は,5分間自由に打球してもらい,5分後に24個の項目について回答してもらった.試打の順序や疲労による体力や評価能力の変化を考慮して,各被験者とも11本のドライバーのうち4本を2回試打してもらった.つまり,アンケート回答事例数は被験者20名×ドライバー15本の合計300事例である.これらの事例に基づいて,ゴルフクラブの「打ちやすさ」の解析を行う.

# 3. ファジィ決定木による「打ちやすさ」の 解析

C4.5 は , J.R.Quinlan によって提案された決定木作成アルゴリズムである[4] . 本手法は , 事例を分割した際の利得比が最大となる属性で事例を分割していくものであり , 比較的シンプルな木が作成されることが知られている . いま ,訓練事例の集合をT , 属性を $X_p$  とする . ある属性 A に着目し , 属性 A とその他の属性との関連を調べるとき , 属性 A を決定属性 , そ

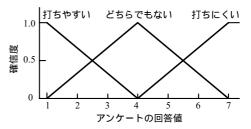


図1 属性「打ちやすさ」のメンバーシップ関数

の他の属性を評価属性という. 例えば, 本研究にお いては、「打ちやすさ」の解析の場合、属性「打ちや すさ」が決定属性,その他の感性評価項目が評価属 性となる .決定属性Aの取りうる値がk個の場合 ,値 iをとる事例の集合をクラス C<sub>i</sub>(i:1 ~ k)とする . 評価 属性 $X_0$ の属性値がn個の値を取るとすると,訓練事 例の集合 Tは,評価属性  $X_0$  により  $T_1, T_2, ..., T_n$  の部分 集合に分割される、アンケートにおける各属性の回 答値は1~7の7段階であるので,任意の閾値により 属性値を幾つかのクラスに分割する必要がある. C4.5による分析では、7段階の属性値を3個のクラス に分け,アンケートの回答値1~3を+,4を0,5~ 7を-と表現していた. 例えば, 評価属性「シャフト の剛性」においては,+が「しっかり感がある」,-が 「頼りない」を意味し,0が「どちらでもない」を表 していた[1].しかし,この方法ではアンケートの7 段階の回答が充分に反映されておらず,回答の曖昧 性についても考慮されていない、この問題を解決す るために,本研究ではファジィC4.5により各属性の 分割クラスをファジィ集合化している.決定属性の クラス「打ちやすい」、「打ちにくい」、「どちらでも ない」に対する各データの確信度は図1に示すメン バーシップ関数により求められる .つまり ,属性「打 ちやすさ」の回答値が2である事例は,クラス「打 ちやすい」に属する確信度0.66の事例と、クラス「ど ちらでもない」に属する確信度 0.33 の事例という 2 個の事例として扱われる.

事例の集合 Sについて , クラス  $C_i$ に属する事例の確信度の和を  $freq(C_i,S)$ とし , 集合 Sに含まれる事例の確信度の和を S と表す . このとき , 集合 Sの エントロピー info(S)は , 次式で与えられる[4] .

$$info(S) = -\sum_{i=1}^{k} \left\{ \frac{freq(C_i, S)}{|S|} \times \log_2 \frac{freq(C_i, S)}{|S|} \right\}$$
 (bit) (1)

したがって,訓練事例の集合 Tについて(1)式を適用することで,集合 Tのエントロピー info(T)が求まる.info(T)は,集合 Tに含まれる任意の事例が属するクラスを特定するのに必要な情報量の平均値となる

また ,属性 $X_{\rho}$ によって事例が分割された場合のエントロピーを  $info_{\chi_{\rho}}(T)$ とするとき , 部分集合上での荷重平均により次式で表される .

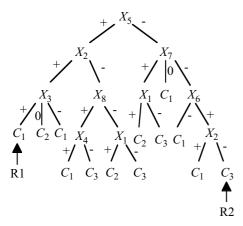


図 2: ツリー構造で表記される決定木の例

$$info_{X_p}(T) = \sum_{j=1}^n \frac{|T_j|}{|T|} \times info(T_j)$$
 (2)

ただし, $T_i$ がファジィ集合のとき,各事例が集合  $T_i$ に属する度合いは図1と同様にメンバーシップ関数で表される.このとき,事例の確信度は,各事例の分類前の確信度の値と属性値が $T_i$ に属する度合いとの積で与えられる.

属性  $X_{\rho}$  で分割されることによる情報量利得  $gain(X_{\rho})$  は次式で表される .

$$gain(X_p) = info(T) - info_{X_p}(T)$$
(3)

C4.5 では,任意の事例が属するクラスを特定するための情報量ではなく,分割結果自体を伝達するために必要な情報量である利得比基準を採用している.属性 $X_{
ho}$ で事例の集合Tが分割された場合の分割情報量  $split\ info(X_{
ho}$ は次式で表される.

split info
$$(X_p) = -\sum_{j=1}^n \frac{|T_j|}{|T|} \times \log_2 \left(\frac{|T_j|}{|T|}\right)$$
 (bit) (4)

これは,集合 Tを k個の部分集合に分割したときの全情報量である.一方,情報量利得は,クラス分割に役立つ情報量の割合を表すので,情報量利得 gain ratio(X) は次式で表される

$$gain \ ratio(X_p) = gain(X_p) / \ split \ info(X_p)$$
 (5)

C4.5では,情報量利得  $gain\ ratio(X)$ を最大にする属性で集合 Tを分割する.さらに,分割後の部分集合  $T_1, T_2, ..., T_n$ のそれぞれについて,上位の枝において採用された属性以外の属性で分割し,同様の手順で分割属性を選出する.分割された部分集合に含まれる事例が属するクラスが,全クラスに対して一定の割合を占める場合に葉節点となる.

作成された決定木は一般的に , 図 2 に示すように ツリー構造で表現される 枝に記されている記号は , 各属性が取る値を表している . 例えば , 属性  $X_s$  は  $\{+,-\}$ の 2 個の属性値を取り ,  $X_s$ は $\{+,0\}$  ,  $\{+,0$ 

の3個の属性値を取る.任意の葉に到達するまでに通過する枝節点の属性と,その属性値によって,その葉節点のクラスを特定する為のルールが作成される.一例として,図2の決定木の左右端の葉節点に相当するクラスを特定するためのルールR1およびR2を以下に示す.

R1: 
$$X_5(+)$$
 and  $X_2(+)$  and  $X_3(+)$  Then  $C_1$  (6)

R2: 
$$X_5(-)$$
 and  $X_7(-)$  and  $X_6(+)$  and  $X_2(-)$  Then  $C_3$  (7)

ここで ( )内は属性 X. の属性値を表す . このように して , 葉の数だけルールが作成される .

# 4. 分類誤差に基づく木構造の最適化

ファジィ C4.5 決定木では,葉節点を構成する条件によって,作成される決定木の規模や構造が大きく変化する.作成される決定木から事例分類のためのルールを抽出し,そのルールに基づいて感性情報の分析を行う場合,木の構造はなるべく簡単であることが望ましい.しかしながら,事例の分類精度が低い決定木から抽出される知識は,当然信頼性を欠くものとなるため,ある程度の分類精度が保たれていることが必要となる.そこで,本論文では分類誤差による木構造の最適化を行う.

本研究におけるファジィ決定木では,葉節点を構成する条件を以下の通りに設定している.

1.分割された部分集合に含まれる各事例が属するクラスが、全クラスに対して一定の割合を占める(最小占有率)

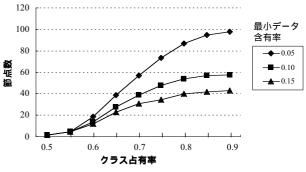


図3:木構造の変化

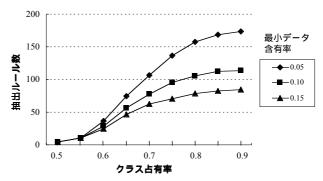


図 4: 抽出ルール数の変化

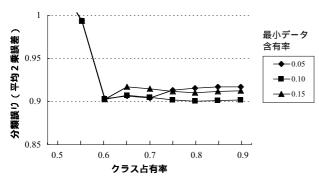


図 5: 事例の分類誤差の変化

2.分割された部分集合に含まれる事例数が,全データ数に対する一定の割合を下回る(最低データ含有率)

図1に示した通り,ゴルフクラブの打ちやすさに 関するクラスは3個である.抽出されるルールの有 意性を保つためには、最小占有率は少なくとも50% 程度は必要であると考えられる.そこで,最小占有 率を 50% ~ 90%, 最低データ含有率を 5% ~ 15% に それぞれ変化した場合の決定木における事例の分類 誤りについて調査した.事例の分類誤りには,アン ケートの7段階回答値と決定木による推定値(7段 階)との2乗誤差を用いた.最小占有率および最低 データ含有率を変化させた場合の木構造の変化を図 3に,抽出されたルール数の変化を図4に示す.クラ ス占有率が高くなると,複雑な木が生成される傾向 にあるため,節点数およびルール数が増大している ことがわかる.また、最小データ含有率が低くなる と 数少ない事例を正確に分類しようとするために, 木構造が複雑になる傾向が見られる.

次に 各条件において抽出されたルールによって, 事例の分類を行い,平均誤差を求めた.全事例に対 する分類の平均2乗誤差を図5に示す.クラス占有 率が高い場合には,複雑な木構造のために,各事例 とも正確に分類される傾向がある.したがって,ク ラス占有率が高くなると分類誤差がおおむね低くな る傾向が見られた.ここでは,クラス占有率0.8,最 小データ含有率 0.10 の場合が最も分類誤差が小さ かった.しかし,クラス占有率0.6,最小データ含有 率0.10の場合も,比較的分類誤差が小さくなった.ク ラス占有率0.6,最小データ含有率0.10の場合の抽出 ルール数は29個であり,抽出されたルールから「打 ちやすさ」と関係の深い属性を調べるのに適した数 であると考えられる.しかしながら,メンバーシッ プ関数の形状や属性の分割数により、さらに最適な 木が作成される可能性がある.本研究では,図1に 示したように三角形のメンバーシップ関数を採用し, 3つのクラスに事例を分割している.この場合,中 央のクラス「どちらでもない」のファジィ集合が,他 の2個のクラスの集合に対して大きくなるので,各 事例ともクラス「どちらでもない」に分類される傾 向が強くなる. したがって, 抽出されるルールにつ いても、クラス「どちらでもない」に関するものが 多くなる . クラス占有率 0.6 , 最小データ含有率 0.10 の場合において抽出された29個のルールのうち,17 個はクラス「どちらでもない」に関するルールで あった、クラス「打ちやすい」に関するルールはわ ずかに3個であり、「打ちやすさ」の分析という意味 においては,図1のメンバーシップ関数は適してい るとはいえない.著者らは文献[5]において,メン バーシップ関数の形状や属性の分割を変更すること により、木構造やルール数が変化することを確認し ている.したがって,今後はメンバーシップ関数の 形状や属性の分割数を最適化することにより、さら に最適な木の構成を行うことが可能であると考えら れる.

#### 5. まとめ

本稿では,ファジィC4.5を用いて製品の使いやすさに関する感性情報を分析する手法を示し,実例としてゴルフクラブの打ちやすさについての解析を行った.クラス占有率や最小データ含有率により決定木の構成が変化するため,これらのパラメータ変化に対する木構造や抽出ルール数の変化を調査し,事例データの分類誤差に基づいて最適な木の構成を行った.今後はメンバーシップ関数の形状や属性分割数に対する木構造の最適化について分析を行う.

#### 参考文献

- [1] 徳丸 正孝他:「決定木による製品の使いやすさと魅力 の解析」,日本感性工学会 感性工学研究論文集, Vol.2, No.2, pp.65-72, 2002.
- [2] 堀 和憲 他:「ファジィ決定木生成法 ファジィ C4.5 と その改良」, 第 15 回ファジィシステムシンポジウム講 演論文集, pp.515-518, 1999.
- [3] 徳丸 正孝 他:「ファジィ決定木による製品の使いやす さと魅力の解析」, 第 19 回ファジィシステムシンポジ ウム講演論文集,pp.331-332,2003.
- [4] Quinlan, J. R.: C4.5: Program for Machine Learning, Morgan Kaufmann Publishers, 1993.
- [5] 徳丸 正孝 他:「ファジィ決定木による製品の使いやす さと魅力の解析II」,日本知能情報ファジィ学会評価問 題研究会 第8回曖昧な気持ちに挑むワークショップ講 演論文集,CD-ROM,2003.

#### [問い合わせ先]

〒 564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-36 関西大学 工学部 電子工学科

徳丸 正孝

Tel: 06-6368-0883, Fax: 06-6388-8843 E-mail: toku@ipcku.kansai-u.ac.jp

# ファジィ理論を用いる AHP に関する研究 A Study on AHP using Fuzzy Theory

小谷 直也 Naoya Kotani 大阪国際大学大学院 Graduate School of Osaka International University 古殿 幸雄
Yukio Kodono
大阪国際大学
Osaka International University

**Abstract:** In this research, to the one-pair comparison value used by AHP (the division-by-class making-decisions method), the fuzzy concept was introduced and the method of correcting derivation of the weight of evaluation criteria or alternatives is proposed. Specifically, the membership function of the one-pair comparison value is checked by experiment, it is calculating the weight of evaluation criteria or alternatives by using for the one-pair comparison value, which guessed the membership function from the data obtained in the experiment, and comparison examination of the result with the usual method is carried out.

## 1.はじめに

本研究では、AHP (Analytic Hierarchy Process= 階層化意思決定法)で用いる一対比較値に対して、ファジィ概念を導入する方法について検討し、評価項目や代替案のウェイトの導出を行う方法について考察している。

具体的には、一対比較値のメンバーシップ関数を 推測するための実験を行い、この実験で得られたデータからメンバーシップ関数を推測して、推測した 値を一対比較値として用いて評価項目や代替案のウェイトを導出することで、通常の方法との結果を比 較検討する。そして、ファジィ理論を用いる AHP を 導くための考察を行う。

## 2.AHP

AHP (階層化意思決定法)とは階層的構造(階層 図-図1)を基本的構造の道具として用い、1970年代 に Saaty によって開発された意思決定の手法である [1],[2]。

AHPは、決定に関した要素を階層構造によって把握し、対立する要素も取り込むことができる。また尺度の違う要素も比較することができ、計量可能でないようなフィーリングや好みといったものまで扱うことができる手法で、経験や勘という感覚情報を意思決定のプロセスにおける重要な要素としている。したがって、人間のメカニズムに直接切り込んだ手法と言える。

AHPでは、人間の分析能力を階層構造に従って積み上げていき、近似的な仮説をもうける。そして、計量的な方法を適用することにより、人間の感性に及ばない事例にも対処できるという特徴がある。

階層構造の構築後、「要素i は要素j と比較してどれくらい重要か」と2 つずつ比べる一対比較を行う。これにより、被験者個人の価値観が反映される(表1) [1],[2]。

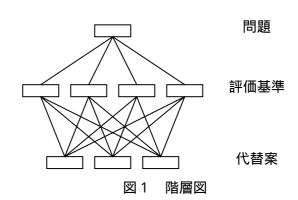


表 1 一対比較値

(要素 $j$ と比較 $b$ て要素 $i$ $b$ )	$\left(a_{ij} ight)$
同じくらい重要	1
若干重要	3
重要	5
かなり重要	7
絶対的に重要	9
補間的に用いる	2,4,6,8
$a_{ij} = 1,  a_{ji} = 1/a_{ij}$	

## 3.AHP 評価法

一対比較により算出された値は、首尾一貫していなければ、整合性はなりたたない。あいまいさの尺度として次の整合度指数 ( C.I. ) を扱い、評価する。

$$C.I. = \frac{\lambda_{\text{max}} - n}{n - 1} \tag{1}$$

完全に整合性があるときの C.I.値は 0 で、整合性が低いほど値は大きくなる。ただし、Saaty は、C.I.値が 0.1 (場合によっては 0.15)以下であれば合格とすることを経験則により提案している[1],[2]。

# 4.メンバーシップ関数推定のための実験

本研究では、AHPで用いられる一対比較値に対して、人間の主観的なあいまいさが、どの程度含まれているかを調査する目的で実験を行った。

具体的には、図2で示すような2つの面積を比較することで、人間の主観的なデータと実際の物理的データを収集する。

データ収集は、ランダムに表示される図形 A、B に対して「図形 B の面積は図形 A の面積の何倍か」を 1 倍から 9 倍の選択項目の中から選ぶ。

図形 B は 1 倍、1.25 倍、…、9.75 倍までの 36 種類あり、各 10 回を表示するようにして、合計 360 回のデータを被験者 1 名に対して収集する。

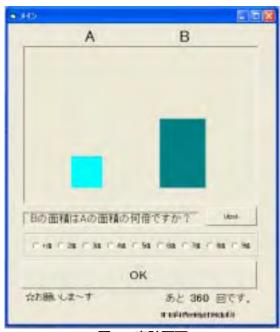


図2 実験画面

**5.実験データによるメンバーシップ関数の推定** 得られた実験データから次のようなパターンがみられた。

個々のデータによって差があるが倍数の認識が +・どちら かにシフトしており、倍数が高くなるご とに、より大きくシフトしている傾向がある。

1倍2倍3倍までは、ほぼ正規性を保っているが、 4倍以上になると、あいまいさが数字とともに大きく なる傾向がある。

なお、図3は、ある被験者のデータである。また、 全体的な傾向を見るために、被験者のデータの平均 をプロットしたのが図4である。

、 より、倍数が増すごとに人間の主観性はより、あいまいになっていることがわかる。

したがって、AHPの一対比較値は、1 倍から 9 倍までの 9 つの選択項目があるが、人間のあいまいさを含めた 6 つ程度の、メンバーシップ関数を用いて良いのではないかと考えられる。

以上のことから、図5のような6つ程度のメンバーシップ関数を想定することで、人間の主観的なあいまいさを考慮したファジィー対比較値の導入が考えられる。

今後は、このファジィー対比較値を用いる、AHP の検討を行いたいと考えている。

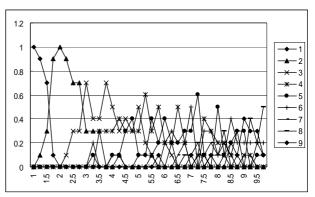


図3 実験データの例

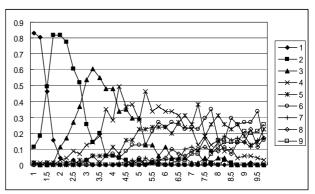


図4 被験者の平均

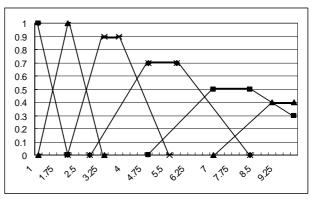


図5 メンバーシップ関数の推定

#### 参考文献

- [1] 刀根薫: ゲーム感覚意思決定法-AHP 入門-, 日科 技連出版社, 1986
- [2] 刀根薫,真鍋龍太郎(編): AHP 事例集,日科技連出版社,1990

#### 連絡先:

小谷 直也

大阪国際大学大学院経営情報学研究科 〒573-0192 大阪府枚方市杉 3 丁目 50 番 1 号

Phone: (072)858-1616(代)

E-mail: m03m07@stu.oiu.ac.jp

# 主成分分析による顔文字の感情認識

# An emotional recognition of the face mark using Principal Component Analysis

# 芝 秀紀 Hideki SHIBA

工学院大学大学院工学研究科情報学専攻

Informatics, Graduate School of Kogakuin University

# 椎塚 久雄 Hisao SHIIZUKA

工学院大学工学部情報工学科

Department of Computer Science and Communication Engineering,

Kogakuin University

#### **Abstract**

This paper shows emotional recognition of the Face mark. In E-mail, the Face mark also has the role to be used to supplement the transmission of our feelings and the lack part of communications by the computer. However, if the sender doesn't know what feelings you have When the receiver sees the mark, this effect will be reduced. Then, the recognition of feelings of the Face mark used by E-mail is first investigated. And, to obtain the feature in which the effect of the Face mark was shown from our research result, the principal component analysis was done. In addition, a new aspect to this kind of problem is shown by classifying various feelings included in the Face mark into four kinds by using the correlation coefficient.

# 1. はじめに

E-mail では顔文字を感情伝達の道具として 用いられているが、コンピュータを介したコミュニケーションの不足部分を補う役目もある. そこで、今回は E-mail で使用されている顔文字にはどのような感情認識があり、どのような印象を受けるのか、またその特徴に付いて考察する.

# 2. 主成分分析による特徴抽出

顔文字から受ける感情の認識調査を行うため、 質問紙調査を行った.使用する顔文字は、実際 の E-mail で使用されていた 36 個を用いた.感情を表現する単語として、プルチックの感情理 論の立体構造モデルで示された 8 個の基本感情 語(喜び、期待、怒り、嫌悪、悲しみ、驚き、恐れ、 受容)を使用した [1].

形式は複数選択可, 顔文字にふさわしいと感じる感情語を選択させた. 被験者は成人 7 名である. 以上の調査結果から特徴抽出のため, 主成分分析を行い, 情報量の累積比率が 70%までを主成分として採用した.

# 3. 分析の考察

図1に顔文字の持つ主成分得点と、感情が持つ主成分負荷量を散布図に示す。この図より各主成分にネーミング作業を行う。第1主成分軸の正方向に「喜び」「期待」「受容」、負方向にその他5個の感情がプロットされた。これにより第1主成分を「快一不快」とした。第2主成分軸正方向に「怒り」「嫌悪」「驚き」があり、負には「悲しみ」「恐れ」がある。これより第2主成分の解釈は「能動一受動」とした。表1に顔文字から受ける印象別に示す。

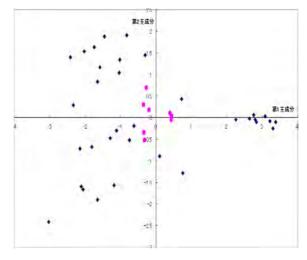
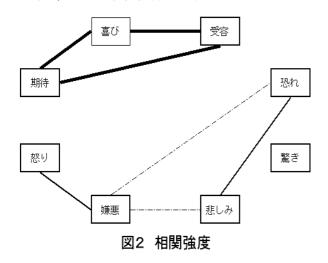


図1 調査結果から得られた主成分関係図

表1 各顔文字の印象

1	央	不快		
能動	受動	能動	受動	
(^-^;	(^0^)/	(*_*)	(>д<)	
0(^-^)0	p(^^)q	(-, -;)	(p)	
(o^—')b	(^0^)	(>_<)	(-"-;)	
	(^0^) v	f^_^;	(;)	
	(#^0^#)	(′д`)	(^_^!)	
	(^_^)	(;)	()	
	(^∇^)	(ToT)	(_;) <i>\xi</i>	
	(⊚-⊚;)	$m (\underline{\hspace{1em}}) m$	(;)	
	(0^0^0)	(*_*;)	(;)	
	\(^o^)/	(′д`;)	(′Д`)V	
	Ψ(`∀´)Ψ	(T-T)	w(° o° )w	

プルチックの感情理論では、隣り合う感情は 混合し、複雑な混合感情が生まれるとある。そ こで感情の統合を行うため、相関関係に注目し た. 同時に発生する感情は正の相関関係が強い と考え、図2に相関関係を示す.



点線・実線・太い実線の順に正の相関が強いことを示している.「驚き」のみ他の感情と相関性が低いことがわかる.図2より表2のように感情をグループ化した.これにより顔文字によって受ける印象は大きく分けて4個であった.

表2 相関強度を考慮した感情統合

Group	含まれる感情
1	喜び・期待・受容
2	怒り・嫌悪
3	悲しみ・恐れ
4	驚き

# 4. まとめ

顔文字からは少なくとも「快一不快」「能動一受動」という印象を読み取る事が可能であった。「驚き」については他の感情と相関が低く,他のものと区別して扱う必要があると考えられる。また,今回は正の相関関係があると混合しやすいとし,同一の感情として扱ったが,逆に負の相関が見られたときはコンフリクト(葛藤している)であると認識される可能性がある。そのため皮肉と相手に印象を与えることが考えられる。これにより顔文字が持つ特性がわかり,E-mail などの文章コミュニケーションでは表現できないノンバーバルな部分が表現可能となると思われる。

また、今回の調査・分析より、感性的コミュニケーションの補助的手段としてツールに組み込むことで、コミュニケーションをよりよく行えると思われる。今後は、今回の調査の結果検証とともに、ひとつのコミュニケーションツールとしての実現を試みてゆく予定である。

#### 参考文献

[1] 濱 治世 他:「感情心理学への招待」, サイエンス社, 2001

[2] 上田 尚一: 「主成分分析」, 朝倉書店, 2003

連絡先 : 東京都新宿区西新宿 1-24-2 工学院大学大学院 工学研究科 情報学専攻 数理情報研究室 芝 秀紀

Tel: 03-3342-1211(代表) 内線: 2653

E-mail: pporo15@infoseek.jp

# 森林保全に対する政策決定と資金調達に関する多属性効用分析

Multiattribute utility analysis for

policy selection and financing for the preservation of the forest

林田 智弘

西﨑 一郎

上田 良文

Tomohiro Hayashida

Ichiro Nishizaki

Yoshifumi Ueda

広島大学 広島大学

広島大学

Hiroshima University Hiroshima University Hiroshima University

**Abstract** In this paper, we examine effective policies for financing for the preservation of the forest on Mt. Ryuoh in the city of Higashi-Hiroshima by multiattribute utility analysis. In multiattribute utility analysis, we deal with decision making problems with multiple attributes and can select the most effective solution among several alternatives by deriving preference of the decision maker. Although an NPO which is established to preserve the forest on Mt. Ryuoh is the decision maker, ideas of residents and companies such as sake brewers in Higashi-Hiroshima are paid serious attention for evaluation of the alternatives.

#### 1. はじめに

広島県東広島市の西条盆地は古代湖であり堆積した湖成層が良質の地下水を創り、伝統的地場産業である酒造業を育んでいる。西条酒郷地区の地下数メートル前後の深さには、黒瀬川の伏流水が流れ、さらにその下の不透層を掘り抜くと中軟水の龍王山からの伏流水である地下水が流れている。この伏流水は龍王山に降った雨が、約15年かけてこの地に湧き出す伏流水であり、西条酒郷地区に酒蔵をかまえる日本酒の原料となっていることから酒蔵ではこの伏流水を「仕込み水」と呼んでいる。

近年,この仕込み水の水量と水質の低下が大きな問題 となっているため, 西条酒郷地区の酒造会社が寄付金を 出資し,森林保全を目的とした NPO である「山と水の 環境機構」が龍王山の森林保全を行っている.しかし 龍王山からの便益を受ける者として考えられるのは,現 在森林保全コストを負担している酒造会社だけではなく 龍王山の森林や龍王山にある憩いの森公園を利用してい る一般市民,龍王山の表層水を農業に利用している農業 関係者,また西条酒郷地区は日本三大酒造に選ばれてお りその地区特有の産業から恩恵を受けていると考えられ る事業主である.龍王山は所有権が明確に確定されてい ない共同利用可能な自然資源, すなわち「コモンズ」で あり,現在龍王山は「コモンズの悲劇」[3]の状態に陥っ ているものと考えられる「コモンズの悲劇」とは,この ようなコモンズの保全あるいは維持的利用と,各個人の 利己的動機に基づく経済合理的行動とが矛盾し,コモン ズの利用に際して何らかの社会的制約が与えられなけれ ば,その枯渇化傾向が避けられないという状態である.

本論文ではこの水源として龍王山の状態を改善するため,龍王山から恩恵を受けている者が自発的にその森林 保全コストを負担するようないくつかの新しい社会シス テムの代替案を提案し,多属性効用分析を用いてそれらを比較し最良の代替案を選択する.本論文における各代 替案はそれぞれ資金調達方法と資金運用方法によって特 徴付けられる.

多属性効用分析においては,意思決定支援ソフトウェアを利用することによって,効果的かつ効率的な分析が可能となる.そこで,本論文ではSeo et al. によって開発された MIDASS[2] を採用する.MIDASS はデータベースの作成,効用関数の評価,確率分布の評価,効用値の計算機能をもつプログラムで構成されている.

本論文で取扱う意思決定問題での,意思決定者は森林保全を目的とした NPOとし,効用関数や代替案の評価は東広島市龍王山とそれを水源とする地下水から便益を受けている者,すなわち東広島市の住民や西条酒郷地区の酒造会社などの事業主の意見を尊重して行う.そのため,各意思決定構成員に対してアンケート調査を行い,その結果を参考に効用関数を同定する.

# 2. 多属性効用分析

多属性効用分析では,n種の属性  $X_1,\ldots,X_n$  を取り扱い,属性  $X_i$  のある特別な値を  $x_i$  と表し,その n 次元ベクトルを  $x=(x_1,\ldots,x_n)$  と表す.多属性効用関数では,加法的あるいは相互効用独立性が仮定できて, $U(x_1,\ldots,x_n)=U(u_1(x_1),\ldots,u_n(x_n))$  となる関数  $U,u_1,\ldots,u_n$  が同定できれば分析を容易にできる.すなわち多属性効用関数の評価は U と  $u_i,\ i=1,\ldots,n$  の評価に還元できる. $u_i$  は単一属性効用関数であり,U の形は独立性の条件に依存する. $U,u_i,\ i=1,\ldots,n$  は 0-1 に正規化されているものとする.

相互効用独立性条件が満たされているならば,多属性

効用関数は次のように乗法的に表現される[1].

$$1 + KU(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^{n} [1 + Kk_i u_i(x_i)]$$
 (1)

ここで  $k_i,\,i=1,\ldots,n$  は  $0\leq k_i\leq 1,\,\sum_{i=1}^n k_i\neq 1$  となるような n 個の属性に対するスケール定数で, K は

$$1 + K = \prod_{i=1}^{n} [1 + Kk_i]$$
 (2)

を満たす追加的なスケール定数であり,K>-1 である. (1) のような効用関数を同定するためには,単一属性効用関数  $u_i$  やスケール定数  $k_i$  を定めなければならないが,そのための手順を以下に要約する.

手順1:目的の構造化 目的を複数の数値化できる属性 に分解して表現する.多数の属性をもつ問題を取扱う場合,階層化された目的構造体を構成する.

手順 2: 効用関数の同定 目的構造体の末端にある単一 属性の効用関数を同定する.

手順3:トレードオフ実験 多属性効用関数には単一属性効用関数と属性間の重みを表すスケール定数によって表現される.スケール定数は属性間のトレードオフ実験によって決定される.

手順4:代替案作成と比較 取扱う問題に対する解決策としての複数の代替案を作成し,各代替案の効用を評価する.これらの代替案には不確実性が含まれていても良い. 手順5:感度解析 効用分析によって評価された代替案が,スケール定数,各代替案の属性値などの変動に対して安定しているかどうかを分析する.

#### 3. 森林保全の政策決定

#### 3.1 目的の構造化

本論文では,森林保全を目的とした NPO を意思決定者とするが,東広島市の住民,事業主,農業関係者,酒造会社の効用を基礎として評価するため図1,2,3で表現される目的構造体をもとに各代替案を評価する.意思決定に関わる主体を「地下水を利用している者」と「地下水を利用していない者」とで大きく2つに分ける.さらに,住民を龍王山麓に住み,地下水を利用している「住民1」,龍王山麓に住み,地下水を利用していない「住民2」,それ以外の東広島市住民である「住民3」とに分ける.また事業主を事業に地下水を利用している「事業主1」,地下水を利用していない「事業主2」とに分ける.本研究における目的構造体の上位階層を図1に示す.

図1における最下位レベルに示される主体それぞれを「意思決定構成員」と呼ぶ、各意思決定構成員は龍王山や地下水から受ける便益に違いがあり、選好が異なってくるため、個別の属性として評価する.

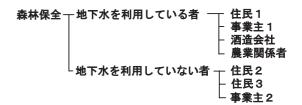


図 1: 目的構造体(上位階層)

各意思決定構成員の下位階層は共通しており、「地下水」、「龍王山」、「森林保全のための出資」の3つの属性で構成される.ただしアンケートの結果、住民以外の事業主、酒造会社、農業関係者は龍王山の森林に対しての便益は受けていないという回答が大半であったため、「龍王山」の属性は住民以外の意思決定構成員の下位階層の目的構造体から除いた.地下水については「水量」と「水質」の維持年数で評価し、龍王山については「森林」や「憩いの森公園」の状態により5段階で区別し、属性値を森林レベル、公園レベルで評価する.住民の下位階層の目的構造体を図2に、それ以外の意思決定構成員の下位階層の目的構造体を図3に示す.

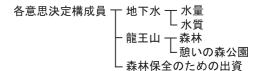


図 2: 目的構造体(住民の下位階層)

各意思決定構成員 — 地下水 — 水量 水質 森林保全のための出資

図 3: 目的構造体 (その他の下位階層)

森林整備,憩いの森公園整備,高速道路排水整備への 費用をもとに,それぞれに投入する資金の額によって各 属性値を算出する.ただし,龍王山の森林整備と地下水 の水量の関係については後藤らの研究[4]を参考し,高 速道路排水溝整備と地下水の水質の関係については,日 本道路公団による排水溝整備の方法に基づいている.

#### 3.2 効用関数の同定

本研究においては、アンケート調査を各意思決定構成員に対して実施する.このアンケート調査では、効用関数の同定、トレードオフ実験、各代替案に対する各属性値調査を目的としている.またトレードオフ実験においては、属性間に相互効用独立性が成立するかどうかの確認も行う.

アンケートの質問をできるだけ簡単にし,回答者の負担を軽減するために,単一属性効用関数の型をすべて

 $u(x)=a+be^{-cx}$  であると仮定し,最良と最悪の結果 ときと(30,0) であるときが無差別であることを示して に対する 50-50 くじとその確実同値額を尋ねることによ おり,これにより住民3の地下水の水質に対するスケー リ, $\operatorname{MIDASS}$  を利用してパラメータa,b,cを定める. 確 ル係数 0.591057 を得る. 実同値額はアンケート調査から得られたデータを考慮し て決定されている.図4には,例として住民2の地下水 の水質に対する単一属性効用関数を示した MIDASS の 画面が示されている.

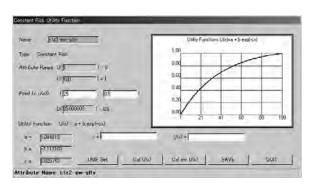


図 4: MIDASS: 地下水の水質の単一属性効用関数

このようにして決定された地下水の水量に対する各意 思決定構成員の単一属性効用関数  $u(x) = a + be^{-cx}$  の パラメータ a, b, c を表 1 に示す.

表 1: 地下水の水量の単一属性効用関数の各パラメータ

意思決定構成員	a	b	c
住民 1	1.000	-1.189	-0.173
住民 2	1.180	-1.202	0.0191
住民 3	1.033	-1.070	-0.035
事業主 1	1.008	-1.058	0.049
事業主 2	1.033	-1.069	-0.035
酒造会社	1.000	-1.081	0.077
農業関係者	25.252	-25.262	-0.001

50-50 くじに対する確実同値額が農業関係者以外の意 思決定者では50年未満であることから,農業関係者以 外の意思決定者は地下水の水量に対してリスク回避的な 選好をもつ.農業関係者の地下水の水量に対する 50-50 くじとの確実同値額は50年であり、リスクに対して中 立的であった.

#### 3.2.1 トレードオフ実験

アンケートにより相互効用独立の条件がほぼ成り立つ ことを確認できたので,意思決定者が無差別点を示すト レードオフ実験により,各属性のスケール係数  $k_i$  を定 める.無差別点もアンケート調査から得られたデータを 考慮して決定されている.図5には,例として住民3の 地下水の「水量」と「水質」に対するトレードオフ実験 を示した MIDASS の画面が示されている.この例では, 「水量」と「水質」の維持年数のペアが(0,100)である

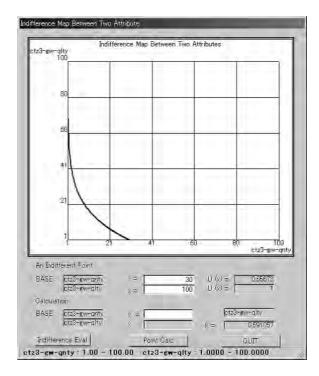


図 5: MIDASS:トレードオフ実験

同様に,各意思決定構成員の下位階層に対するスケー ル定数は決定される.例として表2に住民3の下位階層 のスケール定数を示す.

表 2: 住民 3 のスケール定数

属性/K	$k_i$	属性/K	$k_i$
地下水	0.375	水量	0.9000
		水質	0.5911
		K	-0.9219
龍王山	0.375	森林	0.6000
		公園	0.6000
		K	-0.5547
出資	0.750		
K	-0.806		

アンケートによって得られた各意思決定構成員の属性 間の選好について以下に要約する、地下水を生活用水と して利用している住民1は「龍王山」に比べて「地下 水」を重視している、また「水量」「水質」に対して同 程度の重要性を持ち「龍王山」については、その下位属 性の「森林」を非常に重視している.生活用水として地 下水を利用しない住民2も住民1と同様「地下水」を 重視し「水量」よりも「水質」を非常に重視している. これは住民2が,地下水が,酒を造るための仕込み水で

あると認識しており「水質」が非常に重要であると考えている.また「龍王山」は「地下水」ほどの価値を持たず「龍王山」の下位属性である「森林」は「憩いの森公園」よりも価値があるものとされている.住民3は「森林保全のための出資」を最も重視している.これは住民3が,住民1や住民2に比べて龍王山からあまり大きな便益を受けていないことを意味する.

事業に地下水を利用している事業主1は「森林保全のための出資」より「地下水」を重視している「地下水」の下位属性である「水量」に比べ「水質」を重視する. 事業に地下水を利用していない事業主2も事業主1と同様に「森林保全のための出資」に比べ「地下水」を重視しているが、事業主1ほど大きい割合ではない.

酒蔵会社は、「地下水」に比べて「森林保全のための出資」を重視している.これは、属性値である出資額の上限が他の意思決定者構成員の場合1万円程度であるのに比べて、酒蔵会社の出資額の上限は月当り1000万円であるため、企業経営の観点から「森林保全のための出資」を重要視したと考えられる.もちろん酒蔵会社も他の地下水を利用する意思決定構成員と同様もしくはそれ以上に、地下水からの便益を受けており、地下水の重要性を軽視しているものではない.また、酒蔵会社は地下水の「水量」に比べ「水質」のほうを重視している.

農業関係者は「地下水」に対して大きな価値をもち,「地下水」の下位属性に関しては「水量」と「水質」の価値は同程度である.

次に,森林保全を目的とした NPO の選好を表現するように目的構造体の上位階層のスケール定数を決定する.スケール定数を決定する際には,各意思決定構成員の数やアンケート調査の際に追加的に調査した普段の生活でどの程度龍王山からの便益を意識しているかを考慮して無差別実験を行った.また NPO として,地下水を利用する者」と「地下水を利用しない者」を同程度に重要視していることから,各スケール定数が 0.5 となった.上位階層のスケール定数を表 3 に示す.

表 3: 上位階層のスケール定数

属性/K	$k_i$	属性/K	$k_i$
地下水利用者	0.5	住民 1	0.24
		事業主 1	0.03
		農業関係者	0.15
		酒造会社	0.30
		K	1.426
地下水非利用者	0.5	住民 2	0.5364
		住民 3	0.6000
		事業主 2	0.4556
		K	-0.8242

#### 3.3 代替案

本論文における代替案には資金調達方法と資金運用方法の2点によって特徴付けられる.資金調達方法として有志に寄付を募る「寄付」、くじを発売しその収益金の一部を配当金とした残りの資金を運用する「環境くじ」、2種類のエコラベル商品を発売する「エコラベル」を考える.エコラベルについては、商品代の5%をエコラベル代として上乗せしそれを消費者が全て負担する「エコラベル1」と、エコラベル代を生産者と消費者が半額ずつ負担する「エコラベル2」の2種類を考える.また、東広島市住民や事業主に対して課税し資金調達を行う森林保全のための目的税である「水源涵養税」を考え,森林保全を目的としたNPO団体の活動との比較を行う.資金調達方法としてこれら5通りを考える.

また,龍王山の森林整備,龍王山にある憩いの森公園の整備,山陽道のうちの龍王山近辺の高速道路排水溝整備の3つを資金運用対象とする.資金運用方法として,龍王山の森林整備を重点的に行い龍王山の森林と地下水の水量を重視する「森林・水量重視」,憩いの森公園整備を重点的に行い憩いの森公園を重視する「公園重視」,高速道路の排水溝整備を重点的に行い地下水の水質を重視する「水質重視」,また全てに対して均等に資金を配分する「均等配分」の4通りを考える.それぞれの資金調達方法に対して4通りの資金運用方法を考える.したがって本論文では,5通りの資金調達方法と4通りの資金運用方法の組合せとして20通りの代替案を多属性効用分析を用いて比較する.

# 3.4 代替案の属性値の計算

代替案の属性値に関しては「森林保全のための出資」 がアンケート調査より決定され、その出資額に応じて、 「水量」「水質」「森林」「憩いの森公園」の属性値が決定 される.ただし,対象者の人数が多い住民の出資額につ いては,アンケート結果から確率分布関数を推定し,数 値計算により期待効用を算出する.本研究でのアンケー ト調査では,対象者の人数が比較的少ない「酒造会社」 などについてはその総数に対して十分な数の回答が得ら れているが,対象者の人数が多い「住民」に対しては必 ずしも十分とは言えず,今回の「住民」からのアンケー トの回答者には環境に対する意識の高い人々が比較的多 く,何らかの調整が必要と考えられた.そこでわれわれ は広島県世論調査を参考にした. すなわち, 平成14年 度広島県世論調査の項目「環境への関心について」のう ちの質問「環境にやさしいエコマークなどのついた商品 やリサイクル商品の購入・使用に努めている」に対し, 「はい」と答えた人が全体の 11.6% であることから,本 研究におけるエコラベル商品の購入率も東広島市全体の

11.6%であるとした.購入額については,アンケートで購入する回答した人々の購入額から確率分布を推定した. 図 6 にアンケート結果から推定された資金調達方法を環境くじとする代替案に対する住民3の出資額の確率分布関数を例として示す.

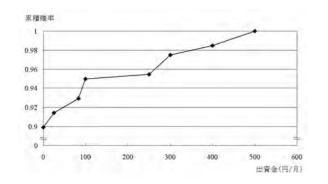


図 6: 環境くじに対する住民3の出資額の確率分布関数

各資金調達方法により調達した資金を,龍王山の森林整備,憩いの森公園の整備,高速道路排水溝の整備の3項目に対して配分する「森林」と「水量」は龍王山の森林整備への資金運用額に「、公園」は憩いの森公園の整備への資金運用額に「、水質」は高速道路排水溝の整備への資金運用額にそれぞれ依存する.

龍王山の森林は近年の環境汚染の影響により年々その 荒地の増加が問題となっており,龍王山の森林を整備す ることによりこの荒地の増加を防ぐことが可能である. このことから「森林」は投下した資金に依存する森林の 荒地割合によって評価する.ただし,荒地割合は100年 間の平均とする.

一方,地下水の「水量」はその維持年数で評価する水量は森林の保水能力に依存するものと考えら,保水能力は広葉樹と針葉樹により大きな差がある.したがって維持年数は,投下した資金に依存するこれらの樹木の植林数に依存する.

現在,憩いの森公園には年間 5000 万円の維持費用が 投資されており,本研究ではどれだけ公園の整備がなさ れているかで憩いの森公園を評価するので,主に公園清 掃業務を請け負う賀茂地方森林組合(現状:3300 万円/ 年)への現状を基準とした投資金額に応じて公園レベル を評価する.

また「水質」も「水量」と同じくその維持年数で評価する.高速道路排水溝の整備が十分に行われていないことが,近年の地下水の水質の低下の原因として考えられるため,排水溝の整備に資金を投入する.高速道路排水溝の整備を十分に行うためには,年間1769.8万円が必要であることから,年間の投資額を与えて,水質の維持年数を評価する.

#### 4. 結果

#### 4.1 資金調達方法の比較

アンケート結果から、各資金調達方法に対する調達資金は確率分布関数(例:図6)によって表現されるので、各資金調達方法に対する年間調達資金も確率分布となる。このことから、本研究では住民1、住民2、住民3について、300人ずつ計1200人を仮想的に用意し、それぞれに乱数を与え、図6に示したような確率分布に従って1人ずつの出資額を決定し、得られた各300人の平均を意思決定構成員1人当りの平均出資額とし、各住民の人数から年間調達資金を算出し、これを一回の試行とした.上記の年間調達資金の算出を1000回行ったときの平均値を表4に示す.

表 4: 各資金調達方法での調達資金(単位:万円/年)

資金調達方法	調達資金
水源涵養税	2745
寄付	3266
環境くじ	3139
エコラベル 1	4300
エコラベル 2	5093

資金調達方法を「エコラベル2」とする代替案が年間 約 5000 万円の資金を調達することができ、他の代替案 に比べ最も資金を調達することができる.

#### 4.2 代替案の選択

各代替案を比較するために,4.1 節で述べた年間調達 資金の算出を1000 回試行し,毎回効用値を計算しその 平均を取ることで期待効用を得た.得られた各代替案の 期待効用を図7に示す.

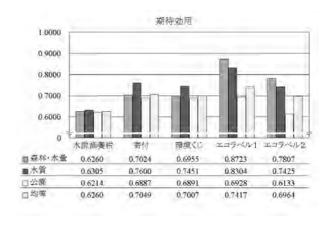


図 7: 各代替案の効用値

図7から,わかるように資金調達方法をエコラベル1, 資金運用方法を森林・地下水水量重視とした政策が最大 の効用を与える代替案となり,受益者が自発的にその森林保全コストを負担するような社会システムとして最も相応しい代替案であると考えられる.この結果は,3.2.1節で述べたアンケートから得られた各意思決定構成員の数やアンケート調査の際に追加的に調査した普段の生活でどの程度龍王山からの便益を意識しているかを考慮したNPOの選好に依存した結果である.すなわち,意思決定構成員の大半が「地下水」や「森林」を「憩いの森公園」に比べて重要視していることと,龍王山の森林整備を重点的に行うことで「森林」と「水量」の属性値が同時に高くなるため,資金運用方法を森林・地下水水量面視とする代替案の期待効用が他の資金運用方法を用いた場合に比べて高くなったと考えれる.

最良の代替案の資金調達方法はエコラベル1とした場合で,年間調達資金は約4300万円となる.この資金を龍王山の森林整備,憩いの森公園整備,高速道路の排水溝整備に配分することになるが,この代替案は資金運用方法を森林・地下水水量重視としており,表5に示されるように,龍王山の森林整備に最も多くの資金を配分している.ここでの配分方法は最初に「龍王山の森林整備」,「憩いの森公園整備」,「高速道路の排水溝整備」のそれぞれに最小の必要額を配分し,残りの資金を上限まで「龍王山の森林整備」に割当て,仮に余剰があれば「憩いの森公園整備」と「高速道路の排水溝整備」に均等に追加配分している.4300万円では「龍王山の森林整備」の上限には達していない.最良の代替案の下位属性の属性値と意思決定構成員の効用値を表6に示す.

表 5: 最良の代替案の配分資金(万円/年)

配分項目	配分資金
龍王山の森林整備	2290
憩いの森公園整備	310
高速道路の排水溝整備	1700

表 6: 各属性値と効用値

		効用値			
属性	属性値	酒蔵会社	住民 3	事業主 2	
森林	3.388	_	0.7654	_	
公園	1.723		0.1809		
水量	70.574	0.9821	0.9276	0.9276	
水質	17	0.7084	0.7084	0.4413	

資金調達方法をエコラベル2とする代替案については 酒造会社の出資額が非常に高くなってしまうため,酒造 会社の効用値がエコラベル1に比べ非常に低くなる.こ れが資金調達方法をエコラベル2とする代替案よりも調 達資金額の低いエコラベル1とする代替案の期待効用が 高くなった理由であると考えられる.また,資金調達方 法を環境くじとする代替案の評価には,くじの配当金に対する効用を考慮していないため,実際に運用していくと,長期的には有効な政策となる可能性がある.

#### 5. おわりに

本論文では,水源として龍王山の状態を改善するため, 龍王山から恩恵を受けている者が自発的にその森林保全 コストを負担できるような政策を示し,それらを多属性 効用分析を用いて比較した.その結果最も相応しい政策 として,資金調達方法としてエコラベル1を採用し,森 林・地下水水量を重視して資金を運用する代替案が得ら れた.

今後の課題として,最良であると判断された代替案が 効用関数のスケール定数,各代替案属性値などの若干変 動に対して安定しているかどうかを分析することや,意 思決定構成員の長期的な行動を予測した結果の評価が考 えられる.

# 参考文献

- R.L. Keeney and H. Raiffa, Decision with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs, Wiley, New York, 1976.
- [2] Fumiko Seo, Ichiroh Nisizaki, Hidenobu Hamamoto, "Development of interactive software for multiobjective decision analysis: MIDASS," in the Proceedings of 17th European Meeting on Cybernetics and Systems Research, 2004 (in printing).
- [3] Y. Ueda and G.T. Svendsen, "How to solve the tragedy of the commons: social entrepreneur and global public goods," The Aarhus School of Business Research Paper Series, No. 2002–13, 2002.
- [4] 後藤, 小南, 深山, 玉井, 金澤, "京都府南部地方に おける広葉樹二次林の地上部現存量及び純生産量", 森林総合研究報告, 2, 115-147, 2003.

#### [問い合わせ先]

739-8527 東広島市鏡山 1-4-1 広島大学大学院工学研究科 複雑システム工学専攻 西﨑 一郎

TEL: 0824(24)7604 FAX: 0824(22)7195 e-mail: nisizaki@hiroshima-u.ac.jp

# QPによる区間 AHP の定式化

# Interval Analytic Hierarchy Process by QP Problem

円谷 友英 Tomoe Entani 杉原 一臣 Kazutomi Sugihara 田中 英夫 Hideo Tanaka

noe Entam Kazutonii Sugin

広島国際大学

高知大学 福井工業大学 Kochi University Fukui University of Technology

Hiroshima International University

Abstract: AHP(Analytic Hierarchy Process) is proposed to give the crisp priority weight with respect to many items using the pairwise comparison matrix. In this paper, we formulate the problem to obtain the interval priority weight. Since a decision maker gives each pairwise comparison, the matrix is not always consistent. In order to reflect the inconsistency in the given pairwise comparison matrix, we introduce the interval priority weights. The range of each interval weight indicates the uncertainty with respect to the item's evaluation. As for the consistent matrix, the upper and lower bounds of interval weights are the same, that is, crisp weights are obtained. The interval weights are obtained by minimizing their uncertainties under the condition that every given pairwise comparison is included in them. We formulate the problem as QP problem and compare the results to those from the LP problem with a numerical example.

# Keywords: Analytic hierarchy process, Interval weight, QP problem

# 1 はじめに

AHP(Analytic Hierarchy Process)では,意思決定者が与える多項目の一対比較値からなる行列から各項目のウェイトが実数値として求められる[1].一対比較行列の最大固有値に対する固有ベクトルをウェイトとする方法が代表的であるが,この手法では与えられた一対比較行列を整合性があるものに近似してウェイトが得られる.

本研究では,意思決定者が一対比較を行うので,必 ず整合性がある一対比較値が与えられるとは限らな い点に着目し,区間ウェイトを導く方法を提案する. 各項目のウェイトが区間値であると仮定すると、こ れらを用いて,各一対比較値も区間値として表すこ とができる.そこで,意思決定者が与える一対比較値 を包含するような区間一対比較値を与える区間ウェ イトを求めることで,一対比較行列の不確かさを考 慮する.すなわち,ウェイトを区間値として定義す ることで,一対比較行列の不整合性を反映すること が可能である.区間ウェイトの幅が各項目のあいま いさを表しているので,これが小さくなるようなウェ イトを求める.よって,意思決定者が整合性がある 一対比較行列を与えるとき,ウェイトのあいまいさ はなく,区間幅がない実数値として求められる.本 研究では最小二乗法の考えに基づき,区間幅の二乗 和の最小化を目的関数とする QP 問題として定式化 する. 区間幅の和を最小化することで LP 問題として 定式化することもできるが、この場合、特定の項目 のウェイトだけにあいまいさが偏る傾向がある.-対比較行列に含まれる不確実さの原因となる項目を 特定することは,一対比較を行うことから考えて困 難である. そこで, QP 問題とすることで, すべての 項目のウェイトが区間幅を持ち, その大小によりあ いまいさを表現できるので , LP 問題を用いるより適 当である.

# 2 一対比較行列の整合性

AHP では , 意思決定者が与える多項目の一対比較値を基に各項目のウェイトを求める . n 個項目があると仮定すると , 一対比較行列 A を次のように表す .

$$A = \left(\begin{array}{ccc} 1 & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & a_{ij} & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & 1 \end{array}\right)$$

ただし, $a_{ij}$  は項目i の項目j に対する重要度であり, $a_{ii}=1, a_{ij}=a_{ji}$  を満たすので,意思決定者は行列A の上側の要素 n(n-1)/2 個の一対比較値を与える.この一対比較行列A に整合性があるとき,次の条件が満たされる.

$$a_{ij} = a_{ik_1} a_{k_1 k_2} \cdots a_{k_m j} \ \forall i, j (i < j)$$
 (1)

これはすべての一対比較値に矛盾がない状態であり,各項目のウェイトを $w_i$ とすると, $a_{ij}=w_i/w_j$ となるような値が与えられている.しかしながら,意思決定者が直感で一対比較を行う場合,式 (1) を満たす一対比較値を与えることは稀である.すなわち,必ず整合性がある一対比較行列が得られるとは限らない.そこで,一対比較行列に含まれる不整合性を取り扱うために,各項目のウェイトを区間値  $W_i=[\underline{w}_i,\overline{w}_i]$ として定義する.

区間ウェイトを用いて項目 i,j の一対比較値を表すと,最大値  $\overline{a}_{ij}$  と最小値  $\underline{a}_{ij}$  により表される区間値となる.

$$[\underline{a}_{ij}, \overline{a}_{ij}] = \left[\frac{\underline{w}_i}{\overline{w}_j}, \frac{\overline{w}_i}{\underline{w}_j}\right]$$

区間ウェイト  $W_i (i=1,...,n)$  を , 意思決定者により与えられる一対比較値  $a_{ij}$  について ,

 $\underline{a}_{ij} \leq a_{ij} \leq \overline{a}_{ij} (\forall i,j)$  を満たすように求めると,意思決定者が与える一対比較行列 A に含まれる不確かさを考慮することができる [2,3].

表 1: 一対比較行列とウェイト

	一対比較行列			LP による定式化		QP による定式化			
	項目 1	項目 2	項目 3	項目 4	項目 5	$[\underline{w}_i,\overline{w}_i]$	区間幅	$[\underline{w}_i,\overline{w}_i]$	区間幅
項目 1	1	1/2	*1/2	1/4	1/5	[0.0667, 0.0889]	0.0222	[0.0653, 0.0917]	0.0264
項目 2		1	2/3	2/4	2/5	0.1333	0	[0.1318, 0.1336]	0.0018
項目 3			1	3/4	3/5	[0.1778, 0.2000]	0.0222	[0.1834, 0.1977]	0.0143
項目 4				1	4/5	0.2667	0	[0.2636, 0.2721]	0.0085
項目 5					1	0.3333	0	[0.3295, 0.3313]	0.0018

# 3 QPを用いた定式化

意思決定者が与える一対比較値  $a_{ij}$  から区間ウェイト  $W_i = [\underline{w}_i, \overline{w}_i]$  を求める問題は次のようになる.

$$\min_{\overline{w}_{i},\underline{w}_{i}} \sum_{i} (\overline{w}_{i} - \underline{w}_{i})^{2}$$
s.t. 
$$a_{ij}\overline{w}_{j} \geq \underline{w}_{i} \qquad \forall i, j(i < j) \\
a_{ij}\underline{w}_{j} \leq \overline{w}_{i} \qquad \forall i, j(i < j) \\
\sum_{i \neq j} \overline{w}_{i} + \underline{w}_{j} \geq 1 \qquad \forall j \qquad (2)$$

$$\sum_{i \neq j} \underline{w}_{i} + \overline{w}_{j} \leq 1 \qquad \forall j \\
\overline{w}_{i} \geq \underline{w}_{i} \qquad \forall i \\
\underline{w}_{i} \geq 0 \qquad \forall i$$

各項目のウェイトのあいまいさは小さい方が望ましいので,最小二乗法と同様の考えから,区間幅の二乗和の最小化が目的関数となる.上2つの制約条件は,区間ウェイトが意思決定者が与えるすべての一対比較値を包含すること表している.次の2つの条件は,比率尺度であるというAHPの特性を考慮し,区間値を基準化するための区間確率関数(IPF)の定義であり,区間確率の冗長な部分が排除される[4].

式 (2) の目的関数を  $\min_{\overline{w_i},\underline{w_i}}\sum_i(\overline{w_i}-\underline{w_i})$  とすると,LP 問題となる.LP 問題の特性から得られる結果は,特定の項目だけ区間幅を持ち,それ以外が実数値となる傾向がある.これに対して,QP 問題として定式化すると,特定の項目だけが大きな区間幅を持つことはなく,あいまいさはすべての項目にばらつく.意思決定者が多項目の一対比較を行うので,与えられる行列の不整合性の原因が特定の項目に起因していると判断することは難しい.よって,LP 問題を用いてあいまいさが特定の項目に偏るよりも,QP問題を用いてすべての項目がある程度あいまいさを持つ結果のほうが自然であると考えられる.

# 4 数值例

一対比較行列が表 1 のように与えられるとする.この行列の特徴は, $a_{13}=1/2$  であり,この要素を除くと各項目のウェイト比は, $w_1:w_2:w_3:w_4:w_5=1:2:3:4:5$  を満たしている.

まず LP による定式化を用いると,項目 1,3 だけが幅があり,それ以外の項目の幅は 0 となっている.よって,意思決定者が与えた項目 1,3 についての一対比較値  $a_{13}$  が不整合の原因であると解釈できる.次に QP による定式化を用いると,すべての項目に幅がありが,中でも項目 1,3 の区間幅が目立って大きくなっている.これは,すべての項目にある程度のあいまいさがあり,特に項目 1,3 が不確実であることを示している. $a_{13}$  に整合性がある一対比較値が与えら

れていないことから項目 1,3 についての判断があいまいになっていることは明らかである.一対比較行列の要素として,これらの項目と項目 2,4,5 との比較値も含まれるので,項目 2,4,5 についても幾分はあいまいさが存在すると考えられる.整合性のある判断を下せない項目が一つでも存在する場合,その項目が他のすべての項目に影響するという観点から,QPによる定式化を用いるほうがより現実問題には適した結果を与える.

# 5 おわりに

意思決定者が与える一対比較行列の不整合さを包含するような区間ウェイトを求めた.区間ウェイトの幅が各項目のウェイトのあいまいさを示しているので,すべての項目についての和が最小化される.多項目の一対比較を行うという特徴から,一対比較行列の不確かさの原因となる項目を特定することは困難である.すなわち,すべての項目にある程度あいまいさがあるウェイトが求められるほうが適当である.QP問題として定式化すると,すべての項目のウェイトが区間値として求められ,これが意思決定者により与えられた情報のあいまいさを反映している.数値例を用いて,LP問題として定式化した場合と比較を行った.

# 参考文献

- [1] T.L.Saaty, The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill (1980)
- [2] K.Sugihara and H.Tanaka, Interval Evalutaions in the Analytic Hierarchy Process by Possibility Analysis, International Journal of Computational Intelligence, 17, 3, pp.567-579(2001)
- [3] H.Tanaka and P.Guo, Possibilistic Data Analysis for Operations Research, Physica-Verlag, Heidelberg (1999)
- [4] Hideo Tanaka, Kazutomi Sugihara and Yutaka Maeda, Non-additive Measures by Interval Probability Functions, Information Sciences, Article in Press

#### 連絡先:

〒 780-8520 高知市曙町 2-5-1 高知大学 人文学部 社会経済学科 円谷 友英

電話: 088-844-8212, FAX:088-844-8225

Email: entani@cc.kochi-u.ac.jp

# ファジィ逆数行列を用いたAHPの整合度とウェイトについて

# Consistency Index and Weights for AHP Using a Fuzzy Reciprocal Matrix

大西 真一 Shin-ichi Ohnishi 北海学園大学 Hokkai-Gakuen Univ. Didier Dubois IRIT, Paul Sabatier Univ., France Henri Prade IRIT, Paul Sabatier Univ., France 山ノ井 髙洋 Takahiro Yamanoi 北海学園大学 Hokkai-Gakuen Univ.

**Abstract:** So far, many forms of fuzzy extensions of the Analytic Hierarchy Process (AHP) have been proposed. They use fuzzy measures or fuzzy sets. One of the most natural uses of fuzzy sets is to use a reciprocal matrix with fuzzy-valued entries. Indeed, using classical AHP, it often occurs that data do not have enough consistency, because of strong conditions bearing on reciprocal data matrices. Fuzzy reciprocal matrices give us flexible specifications of pairwise preference. In this paper, we propose one approach to using fuzzy reciprocal matrix in AHP. Optimal consistency index and weights are derived using a fuzzy constraint satisfaction approach.

# 1. はじめに

階層化分析法 AHP は 1977 年に Saaty により 提案され[4], 意思決定の分野で幅広く使われて いる手法である.データとなる一対比較行列か ら項目や代替案の局所的ウェイトを算出した後 に,最終的に代替案の総合ウェイトにより選好 を明らかにする.通常,AHP では意思決定者に 正確な一対比較を要求するが,実際には正確に 重要さの比を推定し表現することは難しく,デ ータ自体の信頼性の悪さがしばしば指摘される. 現実にデータ行列が充分な整合性を持たないこ とが多いという現象によく表れている.

そこでこの問題を解決するために,ファジィ数を一対比較行列の成分として使う様々な手法が提案されている.それにより意思決定者や状況の不完全さ,選好の度合いをより柔軟に記述することが可能となっている.

通常,一対比較行列のデータは単に一対の項目の比較からだけ得られるので,その全体的な整合性は保証されていない.そこで通常の AHPでは整合性の度合いは固有値から計算される整合度(C.I.)で測られる.これには要素間の選好の推移性が強く関係しているが,ファジィ数を一対比較行列の成分として使うと,その演算のために厳密な推移性は保証できない.そこで本研究ではまず,意思決定者のあいまいな同定で本研究ではまず,意思決定者のあいまいな同定にあまってはまず,意思決定者のあいまに整合している非ファジィ行列によって,意思決定者の整合性の指標を提案する.そして選好の重要度(ウェイト)もまた,この非ファジィ行列を基準として計算される.

# 2. ファジィ逆数行列データ

AHP では一対比較行列の成分 $r_{ij}$ は要素iの要素jに対する重要さ(ウェイト)の比を反映している.本研究で用いるファジィー対比較逆数行

列  $\widetilde{R}=\{\widetilde{r_{ij}}\}$  は ,通常 AHP と同様に対角成分  $\widetilde{r_{ii}}$  が シングルトン  $\widetilde{r_{ii}}=1$  であるが , それ以外の成分  $\widetilde{r_{ij}}$   $(i\neq j)$  は台集合が非負のメンバシップ関数  $\mu_{ij}$  により定義されるファジィ数であるとする . 意思決定者は  $\widetilde{r_{ij}}$  のコア  $r_{ij}$  と台集合  $[l_{ij},\ u_{ij}]$  を通常の AHP と同様に行列の上三角部分 (i< j) について答える . ここでコアは意思決定者が未知の重要度の比に関して最も確からしいと思える値 (-点 ) であり , 台集合はその比が確実に含まれると確信できる範囲である .

本研究での行列の逆数性は  $\mu_{ij}(r) = \mu_{ji}(1/r)$  が成り立つことである[2] .よって次が成り立つ .

$$\operatorname{core}(\widetilde{r}_{ii}) = 1/r_{ii}, \qquad (1)$$

$$supp(\widetilde{r}_{ii}) = [1/u_{ii}, 1/l_{ii}].$$
 (2)

さらに ,本研究ではコアの値が 1 以上 $(r_{ij} \geq 1)$  である成分  $\widetilde{r}_{ij}$  は三角型ファジィ数  $(l_{ij},r_{ij},u_{ij})_{\Delta}$  であると仮定する.しかしここで ,その対称成分  $\widetilde{r}_{ji}$  は必ずしも三角型にならない.また ,逆にもし  $r_{ij} < 1$  ならば  $\widetilde{r}_{ji}$  は三角型ファジィ数  $(1/u_{ii},1/r_{ii},1/l_{ii})_{\Delta}$  となる.

# 3. ファジィ行列データの AHP

本研究で扱うファジィー対比較行列では,通常AHPにおける整合行列の推移性の仮定

$$\widetilde{r}_{ii} \otimes \widetilde{r}_{ik} = \widetilde{r}_{ik}$$
 (3)

は成り立たない.たとえばこの式でi=kとおくと,左辺はファジィ数となるのに右辺はシングルトンとなることからも明らかである.よって推移性を前提とする通常のAHPでの完全な整合性は意味を成さない.

そこで本研究では,データのファジィー対比較行列は,完全に整合している非ファジィ行列のファジィ集合であると解釈する.それぞれのファジィ数はフレキシブル制約と考えられる.完全な整合とは,通常の AHP で用いられているように,次の条件を満たし和が 1 に基準化されたウェイトベクトル  $\mathbf{w}=(w_1, w_2, ..., w_n)$ が存在することで,固有値から計算される整合度(C.I.)の値が 0 であることと同値である.

$$r_{ii} = w_i / w_i \quad (i,j=1,...,n)$$
 (4)

## 3.1 整合性の指標

通常 AHP における整合行列 R が , どの程度ファジィ逆数行列  $\widetilde{R}$  で表現されているファジィ制 約条件を満足しているかを見ていく.言いかえるとファジィ行列データが , 完全に整合している非ファジィ行列をどのように含んでいるかを考えていく.これはウェイトベクトル  $\mathbf{w}=(\mathbf{w}_1,\mathbf{w}_2,...,\mathbf{w}_n)$ に依存しており , その程度は次のように表される .

$$\alpha^* = \max_{w_1, \dots, w_n} \min_{i, j} \left\{ \mu_{ij} \left( \frac{w_i}{w_j} \right) \right\}$$
 (5)

ここでの最大化はできるだけ意思決定者の理想の選好に近づけることを意味していて, $\alpha$ \*を求めるにはファジィ制約問題(FCSP) [1]を解けばよい. $\alpha$ \*はウェイトパターンが意思決定者の明示的な選好にどの程度近いかを表していることから,これを整合性の指標とする.

この FCSP は , もし全ての  $\mu_{ij}$  (i < j)が三角型ファジィ数  $(l_{ij}, r_{ij}, u_{ij})_\Delta$  なら , 次のような非線形計画問題となり , 二分法により解くことができる .

## [NLP]

maximize α

$$w_{j} \{ l_{ij} + \alpha (r_{ij} - l_{ij}) \} \le w_{i} \le w_{j} \{ u_{ij} + \alpha (r_{ij} - u_{ij}) \}$$

$$\sum_{i=1,...,n}^{n} w_{i} = 1, \quad i, j=1,...,n.$$

# 3.2 ウェイト

 $(\widetilde{r}_{ij})_{\alpha^*}$  を成分とする区間行列の中から, $w_i/w_j$  を成分とする行列が完全に整合するようなウェイト  $\mathbf{w}=(w_1,w_2,...,w_n)$ を探す必要がある.そのようなウェイトパターンが複数存在する場合に,その中で最もよいウェイトを選ぶことは,ファジィ行列の成分のコアに最も近い $w_i/w_j$ を選ぶことを意味している.ここで近さは差でなく比で見てやる必要がある.例えば 9 と 8 の違

いは 1/9 と 1/8 の違いと同一に扱われるべきである.よって次のようにウェイトを求める.

minimize 
$$\sum_{i,j}^{n} \left( \log \frac{w_i}{r_{ij}w_j} \right)^2$$
s.t. 
$$\frac{W_i}{W_j} \in (\widetilde{r}_{ij})_{\alpha^*}, \quad \sum_{i}^{n} w_i = 1,$$

$$i,j=1,...,n.$$

この計算は現在までの方法とは異なり,部分的に意思決定者のメンバシップ関数による主観的距離を用いていると考えられる.

# 4. 終わりに

通常の AHP では,意思決定者が正確に重要度の比を推定,表現することが困難なため,正しい一対比較データを答えることは難しい.そこでファジィ逆数行列を用いた場合のウェイトと,ある種の整合性の指標を提案した.この指標は,ウェイトパターンが意思決定者の明示的な選好にどの程度近いかを表していると考えられる.

今後は実データに対してこの手法を実施する 予定である.また,意思決定者の主観距離を考慮した適切なウェイトを追究する必要があると 思われる.

# 参考文献

- [1] D. Dubois, H. Fargier, H. Prade: Possibility theory in constraint satisfaction problems: Handling priority, preference and uncertainty, *Applied Intelligence*, **6**, pp.287-309, 1996.
- [2] P. J. M. van Laarhoven, W. Pedrycz: A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems* **11**, pp.229-241, 1983.
- [3] L. C. Leung, D. Cao: On consistency and ranking of alternatives in fuzzy AHP. *European Journal of OR* **124**, pp.102-113, 2000.
- [4] T. L. Saaty: The Analytic Hierarchy Process. *McGraw-Hill, New York*, 1980.
- [5] A. A. Salo: On fuzzy ratio comparison in hierarchical decision models. *Fuzzy Sets and Systems* **84**, pp.21-32, 1996.

### 連絡先:

大西 真一

北海学園大学工学部電子情報工学科 〒064-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目

Phone: 011-841-1161 内線 7862

Fax: 011-551-2951

E-mail: ohnishi@eli.hokkai-s-u.ac.jp

# ヒューリスティクスを用いた看護師勤務表作成支援システム に関する研究

A Study on Nurse Scheduling Support System Utilizing Heuristics

上野 尚樹\* Naoki Ueno\* 古橋 武\*\* Takeshi Furuhashi\*\*

\*三重大学

\*\*名古屋大学

\*Mie University

\*\*Nagoya University

**Abstract** The authors have developed a nurse scheduling support system. It is difficult for the system to generate schedules that satisfy all the scheduling rules. We have asked a nurse-in-chief to select and modify candidates of schedules generated by the system. In the process of field-testing, it has been found that it takes much time for her in modifying a schedule so that it satisfies equality. This paper introduces heuristics to generate candidates for a schedule with good equality. This paper also introduces a mutation operation to modify parts of a schedule that violate rules other than equality. Experiments are done. The results show that the time to be spent for the scheduling is expected to be shortened to three hours from current two days.

### 1 はじめに

看護師勤務表作成支援システムが実用段階に近づきつつある[1]。看護師勤務表作成問題(Nurse Scheduling Problem)は複雑な組み合せ最適化問題であり、従来は看護師長が休日の2日程を費やして作成してきた。最近のコンピュータの発達には問題で価なノートパソコンを用いて、この最適化問題度の質を看護師長がたたきようになってきた。第四の質を看護師長がたたきるようになってきた。第四できるようになってきた。第四できるようになってきた。第三では、本事性を高める研究を行ってきた。第三でもなる方になってができた。第三でもは、本事性の確保に手間を要していることを知ることができた。

本論文では、平等性を優先的に改善するヒューリスティクスを導入し、その効果を調べる。更に、平等性以外の評価規則を改善する突然変異オペレータを導入し、その突然変異率の最適値を求める。本手法により得られた解候補に対する師長の手直しの模擬試験を行い、これまで2日間を要していた勤務表作成を3時間程度に短縮できる可能性を示す。

### 2 看護師勤務表作成支援システム

看護師勤務表作成問題(NSP)は勤務制約、看護の質、各看護師からの要求等の制約の下で、「日勤」(AM 8:00~PM4:00)、「準夜勤」(PM4:00~AM0:00)、「深夜勤」(AM0:00~AM8:00)の3つの勤務形態を

各看護師に割り付ける組み合せ最適化問題である。 勤務表の例を 図1に示す。この勤務表には、10 人 (Staff A~J)の 14 日分の勤務日程が表されている。 表中の記号日は「日勤、準は「準夜勤」、そして深は「深 夜勤」を表している。勤務表中の空欄は休みを表している。一番左の列は各看護師の熟練の度合いを表している。 熟練度の高い A から経験の浅い C にランク付けされ ている。下段の3つの行は各日の各勤務形態を割付 けられた看護師数を表す。右側の4つの列は各看護 師への各勤務の割付け日数を表す。

勤務表の制約には、勤務系列、各曜日の割付け勤 務、必要人数、および割付け日数に関するものがあ る 勤務系列は一人の看護師に注目したときに、「日 「深夜勤」や「日勤」 「休み」 のように複数日にわたる勤務形態の系列のことであ り、看護師の健康面で無理のない勤務形態の系列と する必要がある。各曜日の割付け勤務に関する制約 は、例えば、「看護師 A は土曜日に準夜勤を割付け ない」等、看護師の特殊性を反映した制約である。 必要人数は、例えば深夜勤2人の内の1人は必ず熟 練の看護師を割付ける等、看護の質を維持するため の制約である。割付け日数は、看護師間で均等に割 付けることが基本であるが、各看護師の事情や先月 分の割付け日数も考慮し、広い視点で公平感を与え る割付けを行う必要がある。さらに、現場では、看 護師間の相性、アクシデントによる急な日程変更に 対しても柔軟な対応が要求される。

								日	付										
熟練度	名前	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	田	準	深	休
A	Staff A	準	準		準	準	深	準		日	日	深	準		日	3	5	3	2
A	StaffB		日	日	深	日	日	深	準	深			日	深	準	3	5	3	4
A	Staff C		日	日	深		準		日	日	深		準	日	日	4	6	2	2
В	Staff D	日	深		日	深	準	日		準	準	日	深		日	3	5	3	3
В	StaffE	日	日	深		準	日	日	深		日	日		準	準	3	6	3	2
В	Staff F	日	日	深	準	準		日	日	深		準	日	日	深	2	6	3	3
В	Staff G	準		日	日	深		準	日	日	深	準	日	日	深	2	6	3	3
C	Staff H	日	深	日	準		日	日	深		準	日	日	深	準	2	6	3	3
С	Staff I	深		準	日	日	深		準	日	日	深		日		4	5	2	3
С	Staff J	深	準	日		日	日	深		準	日	日	深	準	日	2	5	4	3
	日	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4				
	準	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2				
	深	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2				

図1: 看護師勤務表の例

現在まで遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)を用いた勤務表作成システム[3]などスケジューリングシステムの開発が行われてきたが、まだ、普及は見ない。看護師勤務表作成支援システムにおいては、システムが呈示するたたき台に対して師長が規則を満たしていない箇所を修正し、規則に書きされない各看護師に対する「心のこもった」さまざまな配慮を加えることを前提とする。本論文の手法は、看護師間の平等性の確保に重点を置いた解探索を行うことによって、看護師長による手動修正の労力を減らすことを目指す。

# 3 提案手法

### 3.1 平等性を優先するヒューリスティクス

提案手法は、平等性を優先的に満たすヒューリスティクスを使用する。このアルゴリズムを以下に示す。また、表 1 は満たさなければならない平等性を示す。

### [アルゴリズム]

- -(I) 満たしていない平等性を探す。
- (II) (I)の結果に対して、平等性の評価値が良くなるように勤務の入れ替えを行う。
- (III) 平等性を全て満たすまで(I)に戻る。
- (IV) 平等性を満たしているようなら平等性以外の評価値がよくなるように勤務の入れ替えを行う。ただし、 平等性の評価値を悪くしない入れ替えを行う.
- (V) (IV)を繰り返す。

表1: 満たさなければならない平等性

2: 1 19:00 019 10:00 019 10:01
休日の数(その月の土日祝日分)
準夜勤、深夜勤の数(合計月8回まで)
月に二回の連休
月に一回の土日の連休
早出·遅 出の数
週に二回の休日
希望の休日

## 3.2 突然変異オペレータの使用

3.1 の手法により平等性を満たす解候補が優先的に生成されるが、その他の評価規則に対しては局所解に陥りやすい。そこで,平等性以外の評価規則を満たしていない箇所を探し、その箇所の勤務を適切な他の勤務に置き換える突然変異オペレータを導入する。

## 4 実験

本節では、提案手法である平等性を確保するヒューリスティクスと突然変異オペレータとの組み合せの有効性を検証するために実験を行った。

### 4.1 問題設定

看護師数 26 人の病院の例を用い、1ヶ月間(31日)の勤務表を作成する実験を行った。実験に用いた評価規則は実際の病院で考慮されているものを使用した。また、評価値は評価規則に違反している勤務の日数を用いる。

# 4.2 平等性を優先するヒューリスティクスの効果

平等性を優先するヒューリスティクスの効果について実験を行った。比較のために、従来手法として全ての評価規則の修正を同等に扱うヒューリスティクスを用いた。

従来手法および提案手法のヒューリスティクスを用いて1000回の演算(約1時間、Dell DIMENSION DIM2400C, Celeron2.0GHz))をそれぞれ50回試行し、平均を求めた。そのときの禁止勤務系列違反数、必要人員不足数、平均勤務日数からの差の合計を違反数とし、初期個体からの違反数の推移を調べた。図3は従来手法と提案手法による総合評価値の平均値の推移を示す。また、図4は従来手法と提案手法による平等性の評価値(平均勤務日数からの差の合計)のみの平均値の推移を示す。

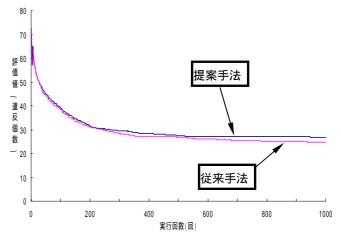


図3: ヒューリスティクスの効果(総合評価値)

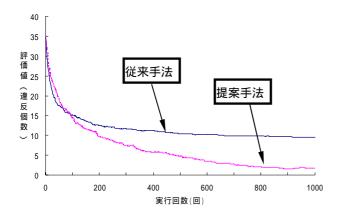


図4: ヒューリスティクスの効果(平等性評価値)

実験結果は、総合評価値では従来手法と提案手法 で差はないが、平等性に対する評価値では提案手法 の方が良い結果が得られた。

### 4.3 突然変異オペレータの組み合せ効果

平等性以外の評価規則を満たすように突然変異オペレータを使用した。平等性以外の評価規則を満たしていない箇所を探し当てた際に突然変異オペレータを適用する確率を 0、0.4、0.5、0.6 と変えて,それぞれ 2 0回試行した。総合評価値の各平均値の推移を図 5 に示す。また、平等性の評価値の平均値の推移を図 6 に示す。

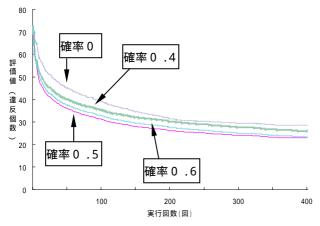


図 5: 総合評価値 vs.突然変異確率

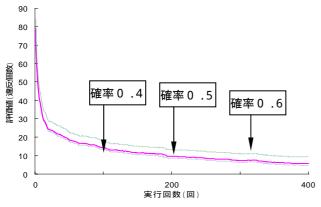


図 6:平等性の評価値 vs. 突然変異確率

突然変異オペレータを使用することにより総合評価値を良くすることができた。突然変異確率が 0.5 のときに最も良い結果を得た。しかし、平等性の評価値に関しては突然変異オペレータを使用しない方が良い結果が得られた。この理由として、突然変異オペレータが平等性以外の評価規則を満たすように探索する際に平等性を崩してしまったためと考えられる。

#### 4.4 フィールドテスト

フィールドテストにおいて、ある看護師長に 2003 年8月と9月分の勤務表を従来法により作成しいただき、2004年1月と2月分を本手法により作成していただいた。平等性以外の評価規則を満たすための突然変異の確率は 0.5 とした。勤務表が呈示されてからの手動修正時間と、修正した箇所の個数を計り、それぞれの平均を求めた。この結果を表 1 に示す。

表 1: 手動修正の時間,修正した箇所の個数

	従来手法	提案手法
手動修正時間(時間)	6 . 8 4	2 . 4 4
修正した箇所の個数	152.6	98.3

表1より提案手法により呈示された解候補の修正に要した時間は半分以下となった。提案手法の生成した解候補に基づいた結果は実用に供された.

### 4.5 擬似師長による勤務表作成例

実際に今回の提案手法を用いて、筆者の一人(上野)が擬似師長になり、勤務表を作成した。但し、システムの演算は 400 回(約30分)までとした。システムが呈示した勤務表を図7に、そこから手動で修正した勤務表を図8に示す。図7、8は26人の看護師における1ヶ月分の勤務表である。「リ」はリーダ勤務、「日」は日勤、「・」は準夜勤、「|」は深夜勤、「遅」は遅出、「早」は早出を表し、右の7列はそれぞれの勤務種類の割り付けられた回数を表す。また、勤務表中の四角で囲まれた11箇所は評価規則に違反していることを表している。

実際に手動で勤務表を修正したが、約2時間半で図8の勤務表を作成できた。擬似師長として勤務表を作成することで、平等性以外の違反箇所の修正は多くの場合、該当箇所のみの修正で済むが、平等性を満たすためには同時に多数の勤務を変更しなければ達成できないことを確認して、本手法により呈示された勤務表が平等性を優先的に満たしていることで、その後の修正は容易であった。全体で約3時間

で勤務表を作成できたので、従来、看護師長が手作業で2日間を要していたことと比較すれば格段の進歩である。

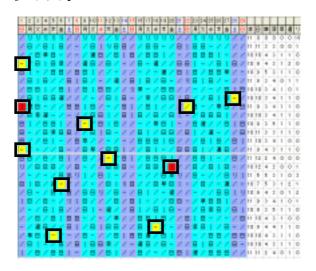


図7:システムが呈示した勤務表例

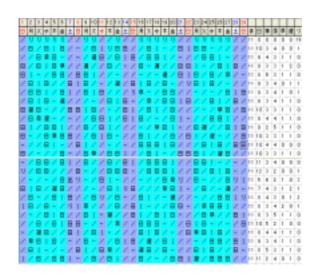


図8: 図7から手動で修正した勤務表例

### 5 まとめ

看護師勤務表作成支援システムは看護師長の負担を軽減する為のシステムである。完璧な解が得られなくても、修正の行い易い解を呈示できれば、看護師長の負担を軽減できる。

本論文では、平等性を優先的に改善するヒューリスティクスと平等性以外の評価規則を改善する突然変異オペレータを組み合わせる方法を提案した。実験結果は、平等性を改善した解候補の呈示により看護師長が修正を行いやすくなり、修正に要する時間を半分以下に短縮できることができた。今後は、複数の病院におけるフィールドテストを行い、本システムのさらなる改善を進めていきたい。

今回の提案システムは完璧な解が得られないが 修正の行い易い解を呈示することを目標として研究 を行ってきたが、今後の課題としては、全ての評価 規則を満たした解候補を呈示できるシステムを追求 し、看護師長の負担をさらに軽減していきたい。ま た、インタフェースの工夫次第で、看護師長の負担 を大きく軽減できることもわかった。見易い勤務表 の追求も進めていきたい。

# 参考文献

- [1] http://www.sbn.co.jp/
- [2] 上野、古橋「対話型看護師勤務表作成支援システムのインタラクティブ性に関する一考察」第19回ファジィシステムシンポジウム、page125-128、2003
- [3] 川中、吉川、篠木、鶴岡「GA を用いた看護師 勤務表自動配置における制約条件の取り入れ 方と探索効率への影響」第19回ファジィシス テムシンポジウム、page103-106、2003

[問い合わせ先]

〒 514-8507

三重県津市上浜町 1515

三重大学大学院 工学研究科

情報工学専攻 パターン情報処理研究室

上野 尚樹

Tel: 059-231-9746, Fax: 059-231-9746 E-mail: <u>ueno@pa.info.mie-u.ac.jp</u>

# プロスペクト理論の価値関数を 考慮したファジィ・ポートフォリオ選択

A Fuzzy Portfolio Selection Incorporating a Value Function in Prospect Theory

水沼 洋人

Hiroto Mizunuma

名城大学

Meijo University

**Abstract:** Mizunuma–Watada's fuzzy portfolio model is a method of securities investment incorporating a vague aspiration level which decision makers have. In this model, both of a necessary level and a sufficient level are required to determine the vague aspiration level; however, not all of the decision makers have these two targeted values. For instance, the decision makers sometimes have another targeted value that resembled a reference point in prospect theory. In other words, it is possible that fuzzy portfolio model can not determine an appropriate solution. To overcome this problem, we suggest a revised fuzzy portfolio model incorporating a reference point which decision makers have.

## 1 はじめに

ポートフォリオ選択に対する問題点の一つとして,得られた最適ポートフォリオからの解の選択方法が挙げられる.一般に,期待効用理論によって,その解は比較的容易に得られるとされている.しかしながら,現実の問題では,意思決定者の有する効用を何らかの関数として同定することは困難である.このため,意思決定者である投資家は,解の選択に対して望ましいと判断できうる解を試行錯誤的に探索しているものと考えられている.このことから,水沼と和多田は,意思決定者の解に対する満足度水準を考慮したファジィ・ポートフォリオ・モデル[2]について提案している.また,石井は,望ましさ度曲線[3]を適用した解の選択方法[4]について議論しているが,一般的にポートフォリオ選択に対するこの種の研究は比較的少ない.

前者のファジィ・ポートフォリオ・モデルでは、二つのファジィ目標、すなわち目標期待収益率および目標リスクの両者をポートフォリオ・モデルに直接反映させたモデルであるが、これらのファジィ目標を示すメンバーシップ関数を規定するためには、意思決定者がそれぞれのファジィ目標に対して必要レベルと十分レベルを設定する必要がある。しかしながら、意思決定者によっては、異なる要求レベルを有している場合も十分に考えられる。

本研究では、意思決定者が異なる要求レベルを有する

場合を考慮したファジィ・ポートフォリオ選択について 議論を行う. 特に,ここでは, Kahneman と Tversky によるプロスペクト理論 [5] を基礎にした,解に対する 満足度水準とそのモデル化について提案する.

### 2 ポートフォリオ・モデル

### 2.1 Markowitz によるモデル

Markowitz によるポートフォリオ・モデル [1] は、以下の 2 次計画問題として定式化される.

[P1]

min. 
$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sigma_{ij} x_i x_j$$
 (1-a)

s.t. 
$$\sum_{i=1}^{n} \mu_i x_i = E \tag{1-b}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i = 1 \tag{1-c}$$

$$x_i > 0$$
  $(i = 1, 2, \dots, n)$  (1-d)

ここで,E は期待収益率, $\sigma_{ij}$  は第i 証券と第j 証券との共分散, $\mu_i$  は第i 証券の収益率, $x_i$  は第i 証券への投資比率である.

 ${f P1}$  に示されたモデルは、ある任意の期待収益率 E を与え、このもとで分散、すなわちリスクを最小にする解を見出すモデルである。図 1 に示された投資機会集合上の曲線  $V_{min}$   $E_{max}$  は、各期待収益率 E とそれによっ

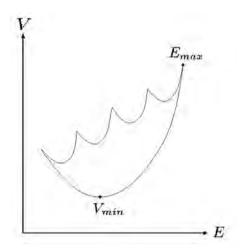


図1 投資機会集合と有効フロンティア

て得られるリスクとの関係を表したものである. この曲線  $V_{min} E_{max}$  は,一般に有効フロンティアとよばれており,この曲線上の期待収益率とリスクとの関係は,トレード・オフの関係にある. すなわち,有効フロンティア上の解は,パレート解である.

**P1** による意思決定は、一般的には意思決定者の有している効用を用いて解の選択を行うとされている. しかしながら、現実の問題においては、各意思決定者の効用を何らかの関数として表現することは困難である.

## 2.2 ファジィ・ポートフォリオ・モデル

一方, 意思決定者は, あらかじめ期待収益率およびリスクに対して何らかの目標値を有していると判断できる. ただし, これらの目標値は, 明確に規定される場合は少なく, 通常「だいたい〜」といったあいまいな目標であると解釈される. このような観点から, 筆者らは, 期待収益率およびリスクに対する目標値にファジィ概念を適用した意思決定者の希求水準の満足化を考慮したファジィ・ポートフォリオ・モデルを提案している. その提案手法は, 次のとおりである.

目標期待収益率および目標リスクの各々に対して意思決定者は、必要レベルおよび十分レベルを設定する。ここで、必要レベルおよび十分レベルとは、前者が最悪の達成度を意味し、後者が十分満足できる達成度を意味している。これより目標期待収益率および目標リスクに対するメンバーシップ関数が規定される。たとえば、シグモイド関数型のメンバーシップ関数を採用すれば、目標期待収益率は次のように表される。ただし、 $E(x) = \sum_{i=1}^n \mu_i x_i$ とする。

$$\mu_E(E(\boldsymbol{x})) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_E(E(\boldsymbol{x}) - E_M))}$$
 (2)

また,目標リスクに関しては,次のように表される. ただし, $V(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} x_i x_j$  である.

$$\mu_V(V(\boldsymbol{x})) = \frac{1}{1 + \exp(\alpha_V(V(\boldsymbol{x}) - V_M))}$$
(3)

ここで、Bellman と Zadeh による最大化決定 [6] を適用すれば、 $\mathbf{P1}$  は以下のファジィ・ポートフォリオ・モデルとして定式化される。

### [P2]

max. 
$$\lambda$$
 (4-a)

s.t. 
$$\lambda + \exp(\alpha_V(V(\boldsymbol{x}) - V_M))\lambda \le 1$$
 (4-b)

$$\lambda + \exp(-\alpha_E(E(\boldsymbol{x}) - E_M))\lambda \le 1$$
 (4-c)

$$\sum_{i=1}^{n} x_i = 1 \tag{4-d}$$

$$\lambda, x_i > 0 \qquad (i = 1, 2, \dots, n)$$
 (4-e)

ここで、 $\lambda$  は解に対する満足度、 $V_M$  はリスクに対する必要レベルと十分レベルの中間値、 $E_M$  は期待収益率に対する必要レベルと十分レベルの中間値、 $\alpha_V$  および $\alpha_E$  はメンバーシップ関数の形状を決定するパラメータで、ともに  $\alpha_V>0$ 、 $\alpha_E>0$  である。ただし、これらのパラメータの値を大きくすれば、あいまいさの幅は小さくなる。

基本的に **P2** を用いて解を求めればよいが、もとの数理計画問題が線形モデルである場合には、シグモイド関数を用いたメンバーシップ関数を適用することによって非線形モデルに帰着される。すなわち、求解プロセスの観点からすれば、改悪されたことになる。しかしながら、この問題点は容易に解決できる。

シグモイド関数 f(x) は, f(x) = 0 を漸近線とすることから  $\lambda > 0$  である. このため, (4-b) 式および (4-c) 式の制約条件式は, 次の操作を行うことでより容易なファジィ・ポートフォリオ・モデルに帰着できる.

目標期待収益率に関しては、以下のとおりである.

$$\alpha_E(E(\boldsymbol{x}) - E_M) \ge \log \frac{\lambda}{1 - \lambda}$$
 (5)

また、目標リスクに関しては、以下のとおりである.

$$-\alpha_V(V(\boldsymbol{x}) - V_M) \ge \log \frac{\lambda}{1 - \lambda} \tag{6}$$

ここで、 $\log(\lambda/(1-\lambda))$  を  $\lambda_t$  とおくと以下となる.

$$\lambda = \frac{1}{1 + \exp(-\lambda_t)} \tag{7}$$

シグモイド関数は単調増加関数であるため、 $\lambda$  を最大化することは  $\lambda_t$  を最大化すること,すなわち  $\log(\lambda/(1-\lambda))$  を最大化することと等価である. したがって, $\mathbf{P2}$  は,次の  $\mathbf{P3}$  に帰着される.

[**P3**]

max. 
$$\lambda_t$$
 (8-a)

s.t. 
$$\alpha_V V(\boldsymbol{x}) + \lambda_t \le \alpha_V V_M$$
 (8-b)

$$\alpha_E E(\boldsymbol{x}) - \lambda_t \ge \alpha_E E_M \tag{8-c}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i = 1 \tag{8-d}$$

$$x_i \ge 0$$
  $(i = 1, 2, \dots, n)$  (8-e)

以上より、実際に解を導出する際には、 $\mathbf{P2}$  よりも  $\mathbf{P3}$  を用いる方が容易である.ただし、満足度  $\lambda$  の値を得るためには、 $\mathbf{P3}$  から得られた  $\lambda_t$  を (7) 式に代入して求める必要がある.

## 3 提案モデルの構築

### 3.1 プロスペクト理論

ここでは、Kahneman と Tversky によるプロスペクト理論 [5] について概説し、その後、提案モデルへの構築について議論する.

プロスペクト理論は、客観的確率や期待効用理論で算出される効用では説明できない人間の心理的な意思決定を説明しようとする叙述的理論である。この理論における平均的な人間の意思決定は、従来の期待効用最大化に基づくものではなく、ある価値関数を最大化するような意思決定を行うものとされている。その価値関数は、次式のとおりである\*1.

$$V(x, p; y, q) = \pi(p) v(x) + \pi(q) v(y)$$
(9)

ここで、 $\pi(\cdot)$  はウエイト関数、 $v(\cdot)$  は価値関数 (あるいは評価関数) である.この式の意味は、利得 x を確率 p、利得 y を確率 q で得る場合の価値を表している.ウエイト関数および価値関数のそれぞれを図 2 および図 3 に示す.ただし、図 2 に関しては、文献 [7] に掲載のものを参考にしている.

図2に示されたウエイト関数は、人間は主観的な評価によって客観的な確率を修正していることを意味している。プロスペクト理論における人間、すなわち平均的な意思決定者は、ごく小さな確率を過大評価し、中程度および大きな確率に対しては過小評価する傾向を有している.

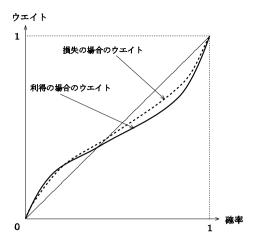


図2 ウエイト関数

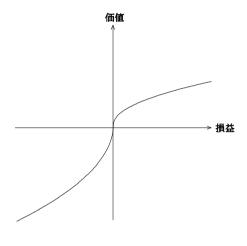


図3 価値関数

図3に示された価値関数の原点は、参照点あるいは リファレンス・ポイントとよばれる点で, 意思決定者が ある物事の評価を行う際の基準とする点である. なお, 証券投資における参照点は, 取得価格が該当するものと 考えられている [8] が、一般的に参照点を定めることは 困難であるとされている. その他の特徴としては、利益 (損失) の増加量とその価値の増加量 (減少量) は比例し ないことが挙げられる. すなわち, 利益(損失)の増加 量に対する正(負)の価値の増加量は逓減する. さらに, 単位あたりの利益の増加による価値の増加量と損失の増 加による負の価値の増加量は同じではなく,後者の増加 量の方が大きい. つまり, 単位あたりの損失の増加は, 利益の増加のときよりもその価値の感応度が大きいこと を示している. なお, Tversky と Kahneman は, 価値 関数の特定化に関して追加的な実験を行った. その結果 から価値関数  $v(\cdot)$  は、次式のように特定できたと報告

<sup>\*1</sup> 正確には、p+q<1、または  $x\geq 0\geq y$  または  $x\leq 0\leq y$  のいずれかの場合に (9) 式が適用される.

p+q=1, かつ x>y>0 または x< y<0(すなわち, x, y が共に正または負) の場合には、次式が適用される.

 $V(x, p; y, q) = v(y) + \pi(p)\{v(x) - v(y)\}\$ 

している [9].

$$v(x) = \begin{cases} x^{0.88} & ; x \ge 0 \\ -2.25 (-x^{0.88}) & ; x < 0 \end{cases}$$
 (10)

プロスペクト理論における意思決定者の判断とその 意思決定行動についての特徴として, 平均的な意思決定 者は、利益よりも損失の方を重く感じる傾向を有してい る. これは利益と損失が同額であるような賭けにおい て、その生起する確率がともに 0.5 である場合には、そ の賭けには参加しないことを意味する. このことは、図 2の客観的な確率が 0.5 である場合のウエイトを確認す ることで容易に理解できる. すなわち、利得の場合の ウエイトよりも損失の場合のウエイトの方が大きいた め、(9) 式から得られる価値そのものは負となるからで ある. また, 利益が出ている場合の判断と損失が生じて いる場合の判断のそれぞれの意思決定行動に関しても違 いがある. たとえば、株価が上昇した後、すなわち図3 において正の価値が増加した場合には、投資家である意 思決定者は相対的に高い価値を得ている. さらに, この 状態から株価が上昇する場合の価値の増加は, 感応度逓 減によって小さなものでしかない. しかし、株価の下落 は大きいな価値減少をもたらす. このため、利益が得ら れている状態の場合には,不確実な利益をより追求する よりも、確実に得られている利益の確保が好まれる. 一 方,株価が下落した場合には、負の価値を得ることにな る. しかしながら、これ以上の株価下落による負の価値 の増加は逓減するのに対し、株価の回復は大きな価値回 復につながる. このため、損失が生じている場合には、 確実な損失を確定させるよりも不確実な利益, すなわち 損失の縮小を追求することが好まれる. 以上のことよ り、平均的な意思決定者は、利益が得られている場合に はリスク回避的であるが、損失が生じている場合にはリ スク愛好的な行動をとる傾向を有している.

#### 3.2 提案モデル

さて、プロスペクト理論で示された意思決定者の判断とその意思決定行動を考慮した提案モデルの構築に関して議論する。先で述べたように、筆者らが提案しているファジィ・ポートフォリオ・モデルでは、意思決定者が希求する目標期待収益率と目標リスクの両者をポートフォリオ・モデルに直接反映させるものであった。この目標期待収益率と目標リスクの設定は、意思決定者自身が設定するものであるが、ここで要求されるパラメータは両指標に対する十分レベルと必要レベルである。しかしながら、上記と異なる目標値、すなわち参照点に該当すると考えられる目標値を有している場合には、その目

標値を適切に表現する必要性があるものと考えられる. たとえば、投資家である意思決定者が投資を行うということは、いくらかの利益を期待しての行動であると解釈できる. その際、意思決定者は、現状の社会情勢や経済状況等を考慮して概ね適切であると判断できる範囲内で期待収益率を想定しているものと考えられる. その期待収益率は、各意思決定者によって異なるが、リスクをとって投資するのであるから、たとえば (預貯金金利+ $\alpha$ ) 程度の収益率を想定しているものと考えてよいだろう. このように仮定すれば、(預貯金金利+ $\alpha$ ) 程度の収益率が期待できない場合には、図 3 に示された価値関数の損失を表すものと捉えることができる.

一方,ファジィ・ポートフォリオ・モデルにおける目標期待収益率は,意思決定者が希求する期待収益率の目標値を表していた。その際,その目標値は,必要レベルから十分レベルへ向かうほど満足度が大きくなる。この満足度の取りうる範囲は,0から1の間であったため,1に近づくほど満足度は増加する。逆に,0に近づくほどその満足度は減少する。すなわち「満足でない」という度合いが強くなることを意味すると考えられる。このことから,満足度が0.5である場合は,「満足である」と「満足でない」の中間,つまり中立的な意味合いを有するものと捉えることができる。したがって,価値関数の概念を適用した期待収益率は,次式によって表される。ただし, $E_R$  は参照点を表す期待収益率である。

$$\mu_{E}(E(\boldsymbol{x})) = \begin{cases} \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_{E}(E(\boldsymbol{x}) - E_{R}))} \\ \vdots E(\boldsymbol{x}) \ge E_{R} \\ \frac{1}{1 + \exp(-2.25 \alpha_{E}(E(\boldsymbol{x}) - E_{R}))} \\ \vdots E(\boldsymbol{x}) < E_{R} \end{cases}$$
(11)

このメンバーシップ関数を定めるために必要なパラメータは、参照点を表す $E_R$ と関数の形状を規定する $\alpha_E$ である。パラメータ $\alpha_E$ は、意思決定者が十分レベルに該当する期待収益率を想定していれば、次式によって比較的容易に求めることが可能である。

$$\alpha_E = \frac{\log \frac{0.99}{1 - 0.99}}{E_U - E_R} \tag{12}$$

したがって、(11) 式のメンバーシップ関数を定めるためには、意思決定者が参照点を表す期待収益率と十分レベルに該当する期待収益率の2つの目標値を有していればよいことになる。ただし、(11) 式は $\mu_E(E(x))=1$ を漸近線とすることから、十分レベルを0.99 などと近似する必要がある。

以上より, 本研究で提案するポートフォリオ・モデル

は、以下のとおりである.

#### [P4]

max. 
$$\lambda$$
 (13-a)

s.t. 
$$\lambda + \exp(\alpha_V(V(\boldsymbol{x}) - V_M))\lambda \le 1$$
 (13-b)

$$\lambda + \exp(-\alpha_E(E(\boldsymbol{x}) - E_R))\lambda \le 1$$
 (13-c)

$$\sum_{i=1}^{n} x_i = 1 \tag{13-d}$$

$$\lambda, x_i \ge 0$$
  $(i = 1, 2, \dots, n)$  (13-e)

ただし、このモデルによる解が  $\lambda < 0.5$  である場合には、次のモデルによって解を求める必要がある.

### [P4']

max. 
$$\lambda$$
 (14-a)

s.t. 
$$\lambda + \exp(\alpha_V(V(\boldsymbol{x}) - V_M))\lambda \le 1$$
 (14-b)

$$\lambda + \exp(-2.25 \alpha_E (E(\boldsymbol{x}) - E_R))\lambda \le 1$$
 (14-c)

$$\sum_{i=1}^{n} x_i = 1 \tag{14-d}$$

$$\lambda, x_i \ge 0 \qquad (i = 1, 2, -, n)$$
 (14-e)

## 4 数值例

ここでは提案手法の有効性を確認するために,簡単な数値例として全証券数 30 からなるポートフォリオ選択を扱う.データは,日経 225 採用銘柄からランダムに 30 銘柄を抽出したもので,その対象銘柄は,第一製薬,パイオニア,三菱自動車工業,ニコン,KDDI,横浜銀行,野村ホールディングス,損害保険ジャパン,クレディセゾン,静岡銀行,日本水産,キッコーマン,セブンイレブンジャパン,東映,森永製菓,東レ,花王,昭和シェル石油,日本曹達,ブリヂストン,大林組,川崎重工業,ヤマハ,NTN,トピー工業,JR 東日本,商船三井,東京電力,ヤマト運輸および全日本空輸の 30 銘柄である.これらの銘柄に対する収益率  $\mu_i$  とリスク $\sigma_{ij}$  は,2000 年 1 月から 3 年間分の月次収益率をもとに算出した.

また,意思決定者が定める目標期待収益率と目標リスクは,次のように与えた.  ${f P2}$  に関しては,目標期待収益率の十分レベルを  $E_U=0.04$ ,必要レベルを  $E_L=0.03$  とし,目標リスクの十分レベルを  $V_U=0.015$ ,必要レベルを  $V_L=0.025$  とした.メンバーシップ関数の形状を表すパラメータ  $\alpha_E$  および  $\alpha_V$  は,(12)式を用いて算出した. ただし,目標リスクに関するメンバーシップ関

表 1 P2 および P4(P4') による解

	満足度 $\lambda$	期待収益率	リスク
P2	0.293954	0.034047	0.020953
<b>P4(P4')</b>	0.231339	0.034419	0.021307

数に関しては、次式によって求めている.

$$\alpha_V = \frac{\log \frac{1 - 0.99}{0.99}}{V_U - V_M} \tag{15}$$

ここで  $V_M$  は、十分レベルと必要レベルの中間の値、 すなわち  $(V_U + V_L)/2$  である.

次に  ${\bf P4(P4')}$  に関しては,目標期待収益率の十分レベルを  $E_U=0.04$  とし,参照点に該当する目標値を  $E_R=0.035$  とする.すなわち, ${\bf P2}$  における  $E_M(=(E_U+E_L)/2)$  が, $E_R$  と同じ値になるように定めている.また,目標リスクおよびメンバーシップ関数の形状を表すパラメータ  $\alpha_E$  と  $\alpha_V$  は, ${\bf P2}$  と同様とする.

上記のパラメータを用いたポートフォリオ選択の解を表 1 に示す.ここに示された解は,ともに満足度  $\lambda$  が 0.5 を下回っている.すなわち,「満足である」というよりも「満足ではない」という度合いが大きいと解釈される解である.仮に満足度  $\lambda$  が 0.5 以上であれば, $\mathbf{P2}$  および  $\mathbf{P4}$  から得られる解は,同じ解を示すことになる.これは上記で設定したパラメータにおいて  $E_M=E_R$  であるため,両モデルは同一のモデルに帰着されるためである.

得られた解は、両モデルとも満足できると解釈される ものではない. 特に、本研究で提案したモデルによる解 の方が、より低い満足度を示している. しかしながら、 得られた期待収益率は、P2による解よりも高い収益率 を示している. この理由は、意思決定者の有する希求水 準の違いにある. ここで設定したパラメータは, 両モデ ルに対してほぼ同一の値を与えている. 異なる点は, 目 標期待収益率において必要レベルを設定する代わりに参 照点に該当する目標値を定めることである. ただし,参 照点に該当する目標値は, 十分レベルと必要レベルの中 間値と同じになるように設定している. このため, パラ メータからみた意思決定者の希求水準の違いは、基本的 に存在しないと判断できる. しかしながら, 必要レベル を与えるのか、あるいは参照点に該当する目標値を与え るのかは、その意味自体に違いがある. すなわち、参照 点に該当する目標値を与えることは、必要レベルを与え ることよりも,より明確に希求水準を有しているものと

判断できるからである.このため,参照点に該当する目標値を有する意思決定者にとっては, $\mathbf{P2}$  によって近似的に解を求めることは可能であっても,満足度  $\lambda$  が 0.5 を下回る場合には適切でない.すなわち,参照点に該当する目標値を有する意思決定者にとっては,その目標値を下回ることは可能な限り回避したいため,この場合には満足度  $\lambda$  は急激に減少するであろう.また同時に,得られる期待収益率が参照点に該当する目標値を下回るにしても,その減少を可能な限り止めたいと考えていると解釈できる.このことから, $\mathbf{P2}$  よりも  $\mathbf{P4}(\mathbf{P4'})$  によって解を導出する方が適切である.よって,本提案モデルは,参照点に該当する目標値を有する意思決定者にとっては有効なモデルであると考えられる.

## 5 おわりに

本研究では、筆者らが提案しているファジィ・ポートフォリオ・モデルの拡張モデルを提案した。その提案モデルは、Kahneman と Tversky によるプロスペクト理論で示された価値関数を考慮したモデルである。すなわち、参照点に該当する目標値を直接ポートフォリオ・モデルに反映させ、その目標値が実現されない解に対する満足度水準の設定の方法およびそのモデル化に関するものである。

ファジィ・ポートフォリオ・モデル, すなわち P2 のモデルと本提案手法のポートフォリオ・モデルの相違を示すために, 意思決定者によって与えられるパラメータはほぼ同一のものであることを条件に, 全証券数 30 からなるポートフォリオ選択問題を扱った. 両モデルの定式化の方法により, 得られた解を評価するための指標である満足度  $\lambda$  の値が 0.5 以上である場合には, 両モデルによる結果は同一のものであることが示された. また,数値例より, 満足度  $\lambda$  が 0.5 を下回る場合には, 本提案手法の方が得られる満足度の値は低いものの期待収益率は目標値に近い結果を導出していることがわかった.

以上のことから、**P2** によるモデルで想定される意思 決定者と本提案手法で想定される意思決定者の相違は、 ともに意思決定者の有する効用を何らかの関数として同 定することが困難である点は同一である.しかし、**P2** のモデルで想定される意思決定者の方が、本提案手法の モデルで想定される意思決定者よりも、よりあいまいさ を有しているといえる.このため、意思決定者によって 与えられるパラメータから目標期待収益率に対する必 要レベルが推定できるものであっても、参照点に該当す る目標値を有する意思決定者に対しては、本提案手法を 適用する方がより適切な解を提示できると考えられる. よって,適用するポートフォリオ・モデルは,意思決定 者が参照点に該当する目標値を有しているか否かにより 区別する必要があるといえる.

## 参考文献

- H. M. Markowitz: "Portfolio Selection," Journal of Finance, Vol.12, No.1, pp.77-91(1952)
- [2] 水沼 洋人, 和多田 淳三: "ファジィ・ポートフォリオ・セレクション ―意思決定者の希求水準の実現",システム制御情報学会論文誌, Vol.8, No.12, pp.677-684(1995)
- [3] J. S. Hammond, R. L. Keeney and H. Raiffa : "Smart Choices," Harverd Business School Press, 1999. (小林 龍司 訳: 「意思決定アプローチ」, ダ イヤモンド社 (1999))
- [4] 石井 吉文: "意思決定理論の現代ポートフォリオ理 論への適用", 証券アナリストジャーナル, Vol.37, No.11, pp.102-111(1999)
- [5] D. Kahneman and A. Tversky: "Prospect Theory
  : An Analysis of Decision under Risk," *Econometrica*, Vol.47, pp.263-291(1979)
- [6] R. E. Bellman and L. A. Zadeh: "Decision Making in a Fuzzy Environment," Management Science, Vol.17, No.4, pp.141-164(1970)
- [7] A. Tversky and C. Fox: "Weighting Risk and Uncertainty," Psychological Review, Vol.102, pp.269-283(1995)
- [8] J. Goldberg and R. Von Nitzsch: "Behavioral Finance," FinanzBuch Verlag GmbH, 1999. (真壁 昭夫 監訳: 「行動ファイナンス」, ダイヤモンド社 (2002))
- [9] A. Tversky and D. Kahneman: "Advances in Prospect Theory: Cumulative Representation of Uncertainty," *Journal of Risk and Uncertainty*, Vol.5, pp.297-323(1992)

### 連絡先

水沼洋人

名城大学 理工学部 情報工学科

〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-501

TEL: 052-838-2423 FAX: 052-832-1298

E-mail: mizunuma@ccmfs.meijo-u.ac.jp

# 可能性予測モデルと日本経済の分析への応用

# Possibilistic Forecasting Model and Its Application to analyze a Japanese Ecomonic

藪内 賢之和多田 淳三Yoshiyuki YabuuchiJunzo Watada下関市立大学早稲田大学

Shimonoseki City University Waseda University

**Abstract:** It is hard to separate samples according to each latent system in the case of multivariate data. Hitherto, there are many researches to investigate the structure under obtained data and analyze such data. For example, J. C. Bezdek proposes Switching Regression Model based on Fuzzy Clustering Model to formulate a forecasting model. The model proposed by Bezdek is to separate mixed samples coming from plural latent systems and apply each regression model to the group of samples coming from each system. That is a Fuzzy c-Regression Model.

In this paper, in order to deal with the possibility of a system, we employ a fuzzy forecasting model such as a Possibilistic Switching Regression Model and a Possibilistic Switching Time Series Model. The possibilistic forecasting model is explained to analyze a Japanese economic.

# 1 はじめに

対象としているシステムを分析し、システムの可能性を記述する予測モデルに可能性予測モデルがある。可能性予測モデルには可能性回帰モデル [8] や可能性時系列モデル [6, 10, 13, 14] などがある。これら可能性予測モデルは、システムがもつ可能性を記述することが目的である。

可能性予測モデルは、対象としている可能性が具現化したデータを包含することでシステムの可能性を記述する。データに外れ値が含まれている場合は、システムがもつ可能性を歪めて表現することもある。また、データが多数のシステムから得られたデータである場合には、予測モデルでシステムの可能性を正しく記述することが困難である。このような問題に対応するために多くの研究がされている。

外れ値に対応するモデルとして文献 [3, 12] に示すモデルが提案されている。また、複数のシステムから得られたデータが混入している場合に有効なモデルとして文献 [1, 2, 4, 7, 11, 14] に示すモデルが提案されている。

ここでは,可能性予測モデルを構築し,日本経済の 分析に適することで可能性予測モデルの特徴を示す.

# 2 可能性回帰モデル

可能性回帰モデル [8] では、観測されたデータは システムの可能性が具現化したものであり、データ を包含することでシステムの可能性を示すことを目 的としている。n 組の p 変量データ  $(y_j, \mathbf{x}_j), \mathbf{x}_j' = [x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{pj}](j=1,2,\cdots,n)$  が得られたとき,求めるべき可能性回帰式は次式で示される。

$$Y_j = A_1 x_{1j} + A_2 x_{2j} + \dots + A_p x_{pj} = \mathbf{A} \mathbf{x}_j \tag{1}$$

ここで,  $x_{1j}=1$  である. 回帰係数  $A_i$  は中心  $a_i$ , 幅  $c_i$  とする三角型ファジィ数  $A_i=(a_i,c_i)$  であり,  $\mathbf{A}=(\mathbf{a},\mathbf{c})$  とする.

拡張原理より、(1) 式は次のように表現できる。ここで、 $|\mathbf{x}_{i}| = [|x_{1i}|, |x_{2i}|, \cdots, |x_{pi}|]$ である。

$$Y_i = \mathbf{A}\mathbf{x}_i = (\mathbf{a}\mathbf{x}_i, \mathbf{c}|\mathbf{x}_i|) \tag{2}$$

観測データ  $(\mathbf{y}_j, \mathbf{x}_j)(j=1,2,\cdots,m)$  が与えられた場合,モデルとデータとの間の包含関係は次のようになる.

$$\mathbf{y}_i \subset Y_i = \mathbf{A}\mathbf{x}_i = (\mathbf{a}\mathbf{x}_i, \mathbf{c}|\mathbf{x}_i|) \tag{3}$$

すなわち、可能性回帰モデルはデータを包含するように構成されている。データを包含するように構成したモデルでは、モデルの幅が大きければ回帰式の意味する変数間の関係がぼやけるため、結果として回帰式が不明確なものとなる。このため、モデル構築の際には、モデルのあいまいさを小さくするためにモデルの幅を最小にし、回帰モデルを明確にする次のLP問題に帰着させることができる。

$$\min_{\mathbf{a}, \mathbf{c}} \quad \sum_{j=1}^{n} \mathbf{c} |\mathbf{x}_{j}| 
\text{s.t.} \quad y_{j} \leq \mathbf{a} \mathbf{x}_{j} + \mathbf{c} |\mathbf{x}_{j}| 
\quad y_{j} \geq \mathbf{a} \mathbf{x}_{j} - \mathbf{c} |\mathbf{x}_{j}| 
\quad \mathbf{c} \geq \mathbf{0} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$
(4)

# 3 可能性スイッチング回帰モデル

可能性回帰モデルはデータを包含することでシステムの可能性を記述するため、当該システムとは異なる可能性を示すデータが混入している場合にはモデルの形状が大きく歪む.このようなデータが少数である場合、外れ値として処理すること[3]やデータがシステムの可能性を示す程度を考慮しながらモデル構築に用いる[12]などの対応方法がある.しかし、分析対象とは異なるシステムから観測されたデータが多数混入している場合は、それぞれのシステムに対して可能性回帰モデルを適用しなければならない.しかし、データを各システムに分類することは、一般に困難である.

ここでは、複数のシステムから観測されたデータを 分析する際に、各システムの可能性を記述することが 可能な可能性スイッチング回帰モデルを構成する[15].

FCRM で用いる回帰モデルは、最小自乗法によってモデルを求めていることからクラスター分析による結果を用いることが可能である。しかし、可能性回帰モデルでは観測システムのもつ可能性を表現するために、混在した可能性分布を把握しそれぞれを分割しなければならない。

データ分布が超楕円体の形状をしていると仮定した場合,2軸以降に関してはその広がりが小さい程良い. モデルの幅が大きくなり、モデルのあいまいさが大きくなることを避けるためである.

ここでは、データを各可能性分布に分割するためにファジィ分散共分散行列 [9] から得られる超楕円体を用いる。超楕円体を用いるのはデータの分布状態を把握することが目的である。

スイッチング回帰モデルに可能性回帰モデルを適用するためには、固有値が次の条件を満たす必要がある。第1に、線形性をもつための条件として、第1固有値が十分大きいことである。第2に、モデルの幅が大きく広がらないために、すなわち、あいまいさを大きくしないために、第2固有値以降が小さいことである。この要件は、可能性回帰モデルにおける目的関数と同様の意味になっている。つまり、対象システムのもつ可能性を全て表現するが、そのようなモデルの中でモデルのもつあいまいさが最小となるようにモデルを構

築する. つまり,可能性分布は直線性を有し,可能性の幅が最小となるような可能性分布を見つける. また,可能性分布を密にするため,データと第1固有ベクトルによって定められる第1軸までの距離を評価指標に加える.

n 個のデータを m(n > m) 個のクラスターに分類する組合せは、以下のようになる。

$$\frac{\sum_{k=1}^{m} {}_{m}C_{k}(-1)^{m-k}k^{n}}{m!}$$
 (5)

近似した場合, $m^n/m!$  である。例えば,m=2,n=40 の場合では,クラスター分割の総組合せ数は  $2^{40}/2!=2^{39}$  である。多くの組合せの中から最適な分割を効率的に探索することが必要である。また,データの各可能性分布への帰属度が  $\{0,1\}$  である場合は (5) 式に示す組み合わせになるが,帰属度を [0,1] にすると最適な可能性スイッチング回帰モデルを探索するのは困難である。このため,上述したモデルの評価を行いながら,遺伝的アルゴリズムを用いて可能性分布を分離する.

遺伝的アルゴリズムにおける各個体は,各可能性分布への帰属を示すようコーディングされ,その評価値は各可能性分布の固有値および同一可能性分布内でのデータと第 1 軸までの距離により計算される.個体 h の評価関数  $J_h(\lambda^{(h)},\mathbf{e}^{(h)})$  は,第 h 可能性分布に関する固有値 h でかり、 固有べクトル h で データ数 h の形像 h が、 データ h な。 と第 h 軸までの距離 h を用いると以下のように表現できる.

$$J_{h}(\lambda^{(h)}, \mathbf{e}^{(h)}) = (1 - K) \sum_{k=1}^{m} \frac{\lambda_{2k}^{(h)}}{\lambda_{1k}^{(h)}} + K \sum_{k=1}^{m} \sum_{j=1}^{n_{k}^{(h)}} d_{k}(\mathbf{x}_{j})^{(h)}$$

$$(6)$$

以上のことから、本モデルは評価関数 (6) の値が小さい方が好ましいことがわかる。このため、遺伝的アルゴリズムにおいて、評価関数 (6) を最小にする可能性分布を探索する。

# 4 可能性自己相関モデル

本モデルでは、システムがもつ可能性を時系列モデルで記述するためにファジィ化した時系列データ  $Z_t$  を用いる [10]. ファジィ化し、各種トレンドを除去したデータを  $\mathbf{X}_t = [X_t^L, X_t^C, X_t^U]$  とする。ここで、上限、中心、下限をそれぞれ U、C、L で表記する。

一般に、ファジィ演算を繰り返すとあいまいさが大きくなる。このため、ファジィデータのあいまいさを

調整するために  $\alpha$ -cut を行う. 可能性自己相関モデルでは、可能性自己相関係数のあいまいさを調整するための  $\alpha$ -cut 値 h を次の LP 問題により定める.

maximize
$$\begin{array}{ll}
h & \sum_{i} (\rho_{i}^{U} - \rho_{i}^{L}) \\
\text{subject to} & -1 \leq \rho_{i}^{L} \leq \rho_{i}^{C} \leq \rho_{i}^{U} \leq 1 \\
& (i = 1, 2, \dots, p)
\end{array}$$
(7)

ここで,次の自己回帰過程を求めることにする.

$$\mathbf{X}_{t} = \mathbf{\Phi}_{1} \mathbf{X}_{t-1} + \mathbf{\Phi}_{2} \mathbf{X}_{t-2} + \dots + \mathbf{\Phi}_{p} \mathbf{X}_{t-p}$$
 (8)

ただし, $\Phi_i = [\phi_i^L, \phi_i^C, \phi_i^U] (i=1,2,\cdots,p)$  は可能性偏自己回帰係数である.このため,上記自己回帰過程の出力もファジィ数となる.

自己回帰モデル同様、Yule-Walker の方程式を用い、可能性偏自己回帰係数を求める。可能性自己相関モデルは、時系列システムのもつ可能性を記述することを目的としている。このため、可能性偏自己相関系数  $\mathbf{r}_i = [r_i^L, r_i^C, r_i^U]$  を用いると Yule-Walker の方程式は次のようになる。

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{\Phi}_1 \mathbf{r}_{i-1} + \mathbf{\Phi}_2 \mathbf{r}_{i-2} + \dots + \mathbf{\Phi}_k \mathbf{r}_{i-k} \supseteq \mathbf{r}_i$$

 $tilde{tilde} k_i = [R_i^L, R_i^C, R_i^U] ext{ obs.}$ 

本モデルはシステムの可能性を記述し、あいまいさを最小にする可能性偏自己相関系数を求めるために次のLP問題に帰着させることができる.

minimize 
$$\Phi \qquad \sum_{i} (R_{i}^{U} - R_{i}^{L})$$
subject to 
$$R_{i}^{L} \leq \rho_{i}^{L}, R_{i}^{C} = \rho_{i}^{C}, \rho_{i}^{U} \leq R_{i}^{U}$$

$$R_{i}^{L} \leq R_{i}^{C} \leq R_{i}^{U}$$

$$(i = 1, 2, \dots, k)$$

$$(9)$$

# 5 可能性スイッチング AR モデル

時系列システムは、時間の経過に従ってシステムの 状態が変化することがある。この場合、得られた時系 列データを単一のシステムとして時系列モデルによっ て記述させることには無理がある。複数のシステムか らデータが得られた、あるいは状態が変化した場合は、 各システムの状態を記述するためのモデルを用いなけ ればならない。

本論文では、得られた時系列データに含まれているシステムを識別し、それぞれのシステムに対して AR モデルを適用する可能性スイッチング AR モデルを提案する

ここでは、上述した可能性自己相関モデル [13] を用いる。つまり、観測データが示すシステムの可能性を

可能性自己相関モデルによって記述し、システムがも つ可能性によってシステムを分割し、それぞれのシス テムに可能性自己相関モデルを適用する。ここではシ ステムを分割する方法として、遺伝的アルゴリズムを 用いる。データが属するシステムをコード化した遺伝 子を用い、下記の評価関数が最適となる分割を探索す るのである。

$$E = \sum_{i=1}^{m} w_i$$

ただし、E は評価関数、 $w_i$  は第 i データの可能性の幅、m は分割されたシステムの数を示す。遺伝的アルゴリズムにより、システムのあいまいさを示す評価関数 E が最小となるように分割を行う。

そして,分割された各システムに対して可能性自己 相関モデルを適用する.

# 6 数值例

# 6.1 可能性スイッチング回帰モデル

応用例として総合卸売物価指数[5]を用いる。本データは、1934年から1936年を1とした1925年から1951年までの各年の平均物価指数である。

上述したアルゴリズムを用いるとデータには可能性分布が2つ混在していることが分かり、各可能性分布に対して次の2つのモデルが抽出された。ただし、データの各可能性分布への帰属度を $\{0,1\}$ とし、データの第1軸までの距離を考慮せずにモデルを構築した。このため、遺伝的アルゴリズムでの個体の染色体長はデータ数と同じであり、対立遺伝子は $\{0,1\}$ となる。また、集団サイズを200、交叉率を70%、突然変異率を1%、淘汰率を90%としてモデルの探索を行った。

$$Y_1 = -77.941 + (0.041, 0.000)X$$
  
 $Y_2 = -94470.810 + (48.572, 0.026)X$ 

これを図1に示す.

# 6.2 可能性スイッチング AR モデルの数値例

ここでは,1970 年 1 月から 2000 年 1 月の日経平均株価に可能性自己相関モデルを適用する.階差系列 $\nabla\nabla_6\mathbf{X}_t$  によって,トレンドを除去した後に可能性スイッチング  $\mathbf{AR}$  モデルを適用すると次のモデルが得ら

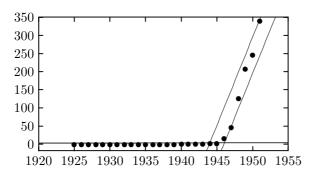


図 1: 可能性スイッチング回帰モデルによる分析結果

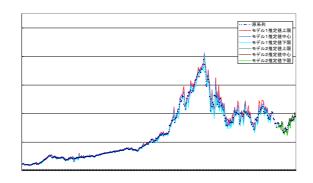


図 2: 可能性スイッチング AR モデルの分析結果

れた. これを2に示す.

モデル1:

 $abla
abla_6 \mathbf{X}_t = [-0.3200, -0.0645, 0.3165] 
abla
abla_6 \mathbf{X}_{t-6}$  モデル 2:

 $\nabla \nabla_6 \mathbf{X}_t = [-0.0837, -0.0020, 0.1235] \nabla \nabla_6 \mathbf{X}_{t-6}$ 

ここで、モデル1とモデル2は1997年6月で切り替わり、上記モデルの評価値は0.844であった。

# 7 おわりに

本論文では、可能性予測モデルの特徴について述べた。可能性回帰モデルについては、データに外れ値が含まれる場合においてもモデルが示すシステムの可能性を歪ませないための可能性回帰モデルについて述べた。また、複数のシステムから観測されたデータが混入している場合に各システムの可能性を記述することができる可能性スイッチング回帰モデルを示した。

可能性時系列モデルについては、時系列システムの 可能性を記述するモデルについて述べた。また、シス テムの状態が変化した場合あるいは異なるシステムの データが混入している場合にシステムの可能性を記述 する可能性時系列モデルについて述べた。

最後に数値例を用いて、可能性スイッチング回帰モ デルおよび可能性スイッチング AR モデルの特徴を示 した.

# 参考文献

- [1] J. C. Bezdek, Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum, 1981
- [2] R. J. Hathaway and J. C. Bezdek, Switching Regression Models and Fuzzy Clustering, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol.1, No.3, pp.195–204, 1993
- [3] 石渕 久生, 田中 英夫, 混合 0-1 整数計画問題による区間 回帰分析, 日本経営工学会誌, Vol.40, No.5, pp.312-319, 1988
- [4] 中森 義輝, 領家 美奈, ファジィモデル構築のための超 楕円クラスタリング, 日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.3, pp.537-547, 1993
- [5] 日本統計協会, 日本長期統計総覧 4, 日本統計協会, 1988
- [6] 小沢 和浩, 渡邊 匠, 関係 正康, ファジィ自己回帰モデルとその応用, 第 12 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.373-376, 1997
- [7] 領家 美奈, 中森 義輝, 適応型ファジィクラスタリングに よる分類と回帰の同時分析, 日本ファジィ学会誌, Vol.8, No.1, pp.136–146, 1996
- [8] 田中 英夫, 和多田 淳三, 林 勲, ファジィ線形回帰分析の 3 つの定式化, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.10, pp.1051–1057, 1986
- [9] 和多田 淳三, 浅居 喜代治, ファジィ理論の基礎と応用 (III), 日本経営工学会誌, Vol.37, No.4, pp.257–265, 1986
- [10] J. Watada, Fuzzy Time-series Analysis and Its Forecasting of Sales Volume, Fuzzy Regression Analysis, edited by J.Kacprzyk & M.Fedrizzi, pp.211–227, 1992
- [11] Y. Yabuuchi and J. Watada, Fuzzy Switching Regression Model based on Genetic Algorithm, Proceedings of the 7th International Fuzzy Systems Association World Congress, in Prague, Czech Republic, pp.113–118, 1997
- [12] 藪内 賢之, 和多田 淳三, 超楕円体に基づくファジィロ バスト回帰分析, 日本オペレーションズ・リサーチ学会誌, Vol.39, No.4, pp.512–524, 1996
- [13] Y. Yabuuchi, Y. Toyoura and J. Watada, Fuzzy AR Model of Stock Price, Proceedings of 5th Czech-Japan Seminar on Data Analysis and Decision Making under Uncertainty, Mt. Koya, Japan, pp.127–132, 2002
- [14] 藪内 賢之, 和多田 淳三, 豊浦 由浩, ファジィスイッチング AR モデル, 第 19 回ファジィシステムシンポジウム 講演論文集, pp.697-698, 2003
- [15] 藪内 賢之, 和多田 淳三, ファジィスイッチング回帰モデルの構成, 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol.16, No.1, pp.53-59, 2004

#### 連絡先:

藪内 賢之

下関市立大学 経済学部

〒 751-8510 下関市大学町 2-1-1

Tel & Fax: 0832-54-8641

E-mail: yabuuchi@shimonoseki-cu.ac.jp

# 粒子型フィルタを用いたセンサフュージョンによる音源ターゲット追跡

# Tracking of sound source target by sensor fusion using particle filter

伊藤 亘 生駒 哲一 ○川西 正人 前田 博 Wataru Ito Norikazu Ikoma Masato Kawanishi Hiroshi Maeda

九州工業大学 工学部

Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

**Abstract:** Sensor fusion is aimed at recovering information, which is unable to obtain with single sensor, by integrating various information from multiple sensors. Association of information between sensors are generally unknown and to associate them is important. Combination number of the association becomes enormous especially when missing and false detection exsist in observation process. We propose a new method for sensor fusion problem with unknown association using particle filter and clever proposal. As an example of the sensor fusion, we deal with tracking problem of sound source target using camera and two microphones. Simulation and experiment illustrate efficiency of proposed method. **Keywords:** sensor fusion, unknown association, particle filters, target tracking

# 1. 導入

人間は、目、耳、鼻などの複数の感覚器官より感覚情報を取得し、それらの情報を統合して外界の様子を認識している。このような情報処理はセンサフュージョンと呼ばれ、それは複数センサからの様々な情報を統合することで、単一センサでは不可能な情報復元を行なうことである。

複数センサの状況では、一般に、センサ間での観測の対応は未知である。このような対応未知のセンサフュージョンでは、対応の組合せ数が膨大となる問題がある。特に観測過程にて欠損や誤検出が生じる場合には、単一センサの場合であってもこの困難が生じる[3]。例えばターゲット追跡において、ターゲット数が T 個で、このうち検出された数を  $N_D$  とすると、対応の組合せ数は  $T! \times N_D!$  の  $N_D$  についての総和となり、T=1 0 ならば 2 億通りを超えてしまう。これは、複数センサの場合には、より深刻となる。

単一センサにおける対応問題を扱う最近の研究では、粒子型フィルタとクレバーなプロポーザルを用いて、同一物体上の複数ターゲットの対応を推定しながら追跡を行なっている[4]. 我々はこのアイデアを複数センサにおける対応問題に拡張し、対応未知のセンサフュージョンにおける粒子型フィルタとクレバーなプロポーザルを用いた確率論的方法を提案する.センサフュージョンの一例として、本研究では、カメラとステレオマイクを用いた音源ターゲット追跡を扱う. 提案法の有効性を示すために、シミュレーション及び実機実験を行なう.

本文の構成は、2節で問題設定を行ない、3節にて提案モデルを定義する.4節では、粒子型フィルタによる状態推定の方法を述べ、クレバーなプロポーザルを提案する.そして5節ではシミュレーションと実験の結果を示し、6節にて結論を述べる.

# 2. 問題設定

複数のターゲットが独立に移動しており、その中の1つが音を発しながら移動しているものとする.セ

ンサとして、1カメラと2マイクを用いる.各センサの位置は任意であるが、センサ同士の相対位置は既知で不変とする.以下に各センサの観測について詳細を述べる.

### a)カメラ

撮影して得られた動画像の各フレームについて,画像中の輝度値の変化が大きく,かつ単一方向性の低い箇所(例えばコーナーなど)を抽出し,これを特徴点とする.この特徴抽出は,画像フレームごと独立に行なうため,フレーム間での特徴点の対応は未知で,特徴点数はフレームごとに一般に異なる.また観測される特徴点は,照明などの影響により欠損や誤検出を含んでいる.

# b)マイク

ステレオマイクにより2つの音声信号を得る. 両信号の相互相関を計算することで,音源から各マイクへ音が到着する時間差を求める. 得られた時間差から,音源の方向を算出する. ただし観測する音源方向には,音が弱いため観測されない場合(欠損)があり,また残響や他の音による誤検出が含まれる.

a) と b) の情報を統合することで、音源上にある特徴 点を識別し、その点を追跡することで音源ターゲット の追跡を行なう.この様子を図1に模式的に示す.抽 出された 9 点の特徴点のうち、音源方向に近く、速度 がほぼ同じである 4 点が、音源ターゲット上の点と識別され追跡されている.

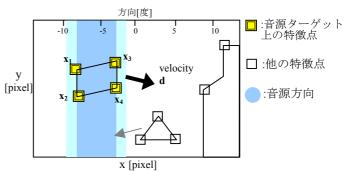


図1. 画像上の特徴点と音源方向

# 3. モデル

### 3-1. システムモデル

音源ターゲット上に存在する特徴点の個数を  $N_T$ 個 とし、これは既知であり一定とする. 時刻 k での j 番目の特徴点の位置を

$$\mathbf{x}_{i}(k) = (x_{i}(k), y_{i}(k))$$
 (1)

と表す.特徴点のダイナミクスを,

$$\mathbf{x}_{j}(k) = \mathbf{x}_{j}(k-1) + \mathbf{d}(k-1) + \mathbf{v}_{j}(k)$$
  
$$\mathbf{d}(k) = \mathbf{d}(k-1) + \mathbf{v}_{C}(k)$$
 (2)

とする.  $\mathbf{v}_j(k)\sim N(\mathbf{0},\mathbf{Q})$ ,  $\mathbf{v}_C(k)\sim N(\mathbf{0},\mathbf{Q}_C)$ はそれぞれ, 位置, 速度についてのシステムノイズで,  $\mathbf{Q}=\operatorname{diag}(\tau^2)$ ,  $\mathbf{Q}_C=\operatorname{diag}(\tau^2_C)$ とする.

# 3-2. 観測モデル

観測はセンサ毎に独立に行なうものとし、観測モデルを各センサごと独立に定義する.

### a)カメラモデル

画像中の輝度値の空間差分を計算し、輝度値の変化が大きく、かつその単一方向性が低い箇所を特徴点として抽出する。この特徴点抽出の処理を、各フレーム独立に行なう。

時刻 k のフレームにて観測される特徴点数を N(k) とする. 特徴点  $N_T$ 個のうち, 時刻 k において実際に検出された特徴点数を  $N_D(k)$ とする. 各点の検出確率を  $P_D$  とし, これらは独立であると仮定すると,  $N_D(k)$  は 2 項分布  $B(N_T, P_D)$ に従う. 誤検出された特徴点数を  $N_C(k)$ とする.  $N_C(k)$ は時刻 k について独立であり, ポアソン分布 Poisson( $\mu V$ )に従うと仮定する. ここで $\mu$  は誤検出空間密度, V は空間体積である.

次に, 観測された点と状態との対応を扱うために, 対応ベクトル

$$\mathbf{I}_{k} = [I_{1}(k), I_{2}(k), ..., I_{N(k)}(k)]$$
(3)

を定義する.  $I_j(k) \subseteq \{0,1,\dots,N_T\}$ で,  $I_j(k)=0$  は, j 番目の観測値が誤検出であることを表わし,  $I_j(k)=i>0$ は, j 番目の観測値はi 番目の状態から来ていることを表わす.

j番目の観測値を  $\mathbf{y}_{j}(k)$ とすると(j=1,...,N), 観測は  $\mathbf{y}_{j}(k) = \sum_{i=0}^{N_{T}} \delta_{i,I_{j}} \mathbf{x}_{i}(k) + \sigma_{\alpha}^{2}(I_{j}(k)) \mathbf{w}_{j}(k)$ , (4) ただし  $\mathbf{w}_{j}(k) \sim N(\mathbf{0},\mathbf{I})$ と表される. ここで,  $\mathbf{x}_{0}(k) \equiv \overline{\mathbf{x}}$  (画像中心) とする. 観測ノイズ項は,

$$\sigma_{\alpha}^{2}(I_{j}(k)) \sim \begin{cases} \sigma^{2}, & I_{j} \neq 0 \\ \alpha \sigma^{2}, & I_{j} = 0 \end{cases}$$
 (5)

で、α>>1とする.

## b)マイクモデル

ステレオマイクで得た 2 つの音声信号の時間差を相互相関に基づき計算し、求めた時間差から音源ターゲットの方向を算出する. 算出した音源の方向を $\mathbf{S}_f(k)$ と表す. 音源の方向は残響や他の音等により誤検出が起こるため、カメラモデルと同様、観測過程で欠損と誤検出を扱うモデルを用いる. 時刻 k における検出数を  $N_5(k)$ と表す.

 $S_i(k)$ についての対応ベクトルを

$$\mathbf{J}_{k} = [J_{1}(k), J_{2}(k), ..., J_{N_{S}(k)}(k)]$$
 (6)

とする. ここで  $J_j(k)$   $\in$   $\{0,1\}$  で,  $J_j(k)$ =0 は j 番目の観測値が誤検出,  $J_j(k)$ =1 は j 番目の観測値が音源ターゲットから来ていることを表わす.

音は音源ターゲットの中心  $\mathbf{c}_k$  から発生すると仮定し、観測モデルは次式となる.

$$\mathbf{S}_{i}(k) = \mathbf{c}_{k}(J_{i}(k)) + \sigma_{\beta}^{2}(J_{i}(k))\mathbf{w}_{S}(k), \qquad (7)$$

ただし  $\mathbf{w}_{S}(k)\sim N(\mathbf{0},\mathbf{I})$ . ここで  $\mathbf{c}_{k}(0)=\overline{\mathbf{x}}$ ,  $\mathbf{c}_{k}(1)=\mathbf{c}_{k}$  と する. 観測ノイズ項は, 次を用いる( $\beta>>1$  とする).

$$\sigma_{\beta}^{2}(J_{j}(k)) \sim \begin{cases} \sigma_{S}^{2}, & J_{j} = 1, \\ \beta \sigma_{S}^{2}, & J_{j} = 0. \end{cases}$$
 (8)

### 3-3. 状態空間表現

上述の提案モデルを, 状態空間表現で表わす. 位置 と速度からなる状態ベクトルを

$$\mathbf{x}_k = \left[\mathbf{x}_1(k), \mathbf{x}_2(k), \dots, \mathbf{x}_k(k), \mathbf{d}(k)\right]^T$$
 (9)

と定義し,システム方程式は

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}\mathbf{x}_k + \mathbf{G}\mathbf{v}_k, \qquad \mathbf{v}_k \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{Q}), \qquad (10)$$

となる. また観測ベクトルを

 $\mathbf{o}_k = \left[ \mathbf{y}_1(k), \mathbf{y}_2(k), ..., \mathbf{y}_{N(k)}(k), \mathbf{S}_1(k), \mathbf{S}_2(k), ..., \mathbf{S}_{N_S(k)}(k) \right]^T$  (11) と定義し、観測方程式を次で表す。

 $\mathbf{o}_{k} = \mathbf{H}(\mathbf{I}_{k}, \mathbf{J}_{k})\mathbf{x}_{k} + \mathbf{D}(\mathbf{I}_{k}, \mathbf{J}_{k})\mathbf{w}_{k}$ ,  $\mathbf{w}_{k} \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{I})$ . (12)  $\mathbf{H}$  は状態  $\mathbf{x}_{k}$  と観測  $\mathbf{o}_{k}$  の対応付けを行ない,  $\mathbf{D}$  は誤検 出を扱う.これは,  $\mathbf{I}_{k}$ ,  $\mathbf{J}_{k}$  に依存する非線形な状態空 間モデルとなっている.

# 4. 粒子型フィルタによる状態推定

提案モデルでは、ターゲット状態  $\mathbf{x}_k$  と対応ベクトル  $\mathbf{I}_k$ ,  $\mathbf{J}_k$ の両方を推定する。このための拡張状態ベクトルを  $\mathbf{z}_k = [\mathbf{x}_k, \mathbf{I}_k, \mathbf{J}_k]$ と定義する。状態推定とは、観測系列  $\mathbf{o}_{1:k} = [\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2, ..., \mathbf{o}_k]$ が与えられた下での事後分布 $p(\mathbf{z}_k|\mathbf{o}_{1:k})$ を求めることである。提案モデルは非線形であるため、推定には粒子型フィルタ[2]を用いる。

本研究で提案するモデルは、対応ベクトル  $\mathbf{I}_k$ ,  $\mathbf{J}_k$  が 与えられた下で  $\mathbf{x}_k$  がほぼ解析的に求められるので、

ラオ・ブラックウェル化粒子型フィルタ[1]を用いることができる.これは分散減少法の一つで、事後分布を

$$p(\mathbf{z}_{k} \mid \mathbf{o}_{1:k}) = p(\mathbf{x}_{k}, \mathbf{I}_{k} \mid \mathbf{o}_{1:k})$$

$$= p(\mathbf{x}_{k} \mid \mathbf{I}_{k}, \mathbf{o}_{1:k}) p(\mathbf{I}_{k} \mid \mathbf{o}_{1:k})$$
(13)

と分解すると(簡単のため  $J_k$  は省略), $p(I_k|\mathbf{o}_{1:k})$ について粒子型フィルタの処理を行ない, $p(\mathbf{x}_k|\mathbf{I}_k,\mathbf{o}_{1:k})$ は拡張カルマンフィルタでほぼ解析的に求められる.

粒子型フィルタにおいては、一般に、プロポーザルの選択が推定結果に大きく影響する。特に本研究での対応の組合せ数は大きいため、現時刻の観測値  $\mathbf{0}_k$  を効果的に用いたクレバーなプロポーザルを用いる必要がある。最適なプロポーザルは、とりうるすべての対応についての和を計算する必要があるため、計算コストが膨大となり実用的ではない。そこで我々は、以下の準最適プロポーザルを提案する。

$$\pi(\mathbf{I}_{k}, \mathbf{J}_{k} \mid \mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{o}_{1:k}) = \pi(I_{1}(k) \mid \mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{o}_{1:k})$$

$$\times \prod_{i=2}^{N(k)} \pi(I_{i}(k) \mid \mathbf{x}_{k-1}, I_{1}(k), ..., I_{i-1}(k), \mathbf{o}_{1:k})$$

$$\times \pi(J_{1}(k) \mid \mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{o}_{1:k})$$

$$\times \prod_{i=2}^{N_{S}(k)} \pi(J_{i}(k) \mid \mathbf{x}_{k-1}, J_{1}(k), ..., J_{i-1}(k), \mathbf{o}_{1:k})$$
(14)

これは、まず各センサが独立である性質によりプロポーザルを分割でき、また各特徴点ごとに尤度の計算を行なうことを意味する。各センサの特徴点の尤度計算は、次のガウス分布に比例するものを用いる。

$$\pi(I_{j} \mid \mathbf{x}_{k-1}, I_{1}, I_{2}, ..., I_{j-1}, \mathbf{o}_{1:k})$$

$$\propto \begin{cases} N(\mathbf{o}_{j}; \overline{\mathbf{x}}, \alpha \sigma^{2}), I_{j} = 0 \\ 0, I_{j} \neq 0, \exists i < j \quad I_{j} = I_{i} \end{cases}$$

$$N(\mathbf{o}_{j}; \mathbf{x}_{I_{j}}, \sigma^{2}), otherwise$$

$$(15)$$

$$\pi(J_n \mid \mathbf{x}_{k-1}, J_1, J_2, ..., J_{n-1}, \mathbf{o}_{1:k})$$

$$\propto \begin{cases} N(\mathbf{o}_n; \overline{\mathbf{x}}, \beta \sigma_S^2) &, J_n = 0 \\ 0 &, J_n \neq 0, \exists m < n \quad J_n = J_m \end{cases}$$

$$N(\mathbf{o}_n; \mathbf{x}_{J_n}, \sigma_S^2) &, J_n = 1$$

$$(16)$$

# 5. 実験

### 5-1. シミュレーション実験

2 節のシーンを想定し、特徴点数  $N_I$ =4, 時刻 k=1,...,30 で、画像中の特徴点と音源方向についてのシミュレーションデータを生成した. 画像特徴点には、N(0,1.0)に従う観測ノイズを加え、検出確率  $P_D$ =0.6,空間体積 V=200×120[pixel²],誤検出空間密度 $\mu$ =4.0×10<sup>-5</sup> とした.音源方向には、N(0,10.0)に従う観測ノイズを加え、検出確率  $P_D$ =0.6,空間体積 V=30[度],誤検出空間密度 $\mu$ =8.0×10<sup>-3</sup> とした.

提案モデルを用いて、音源ターゲットの状態  $\mathbf{x}_k$  と対応情報  $\mathbf{I}_k$ ,  $\mathbf{J}_k$  の推定を行なった。粒子数は 2000 個,システムノイズ分散は  $\tau^2$ =0.1,  $\tau^2_C$ =0.01, 誤検出要素  $\alpha = \beta = 10^8$  とした。  $\mathbf{x}_k$  についての推定結果をシミュ

レーションデータと重ねて $\mathbf{Z}$  に示す. 特徴点は $\diamondsuit$ , 音源方向は+, 推定結果は実線で示している.  $\mathbf{I}_k$ ,  $\mathbf{J}_k$  のについての推定結果(最頻値)の前半を表 $\mathbf{1}$  に示す.

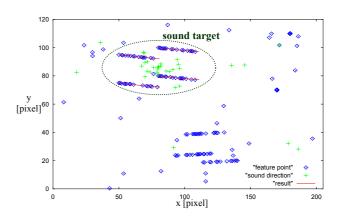


図 2 シミュレーションでのターゲット状態の推定結果

表 1 シミュレーションでの対応の推定結果(括弧内は真値)

k	$\mathbf{I}_k$	$\mathbf{J}_k$
1	1(1) 2(2) 3(3) 4(4) 0(0) 0(0) 0(0) 0(0)	1(1)
2	1(1) 0(0) 0(0) 2(2) 0(0) 4(4) 0(0)	0(0) 1(1)
3	3(3) 0(1) 0(0) 0(0) 0(0) 0(0) 0(0) 0(0) 4(4)	1(1)
4	2(2) 4(4) 0(0) 1(1) 0(0) 0(0)	
5	3(3) 0(0) 1(1) 4(4) 0(0) 0(0) 0(0)	1(1) 0(0)
6	0(0) 0(0) 4(4) 3(3)	
7	3(3) 0(0)	1(1)
8	4(4) 0(0) 0(0) 1(1) 2(2) 3(3) 0(0) 0(0)	
9	2(2) 3(3) 0(0) 0(0) 0(0) 1(1) 0(0) 0(0)	0(0) 1(1)
10	0(0) 0(0) 4(4) 2(2) 0(0) 0(0) 3(3) 0(0)	1(1)

# 5-2. 実機実験

図3に示す、2人の人間が独立に移動し、その中の1人(右側の人)が手を叩きながら移動しているシーンを扱う。約7秒間で50フレームの動画像の撮影と音声の録音を行なった。これら動画像と音声に、2節で述べた処理を行ない、特徴点及び音源方向を得た。得られた特徴点を図3中に□で示した。本実験では、人が手を5回叩いており、音源ターゲット以外の音がない状況を扱ったので、手を叩いた時刻にのみ、音源方向の観測が得られた。観測した音源方向の系列を図4に示す。

特徴点の観測には、音源ターゲット(右側の人)上の特徴点について検出されていない時刻があり、また光の反射により他の点が検出されている場合もある。音源方向の観測では、残響や他の音などにより、音源ターゲットとは異なる方向が検出されている.

提案モデルを用いて、音源ターゲット上の特徴点  $(N_T=3)$  について、ターゲット状態  $\mathbf{x}_k$  と対応情報  $\mathbf{I}_k$ 、  $\mathbf{J}_k$  の推定を行なった、推定には粒子 5000 個を用いた.

観測ノイズのパラメータを $\sigma^2$  =5.0,  $\sigma^2_S$ =30.0,  $\alpha = \beta$  =10<sup>12</sup>, システムノイズパラメータを  $\tau^2$ =4.0,  $\tau^2_C$  =1.0 とした. 推定は,音源方向の観測が得られた時刻から開始する. ターゲット状態の推定結果を**図 5**, 対応情報の推定結果の前半を**表 2** に示す.

推定結果より、音源ターゲット上の3つの特徴点について追跡できていることがわかり、対応情報はほとんどの時刻で正しい値が得られていることがわかる.



(a) 第1フレーム

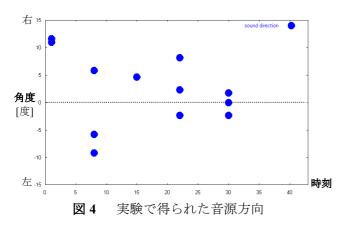
**(b)** 第 17 フレーム



(c) 第34フレーム

(d) 第50フレーム

図3 実験で用いた動画像と抽出した特徴点



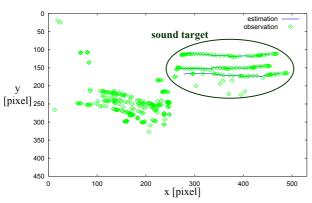


図5 実験でのターゲット状態の推定結果

表 2 実験での対応の推定結果(括弧内は真値)

k	$\mathbf{I}_k$	$\mathbf{J}_k$
1	0(0) 0(0) 1(1) 2(2) 3(3) 0(0)	1(1) 0(0)
2	0(0) 0(0) 1(1) 2(2) 3(3) 0(0) 0(0)	
3	0(0) 1(1) 2(2) 3(3) 0(0) 0(0)	
4	1(1) 2(2) 3(3) 0(0) 0(0)	
5	0(0) 1(1) 2(2) 3(3) 0(0) 0(0) 0(0) 0(0) 0(0) 0(0)	
6	0(0) 1(1) 2(2) 3(3) 0(0) 0(0) 0(0)	
7	0(0) 0(0) 1(1) 2(2) 0(0) 0(0) 0(0)	
8	0(0) 0(0) 1(1) 2(2) 3(3) 0(0) 0(0) 0(0) 0(0)	
9	0(0) 0(0) 1(1) 2(2) 3(3) 0(0) 0(0) 0(0)	0(0) 1(1) (0)
10	0(0) 0(0) 1(1) 2(2) 3(3) 0(0) 0(0) 0(0)	

## 6. 結論

複数センサの状況において、観測に欠損と誤検出が 含まれる場合での、対応情報とターゲット状態の両方 を同時に推定するモデルを提案した。推定には、粒子 型フィルタを用い、クレバーなプロポーザルを提案し た。センサフュージョンの例として、1カメラ2マイ クを用いた音源ターゲット追跡のシミュレーション と実験を行なった。その結果、音源ターゲット上の複 数特徴点を識別しながら、音源ターゲットの追跡がで きることを確認した。

今後の課題として次が挙げられる。(1)動画両眼立体視やその他の状況を扱う。(2)提案モデルでは既知(一定)と仮定しているターゲット上の特徴点数を、未知(一定または可変)として行なう。(3)複数のターゲットを扱うようモデルを拡張し、複数センサ複数ターゲットモデルとする。

謝辞 本研究は,統計数理研究所共同利用研究 15-共研-2017 による.

### 参考文献

- [1] G.Casella and C.P.Robert: Rao-Black-wellisation of Sampling Schemes, *Biometrika*, **83**, 1, pp.81-94(1996).
- [2] A.Doucet, J.F.G.de Freitas, and N.J.Gordon (eds): Sequential Monte Carlo Methods in Practice, New York, Springer(2001).
- [3] N.J.Gordon and A.Doucet: Sequential Monte Carlo for Manoeuvering Target Tracking in Clutter, *Proc. of the SPIE*, **3809**, pp.493-500(1999).
- [4] N.Ikoma and S.Godsill: Extended object tracking with unknown association, missing observations, and clutter using particle filters, *Proc. of the 2003 IEEE Workshop on Statistical Signal Processing*, pp.485-488(2003).
- [5] W.Ito, N.Ikoma and H.Maeda: On association problem for sensor fusion in dynamic situation using particle filters, *Proc. of the AIC on Science of Modeling*, **17**, pp.414-415(2003).

**連絡先:** 〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1 九州工業大学工学部 生駒哲一(ikoma@comp.kyutech.ac.jp)

# 粒子型フィルタを用いた物体追跡·挙動予測に 基づく 交通危険度ファジィ評価システムの構築

Construction of Fuzzy Evaluation System for Driver's Dangerous Events based on Object Tracking and Behavior Prediction using Particle Filter

名取 洋一† 生駒 哲一‡ 川本 一彦 † 高橋 宏‡‡ 吉田 真一† 廣田 薫† 延原 肇† Hiroshi Youichi Kazuhiko Norikazu Shinichi Hajime Kaoru **NATORI KAWAMOTO IKOMA TAKAHASHI YOSHIDA NOBUHARA HIROTA** 

†東京工業大学 大学院総合理工学研究科
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology
‡九州工業大学 工学部

Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology ‡ ‡ 日産自動車(株)総合研究所 Nissan Motor Co., Ltd

Abstract: A dangerous event evaluation system for safe drive support is constructed by combining nonlinear states estimations using particle filter and a driver dangerous event recognition model using fuzzy membership functions. In this system, complex behaviors of potentially dangerous moving objects (including nonlinear functions like pedestrian behavior) are tracked and predicted based on videos from an on-vehicle camera. The information determined to contain a dangerous degree is displayed in the form of visual images, easily understandable to the human driver. Experiments are performed with videos of general road scenes obtained from the on-vehicle camera and the system's validity is shown compared to the human recognition of the driving scenes. The basic technology for a practical support system for safe driving is provided based on the combination of physical information and human ambiguous decisions.

# 1. はじめに

安全運転支援システム・自動運転システム構築の一環として,運転者に事故危険性を警告,呈示する機能が必要とされている.従来研究では,視覚に基づく車線離脱警告システム[1]や,環境危険度推論システム[2]などが報告されており,その有効性が示されている.しかし,直進道路や高速道路などのような特化された状況下でのものが多く,一般道路のようなより複雑な走行シーンでのシステム構築例は少ない.一般道路走行シーンでの潜在的な危険要因を抽出し,その危険性を評価する技術が求められている.

そこで、一般道路走行シーンを対象とした危険事象評価システムの提案および構築する・一般道路走行シーンには、例えば歩行者や走行中の自転車のような、潜在的危険性をもつ複雑な要の存在し、それらの挙動モデルは、一般をで、非線形非ガウス型モデルに適用可能な物がで、非線形非ガウス型モデルに満む合いに表現するにあり、そ子とのは、そ子型により、走行シーンに潜む危険性を、人度に出解が容易な情報として評価された危険したで理解が容易な情報として評価された危険したの理解が容易な情報として評価された危険したの理解が容易な情報として評価された危険したの理解が容易な情報として評価された危険した。

ら,その有効性を示す.

# 2. 粒子型フィルタリングに基づくファジィ危 険度評価

## 2.1. 粒子型フィルタによる物体追跡・挙動予測

粒子型フィルタ[3][4][5]は,多数の離散的な標本点(粒子)で,連続的な状態分布を近似する状態推定の手法であり,非線形モデルにも適用可能である.以下,そのアルゴリズムの概略を示す[3].

初期化: 初期分布に従って状態空間に粒子を P個発生させ,以下の3つのステップを繰り返す:

一期先予測: 各粒子の状態を,状態遷移モデル(システム方程式)に従い次の状態に推移させる.

**尤度算出**: 観測値を用いて予測値の尤度を粒子ごとに算出する.

**濾波**: 粒子全体について尤度を正規化し,その 値を確率として,粒子をリサンプリングする.

ここでは推定の対象モデルを円として,状態を $\mathbf{s}_t = (x(t), y(t), r(t), x(t-1), y(t-1), r(t-1))^\mathsf{T}$ , (1) と構成する.ここで, $\mathbf{s}$  は状態空間ベクトル,x, y は円の中心座標,r は円の半径,t は時刻である.システム方程式には, $\mathbf{2}$  階差分がゼロ,すなわち滑らかに速度が変化するモデルに,平均  $\mathbf{0}$ ,分散

 $\sigma_i^2$ , i = x, y, r のガウス分布に従う互いに独立なシステムノイズ

$$\mathbf{v}_{t} = (v_{X}(t), v_{Y}(t), v_{T}(t))^{\mathrm{T}},$$
(2)

を加えた状態推移モデル

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(4)

を用いる.

観測値と尤度は,以下のようにして求める(図1).

- ${f 1}$  . 各粒子の円上に ${\it M}$  点の制御点を等間隔に配置する .
- 2. 各制御点において法線方向に, N 点の観測点候補をプラス方向とマイナス方向に配置し,各観測点候補での画像の濃淡値の勾配

$$f_x^{(m)} = I(x+1, y-1) + 2I(x+1, y) + I(x, y+1) -I(x-1, y-1) - 2I(x-1, y) - I(x-1, y+1),$$
 (5)

$$f_y^{(m)} = I(x-1, y+1) + 2I(x, y+1) + I(x+1, y+1) - I(x-1, y-1) - 2I(x, y-1) - I(x+1, y-1),$$

$$(6)$$

とその方向

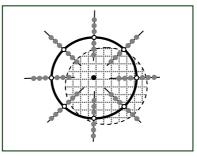
$$\theta^{(m)} = \tan\left(\frac{f_y^{(m)}}{f_x^{(m)}}\right), m = 1, 2, \dots, M,$$
 (7)

を求め,最も法線方向と一致するものをその制御点に対する観測点とする.ただし,この観測点には対応する制御点も含まれているものとする.

$$d_m = \sqrt{\left(x_o^{(m)} - x_c^{(m)}\right) + \left(y_o^{(m)} - y_c^{(m)}\right)}, m = 1, 2, \cdots, M,$$
 (8) に基づいて,尤度を

$$l_m = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{d_m^2}{2\sigma^2}\right), m = 1, 2, \dots, M,$$
 (9)

と求め、その円周上での積



中心

○ 制御点



● 観測点候補

図 1 観測点獲得 ,尤度計算の概略図(M=8, N=3).

$$w_t^{(p)} = \prod_{n=1}^N l_n, \ p = 1, 2, \dots, P,$$
 (10)

を粒子 p の尤度とする.ここで, $\sigma^2$  は観測モデルの分散である.

## 2.2. ファジィ推論を用いた危険度評価

粒子型フィルタリングの結果から得られる事後確率分布を,危険度という曖昧な人間的な情報に約集するために,ファジィメンバーシップ関数を用いたファジィ推論を行う.ここでまず事後確率に応じて粒子群をクラス分けし,クラスごとに状態の平均値を求める.これにより,事後確率が低いところも考慮に入れることができ,多くの可能性を保持しながら状態推定できる粒子型フィルタの特色を活かした結果が得られる.すなわち,クラスに応じた危険度が得られることになる.

推論の入力情報には,この平均値に基づいて算出される画像の中心からの距離と速度を用いる.出力情報は危険度である.各情報のファジィ集合は,

L1 (location) = {CLOSE, MIDDLE, FAR}, (11) L2 (speed) = {SLOW, MIDDLE, FAST}, (12)

L3 (danger) = {LOW, MIDDLE, HIGH}, (13) と定義している.これらの言語は,ファジィ意味ラベルであり,それぞれは三角形型または台形型のメンバーシップ関数により表現されている.推論に用いられるファジィプロダクションルールは人間の運転論理に基づき表1のように定義している.推論

- 1. IF L1 is **CLOSE** and L2 is **SLOW**, THEN L3 is **HIGH**.
- 2 . IF L1 is **CLOSE** and L2 is **MIDDLE**, THEN L3 is **HIGH**.
- 3. IF L1 is **CLOSE** and L2 is **FAST**, THEN L3 is **HIGH**.
- 4. IF *L1* is **MIDDLE** and *L2* is **SLOW**, THEN *L3* is **MIDDLE**.
- 5. IF L1 is **MIDDLE** and L2 is **MIDDLE**, THEN L3 is **MIDDLE**
- 6 . IF  $\emph{L1}$  is **MIDDLE** and  $\emph{L2}$  is **FAST**, THEN  $\emph{L3}$  is **HIGH**.
- 7. IF L1 is **FAR** and L2 is **SLOW**, THEN L3 is **LOW**.
- 8. IF L1 is **FAR** and L2 is **MIDDLE**, THEN L3 is **MIDDLE**.
- 9 . IF L1 is  ${f FAR}$  and L2 is  ${f FAST}$ ,  ${f THEN}$  L3 is  ${f MIDDLE}$ .

表1 ファジィプロダクションルール.

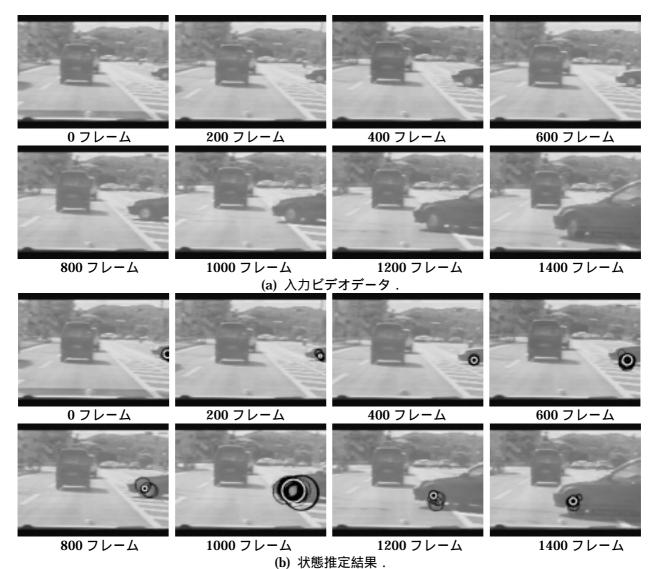


図 2 入力ビデオデータ(a)と粒子型フィルタによる状態推定結果(b).

方法には一般的に広く使用されているミニ マックス合成重心法を用いる.

# 3. 車載カメラ動画像に対する割り込みシーンでの実験

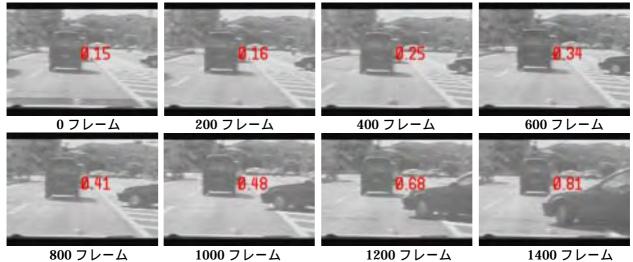
車載カメラで撮影した実ビデオデータに対して,提案システムの有効性を確認する.ここでの撮影シーンは前方に車両が進入してくる一般的な走行シーンである.状態の初期値は与えられているものとし,粒子数は 100 個,制御点は 10 個(M=10),観測点候補は,プラス方向とマイナス方向にそれぞれ 2 点(N=2)としている.システムノイズの分散は  $0.9(\sigma_x^2=\sigma_y^2=\sigma_r^2=0.9$ )と設定し,時間に依存しないものとする.ファジィ推論のためのクラス数は 3 とし,最終的に 3 種類の危険度が出力されることになる.

このビデオデータに対する粒子型フィルタリング の結果を図2に示す.ただし,状況の変化を分かり 易くするために,適宜抜粋したものを示している. 図中の白い円は全粒子の状態値の平均を表してい る.また,その周りの円は全粒子の状態値である. 図2に示すように,車両の前輪を精度よく追跡出来 ている事が確認できる.

ファジィ推論を用いた交通危険度の評価結果を図3と図4に示す.図3における数値が危険度で,[0,1]に正規化されている.ただし,小数点以下2桁までの値を表示している.ここで,3種類の危険度が算出されるが,3種類ともほぼ同じ値を示すため,尤度が大きいクラスの危険度のみ表示している.ただし,システムノイズの分散を小さく取っているため3種類の危険度がほぼ同じになると考えられる.図3に示す画像上での危険度呈示結果と,図4に示す危険度の時間推移から,車両が進行方向に進入してくるにつれ危険度が上昇していることが確認され,人間の危険認識と同様な結果が得られている.

### 4. おわりに

粒子型フィルタによる対象物体の追跡·挙動予測と,ファジィ推論による危険度への情報集約化を組み合わせた交通危険度評価システムを提案·構築し



00 フレーム 1200 フレーム 1200 図 3 交通危険度評価結果.

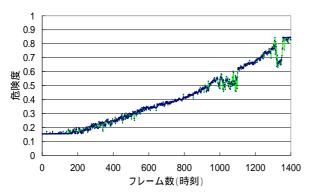


図4 交通危険度の時間推移.

ている.提案手法は,線形モデルでは表現し難い挙動を示す危険要因が多数存在する一般道路走行シーンに,粒子型フィルタを用いることで対処し,さらにはファジィ推論により,潜在的で曖昧な危険性の評価を,危険度という人間の理解しやすい情報に集約化し,運転者に呈示するものである.

実験では車載カメラから撮影された実ビデオデータに対し,車輪を追跡対象とすることで,走行方向に進入してくる車両の危険度を算出し,人間の認識に近い結果を得ている.さらに,対象モデルを変化させることで,一般道路走行シーンに存在する様々な危険要因に対処できるようにシステムを拡張させることができる.今後の展望としては,複雑な対象モデルの対処と,ファジィ推論への入力情報を増やすことによる複雑なシーンへの対応が挙げられる.

# 参考文献

- [1] M. Brattoli, R. Tasca, A. Tomashini, E. Chioffi,D. Gerna, and, M. Pasotti: "A vision-based off-road alert system", IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings, pp.195-200, 1996.
- [2] Satoshi Koizumi, Masayuki Matsushita, Yasufumi Takama, Hiroshi Takahashi,

- Kaoru Hirota: "Temporal-Hierarchical Emergency-Degree Inference System for Running Vehicles Using Image and Navigation Data", Journal of Advanced Computational Intelligence, Vol.4, No. 1, pp. 76-87, 2000.
- [3] N.J.Gordon, D.J.Salmond, and A.F.M.Smith: "Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation", IEE Proc.-F, vol.140 (2), pp.107-113, 1993.
- [4] M. Isard and A. Black: "Condensation Conditional density propagation for visual tracking", Int. J. Computer Vision, vol.29 (1), pp.5-28, 1998.
- [5] Genshiro Kitagawa: "Non-Gaussian state-space modeling of nonstationary time series", Journal of the American Statistical Association vol.82 (400), pp.1032-1063, 1987.

### 連絡先:

〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田 4259 東京工業大学 大学院総合理工学研究科

Mail-Box: G3-49 知能システム科学専攻 廣田研究室 名取 洋一 Phone: 045-924-5682 Fax: 045-924-5676

E-mail: natori@hrt.dis.titech.ac.jp

# ベイズモデルによる画像復元への逐次モンテカルロ法の応用 Application of sequential Monte Carlo methods to Bayesian image restoration

# 入戸野 健 Ken Nittono

**Abstract:** In this article, application methods to Bayesian image restoration approached by sequential Monte Carlo methods are shown. The application methods are formulated from the both aspects of filtering and smoothing based on modification of the technique of particle filter.

# 1. はじめに

劣化した観測画像と推定すべき原画像をベイスとで復元画像を得ようとする画像復元問題にで復元画像を得ようとする画像復元問題が応じた。本語はいては、画像における確率場のでは、画像における確率場のできた。本ででは、対象画像のではでは、が表している。を表したフィルタリングおよる画像復元でがよる。などでは、カルング手法の応用について論じる。とその観点では、大工的な画像復元モデルへと修正をでいたといる。また、人工的な画像でデータを制たの手法の表によりこれらの手法の基本的な復元で数によりこれらの手法の数率について議論する。

### 2. 画像復元

各点で濃度値 $z_i$ を持つM画素から成る平面画像の配色を $z_{1:M} = \{z_1,...,z_M\}$ のように表す。所与の観測画像を $y_{1:M}$ ,原画像の配色を $x_{1:M}$ とするとき,原画像の推定はベイズのアプローチにより次式の事後分布最大化へと定式化される(MAP推定)。

$$p(x_{1:M} \mid y_{1:M}) = \frac{p(y_{1:M} \mid x_{1:M})p(x_{1:M})}{p(y_{1:M})} \quad (1)$$

原画像のモデリングにおいては,各点の濃度値 $x_i$ は隣接する近傍点集合 $R_i$ の配色のみに依存するものとし,遷移確率 $p(x_i \mid x_{R_i})$ により特徴づけられるマルコフ性を仮定する。具体的には事前分布としてギブス分布を用いる。ここでは観測画像の劣化は各点で $y_i = x_i + \eta_i$ , $\eta_i \sim N(0,\sigma^2)$ に従い既知の分散 $\sigma^2$ を持つガウスノイズにより引き起こされるものとし,配色 $x_{1:i}$ に対して観測画像の確率場は周辺分布 $p(y_i \mid x_i)$ を持つものとする。ただし,ガウス性の仮定は画像復元問題の背景に起因するものであり,逐次モンテカルロ法の本来のアプローチにおいては本質的な制約ではないことを付け加えておく。

# 3. 逐次モンテカルロ法による復元モデル

逐次モンテカルロ法(Sequential Monte Carlo Method)は、高次元で複雑な事後分布に対して再帰的な低次元の分布をサンプリングにより繰り返し計算することで、目的の同時分布の近似を得るモンテカルロ法で、その繰り返し計算過程において逐次的な状態推定が可能であることから、これまでに時系列データを対象とする状態空間モデルへの適用などにおいて有効な方法として成果を上げている[1][4]。

ここでは逐次モンテカルロ法の一つのアプローチである粒子型フィルタ(particle filter)を 適用した画像復元モデルを次のように構成する [2]。

初期状態から任意点iまでの部分配色を $x_{0:i}$ と置き,(1)式の事後分布に関する,再帰表現を次式により定義する。

$$p(x_{0:i} \mid y_{1:i}) = p(x_{0:i-1} \mid y_{1:i-1}) \frac{p(y_i \mid x_i)p(x_i \mid x_{R_i})}{p(y_i \mid y_{1:i-1})}$$
(2)

さらに,このときの N 個の粒子  $\{x_i^{(j)}; 1 \leq j \leq M\}$  (particle) の各々の重みを次式で定義する。

$$ilde{w}_{i}^{(j)} \propto ilde{w}_{i-1}^{(j)} rac{p(y_{i} \mid x_{i}^{(j)})p(x_{i}^{(j)} \mid x_{R_{i}}^{(j)})}{\pi(x_{i}^{(j)} \mid x_{\Omega_{i-1}}^{(j)}, y_{\Gamma_{i}})}$$
 (3)

ただし、 $\pi$  は importance 分布、 $x_{R}^{(j)}$ は j 番目のサンプル配色における点i の隣接点  $R_i$  内の局所的な状態を表す。ある条件の下で(3)式は $\tilde{w}_i^{(j)} = p(y_i \mid \tilde{x}_i^{(j)})$  のように置き換えられ、実際の逐次計算はさらに単純化される。図 1 に粒子型フィルタによる画像復元の計算手順の概要を示す。初期分布からの濃度値サンプリングから始まり、一定の順序で全ての点において 1 度ずつ粒子のサンプリングによる推定計算が終了した時点で、最終的な粒子  $\{x_{0:M}^{(j)}; 1 \leq j \leq N\}$  が事後分布  $p(x_{1:M} \mid y_{1:M})$  を近似することになる。

$$\begin{array}{l} \text{1. For } j=1 \text{ to } N: \\ x_0^{(j)} \sim p(x_0) \\ \text{2. For } i=1 \text{ to } M: \\ \text{2-1. For } j=1 \text{ to } N: \\ \tilde{x}_i^{(j)} \sim p(x_i \mid x_{R_i}^{(j)}) \\ \tilde{w}_i^{(j)} = p(y_i \mid \tilde{x}_i^{(j)}) \\ \text{2-2. Normarize } \{\tilde{w}_i^{(j)}; 1 \leq j \leq N\} \\ \text{2-3. For } j=1 \text{ to } N: \\ \tilde{x}_{0:i}^{(j)} = (x_{0:i-1}^{(j)}, \tilde{x}_i^{(j)}) \\ x_{0:i}^{(j)} \sim \{(x_{0:i}^{(j)}, w_i^{(j)}); 1 \leq j \leq N\} \end{array}$$

図 1 粒子型フィルタによる画像復元の アルゴリズム

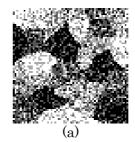
# 4. フィルタリングとスムージング

上述による粒子型フィルタは各点における状態推定のモデリングの枠組みからは観測画像の部分配色  $y_{1:i}$  が所与の場合の周辺分布  $p(x_i \mid y_{1:i})$  を得るためのフィルタリング手法と見なされる。これに対して観測画像全体の配色  $y_{1:M}$  が所与の場合の周辺分布  $p(x_i \mid y_{1:M})$  の推定はモデリングの観点からはスムージング手法と見なすことができる。図 1 の計算手順においては,ステップ2-1 のサンプリングを  $x_i^{(j)} \sim p(x_i \mid x_{R_i}, y_{R_i^*})$  と置き換えることにより,スムージングによる計算法へと修正することができる。ただし, $R_i^- = R_i \cap \{s_k; k < i\}$ , $R_i^+ = R_i \cap \{s_k; k \geq i\}$  とし,これは時系列における過去と未来の関係の画像平面における領域表現である。

画素数  $M=64^2$  から成る濃度値数が 4 値の人工的な原画像に対し $\sigma^2=1$  のガウスノイズを付加し、スムージングによる処理を行った結果を表 1 に示す。 粒子数 N に対する復元度を $d_1=\sum_{i=1}^M I(x_i,x_i^*)/M$ , $d_2=\sum_{i=1}^M |x_i-x_i^*|/M$  および平均二乗誤差により評価している。また、図 2 にノイズ付加後の観測画像と、N=10000 とした場合の復元画像を示す。

表1 スムージングによる復元結果

N	$d_1$	$d_2$	MSE
50	0.2693	0.2922	0.3430
100	0.2305	0.2556	0.3123
500	0.1929	0.2117	0.2542
1000	0.1902	0.2129	0.2642
5000	0.1860	0.2073	0.2546
10000	0.1709	0.1912	0.2366



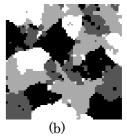


図 2 観測画像(a)と復元画像[N = 10000] (b)

# 5. 議 論

逐次モンテカルロ法を画像復元へ適用する場合には、復元結果をM点から成る画像で得るため、逐次計算途中の各粒子の履歴を保持する必要がある。従って、高解像度の画像を対象とする場合や復元度を高める目的で粒子数Nを記憶を取る場合には、それに見合った十分な記憶を量と計算時間が要求されることになる。一方、 $p(x_i \mid y_{1:M})$ を得ようとするスムージングのアプローチにおいては、逐次計算の過程で時点iを進めるに従い、iから遡った時点での濃度値分布は徐々に退化することが知られている[3]。このことは、遠い過去の履歴については単一の代表にといるにより、今後このような工夫を取り入れることで、計算負荷に関するさらなる改善が期待できる。

# 参考文献

- [1] (ed.) Doucent, A., Freitas, N. D. and Gordon, N: Sequential Monte Carlo Methods in Practice, New York: Springer-Verlag, 2001
- [2] Ken Nittono and Toshinari Kamakura: On the use of particle filters for Bayesian image restoration, COMPSTAT 2002 Proceedings in Computational Statistics, pp. 473-478, 2002
- [3] Kitagawa, G: Monte Carlo filter and smoother for non-Gaussian nonlinear state space models, Journal of Computational and Graphical Statistics, Vol.5, pp.1-25, 1996
- [4] Liu, J.S: Monte Carlo strategies in scientific computing, New York: Springer-Verlag, 2001

### 連絡先:

入戸野 健

高崎健康福祉大学

〒370-0851 群馬県高崎市中大類町 501

Phone: 027-352-1291 Fax: 027-352-1985

E-mail: nittono@takasaki-u.ac.jp

# 拡張型セルオートマトンによる交通システムの構築

# Synthesis of traffic system using extended rough celluler automata

田崎 栄一郎 萬玉 健太

# Eiichiro Tazaki Kenta Mangyoku

桐蔭横浜大学

# Touin University of Yokohama

**Abstract**: Today's road situation has various problems. In order to solve those problems, it is considered to be one of the effective means to use an intelligent transport system (henceforth, ITS). This time, about the simulation of a traffic style important as evaluation of this ITS, the experiment using the cell automaton extended by rough (field of the complexity system is also considered to be more useful) aggregate theory is conducted, and the usefulness is verified.

### 1.はじめに

今日の道路状況は様々な問題を抱えておりそれらの問題を解決するためには高度道路交通システム(以下 ITS)を使用することが有効な手段の一つと考えられる。ITS(Intelligent Transport Systems)は交通事故、渋滞などの道路交通問題の解決を目的に構築する新しい交通システムであり、これを使用することによって、渋滞の解消、目的地へのスムーズな誘導などが可能になる。

本研究は、ラフ集合理論により拡張されたセルオートマトンを使った交通ネットワークシステムのモデルを構築を行い、提案された方法の有効性を検証する。

## 2. セルオートマトン

セルオートマトンは、セルと言う基本単位を繰り返し、隣接するもの同士を局所的な規則によって結合する事によりシステムを成長させて行くことができるという性質を持っている。これまで人工生命のモデル化手

法として利用されている。

例として最も単純なセルオートマトンを紹介する。今、ある帯状の図形を長さ方向にN個に等分割し、分割された各々の図形をセルと呼ぶことにします。それらのセルについて、一方の端からセル1、セル2 ... セルNというように番号を振っていき、それぞれのセルが状態0または1をとると仮定する。

(図1)

# 0 1 1 0 0 0 1 ... 0

図 1:0 または 1 の状態を持つ 1 次元セル空間

それぞれのセルは1離散時刻単位毎に状態が更新される。この更新は空間全体で同時に行われる。更新後もそれぞれのセルは状態0または1をとるが、どちらになるかは1つ前の離散時刻における自分自身とまわりのセルの状態によって決定する。

今回、拡張型2次元セルオートマトンを 使用した交通ネットワークシステムの構築 を行う。

# 3.ラフ集合理論

予測の難しい非線形データを「類別」と「近似」の基本概念に基づき「決定表」と「識別行列」を構成しそれによって決定を下すことができる。

ここに、決定表の例を挙げる。

				1
オブジ	<b>状</b> 愈	長の属性		決定項
ェクト	最短距	渋滞	時間的	
	離		遅れ	
x 1	左	無し	無し	左
x 2	右	無し	有り	右
x 3	直進	有り	有り	左
x 4	右	有り	無し	右
•				
•				
•				
хn				

次に識別行列の例を挙げる。

If( 最短距離 = 右 )AND( 渋滞 = 無し ) AND(時間的遅れ = 有り)THEN( 決定 項 = 右 )

If(最短距離 = 右)AND(渋滞 = 有り) THEN(決定項 = 右)

If(最短距離 = 左)AND(時間的遅れ = 無し)THEN(決定項 = 左)

この様に例に挙げたように、状態の属性が すべてそろわなくても決定を下すことがで きる。

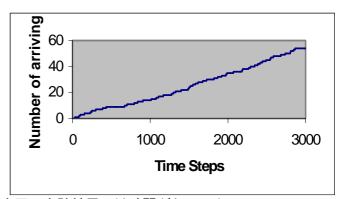
4. セルオートマトンとラフ集合理論の統合システムについて

現実社会の交通は予測の難しい状況がほ とんどであり、そういった状況をラフ集合理 論を組み込むことによって、概存のセルオー トマトンのみのものより有用性があると考 える。

## 5. 実験方法

今回、実験するに際してセルオートマトンのみを使用したプログラムと、ラフ集合理論とセルオートマトンを組み合わせたものの2つを使用することによってどちらがより有用なシステムになりうるかということを比較、検証した。

# 6. 実験結果



今回の実験結果では時間がたってもコンス タントに目的地に達しており、渋滞などには まって動けなくなることはなかった。

### 7 . 参考文献

[1]Yasser Hassan and Eiichiro Tazaki, Celluar Automata Based on Rough Set Theory [2] ファジイシステムシンポジウム (2 001)

## 連絡先:

田崎 栄一郎

桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科 神奈川県横浜市鉄町1614

Phone: 0 4 5 - 9 7 4 - 5 0 7 0

Fax: 0 4 5 - 9 7 8 - 1 3 1 1

E-mail: tazaki@intlab.toin.ac.jp

# ファジィ交通行動モデルを用いた都市交通解析

# Urban Transport Analysis with Fuzzy Travel Behaviour Model

秋山 孝正奥嶋 政嗣小澤 友記子Takamasa AkiyamaMasashi OkushimaYukiko Ozawa岐阜大学岐阜大学岐阜大学Gifu UniversityGifu UniversityGifu University

**Abstract:** Application of travel behaviour model is highly desired to describe the daily trip pattern of the trip makers as an important analysis technique in urban transport planning. The model would describe the decision for purpose, mode, destination, and route for trips with considering the trip chaining of trip makers. In the study, soft computing approaches such as fuzzy reasoning, fuzzy neural network and so on would be applied to formulate the decision process to establish the fuzzy travel behaviour model. The trip patterns can be analyzed corresponding to the trip survey results for urban area. Furthermore, the effectiveness of traffic demand management can be discussed because the traffic flow analysis would be carried out with considering human fuzziness.

### 1. はじめに

都市交通計画における交通需要を的確に捉えるために、人間の行動原理を考慮した交通行動モデルの適用が期待されている。これは、交通行動者のトリップ連鎖を考慮して、交通に関するさまざまな判断を記述するものである。道路利用者の交通機関選択や経路選択現象をモデル化する方法として、ソフトコンピューティングの利用が提案されている 1)2)3)。

本研究では、このような研究成果を踏まえて一連の交通行動を統合的に推計する「ファジィ交通行動モデル」を構成する。これは、交通行動者の一日全体の交通行動を記述するものである。これより、都市圏の交通行動調査結果に基づく交通行動パターンの解析や、各種交通政策に対する評価が可能となる。

# 2. 交通行動分析の概要

### 2.1 一日の交通行動の表現

本研究で作成する交通行動モデルは、個人の第 1 トリップから最終トリップまでの 1 日の交通行動を 推計するものである。ここでは、活動と移動の関係 から交通行動が推計される。

本研究では、個人の活動は1日の中で行動が予定されている固定活動と、1日の交通行動の中で逐次推計される自由活動に分類される。固定活動とは、一日の生活で先決されている活動である。このとき、固定活動の要素(活動場所、活動開始時刻、活動滞在時間など)は既知とする。本モデルで推定される状況を図1に整理する。トリップは活動と活動の間に存在し、順次推計される。

交通行動において、意思決定プロセスにはあいまい性が多く含まれる。そのため、交通行動モデルへのソフトコンピューティングの適用が有効となる。



図1 本モデルの推計範囲と意思決定時点

### 2.2 交通行動モデルの意思決定過程

本研究で作成するファジィ交通行動モデルは、逐次的な意思決定過程をもつ。トリップの連鎖を段階的に推計する構造となっている。ここで交通行動に関する意思決定過程を図2のようにモデル化する。

推計にあたっては、交通行動者に対する設定条件として、個人属性(年齢、性別、職業など)および固定活動(勤務時間、帰宅時間など)が与えられている。これらの実績データは、第3回中京都市圏パーソントリップ調査データに詳細に蓄積されている。

本モデルでは交通行動者は、1 トリップごとに 出 動(登校)決定、 活動内容選択、 滞在時間決定、 目

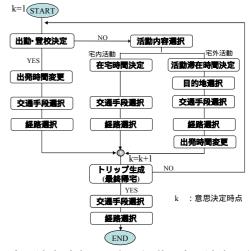


図2 意思決定時点での交通行動の意思決定過程

的地選択、 交通手段選択、 経路選択、 出発時間 変更の判断を順に行う。当該トリップ終了後、 トリップ生成において、新たに活動を行う判断となった場合に に戻る。さらに、これらの判断を第1トリップ 開始から最終トリップで帰宅するまで繰り返し、1日のトリップパターンが記述される。

# 3.ファジィ交通行動モデルの構築

上記のように、交通行動は8種類のモデルで表される。これらの判断には、それぞれ適したソフトコンピューティング手法が適用される。以下に、それぞれの判断モデルについて簡単に整理する。

# 3.1 各段階のモデルの概要

各段階のモデルの概要を表 1 に示す。それぞれの 判断モデルの概要を以下に簡単に説明する。

勤務地到着予想時刻が勤務開始時刻を超過する可能性を算出する。これら2種類の時刻を三角型ファジィ数であらわし、あいまいな時空間制約を表現することで、人間の時刻に対するあいまいな判断基準をモデルに取り込んでいる。

ニューロ化ファジィモデルの前件部で交通行動者を意思決定の異なる4つのグループに分類する。各グループへの所属度はファジィ数で算出される。後件部では8種類の説明変数を用いて、4種類の活動からNNによりトリップ目的が選択される。

活動内容ごとに滞在時間決定モデルが構築される。前件部では、活動内容が7種類を詳細分類する。ここで<u>簡略ファジィ推論により、詳細活動が行われる可能性がファジィ数で算出</u>する。後件部では詳細活動別の滞在時間をNNにより決定する。

生活圏を考慮した目的地が選択される。目的地 集合を決定し、選択肢の絞込みを行う。次に様々な 要因を考慮した目的地決定のファジィ推論ルールを、 ファジィクラシファイアシステムを用いて作成する。

<u>ID3</u>を用いた判別モデルでは、10個の説明変数を用いて意思決定過程を分類した。特徴的な意思決定は簡略ファジィ推論、平均的な意思決定はロジッ

トモデルで記述した。

経路選択において個人の時間価値が重要な判断要因となる。そのため個人属性を考慮し、10種類のファジィ推論ルールを用いてファジィ時間価値を算出する。次に、これを用いて各経路の選択評価値を算出する2段階で構成する。

交通政策が導入された場合において、出発時間を変更するか否かの判断を行う。ここでは言語表現を用いた IF/THEN ルールベースが経験的知識に基づいて記述されている。

と同様、現在時刻と到着予想時刻を三角型ファジィ数とおき、あいまいな時空間制約を表現する。本論文では、交通行動の意思決定の中でも特に重要な「トリップ生成モデル」と「目的地選択モデル」について説明する。

## 3.2 トリップ生成モデル

一日全体の交通行動を記述する上で、一日のトリップ数を正しく推計することは重要な課題である。 そのため、各活動後の追加的なトリップの有無の判断は、交通行動モデルにおいて重要な役割を占める。

このモデルでは、あらかじめスケジューリングされた最終帰宅後の在宅活動を始めるまでに、時間的余裕があるか否かを判断している。現在時刻から想定できる自宅到着予想時刻は、式(1)で表される。

$$TE = TP + T_{OD}$$
 (1)  
 $TE$  : 自宅到着予想時刻  $TP$  : 現在時刻  
 $T_{OD}$  : 現在地から自宅まで基準所要時間

つぎに自宅到着予想時刻が最終帰宅時刻を超過する可能性を算出する(図 3)。両時刻は三角型ファジィ数で表現されていることから、式(2)に示す、ファジィ可能性測度の指標を用いて判断する。

$$Pos(TE \ge TS) = \sup_{u \ge v} \min(\mu_{TE}(u), \mu_{TS}(v))$$
 (2)

 $\mu_{TE}$  : TE のメンバシップ関数  $\mu_{TS}$  : TS のメンバシップ関数

<b>=</b> 4	タミ用油学肌能の推動子注の動用
表1	各意思決定段階の推計方法の整理

	モデル名	概要	出力	モデル手法	モデル中の言語変数
出勤·登校決定	*	出勤(登校)するか否かを決定	出勤(登校)を行う可能性	ファジィ可能性測度を用いた判別	到着予想時刻,勤務開始時刻
活動内容選択	*	トリップの目的を決定	日常的自由活動· 非日常的自由活動· 在宅活動·業務活動	ニューロ化ファジィモデル	年齢、各グループへの帰属度
滞在時間決定	*	活動の滞在時間を決定	各活動の滞在時間(分)	ニューラルネットワーク駆動型 ファジィ推論	現在時刻 各詳細活動を行う可能性
目的地選択	1) 選択肢集合の決定	目的地集合の決定	目的地ゾーン(1~18)	プロダクションシステム	距離、認知所要時間、費用、現在時刻
**	2) 目的地の決定	トリップの目的地を選択	日 10 7 世 ク 一 ク (1 ~ 10)	FCSを用いたファジィ推論	<b>此離、祕和別安时间、頁用、現任时刻</b>
☆マエCの1884日	1) 意思決定の判別	交通行動者の意思決定の種 類を判別	公共交通機関(バス)	ID3	距離、認知所要時間、費用、
交通手段選択	2) 平均的な意思決定の記述	トリップの交通手段を選択	自動車 徒歩・二輪	ロジットモデル	現在時刻年齡
	3) 特殊な状況下での意思決定の記述	ドリップの交通子段を選択		簡略ファジィ推論	<del></del> ■<
経路選択	**	トリップの使用経路を選択	通常経路·迂回経路	多段ファジィ推論、 GAを用いたパラメータ推計	時間価値、認知所要時間·費用
出発時間変更	**	トリップの出発時間を決定	変更なし・ 前へ変更・後へ変更	プロダクションシステム	時間価値、現在時刻
トリップ生成		新しくトリップを行うか一日の 活動を終えるかを決定	最終帰宅を行う可能性	ファジィ可能性測度を用いた判別	自宅到着予想時刻,最終帰宅時刻

<sup>\*</sup> アクティビティに関する意思決定 \*\* トリップに関する意思決定

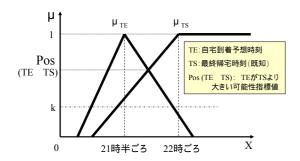


図3 最終帰宅時刻決定の例

この可能性指標値が基準値 k を上回るとき、個人は 自宅到着予想時刻が最終帰宅時刻を超過する可能性 が高いと判断し、最終帰宅を選択して一日の交通行 動を終了する。最終帰宅ではないと判断した場合は、 へ戻り、次のトリップについての判断を行う。

モデルの推計結果は的中率が 93.8%であった。三 角型ファジィ数の幅は、現在地から自宅までの距離 別に 13,20,40 分の 3 種類とした。基準値 k の値は試 行錯誤法により算定し、0.19 と決定した。

### 3.3 目的地選択モデル

交通行動は、時間と空間との関係に重点をおいて 記述される。そのため活動場所であるトリップの目 的地の特定が重要であり、ここでの判断は後のトリ ップパターンの構成にも大きく影響する。

目的地選択モデルの構造を図4に示す。この判断では、1)選択肢集合の決定と2)目的地決定の、2段階の意思決定を仮定した。

1)選択肢集合の決定:5 種類の選択肢集合が設定されている。居住地、勤務地からトリップの方向性を考慮した選択肢集合が割り当てられる。さらに個人属性や意思決定状況を考慮し、IF/THEN ルールを用いて選択肢の範囲を絞込む。最終的に選択肢集合に含まれる目的地は2~6 ゾーンに絞られる。

2)目的地決定:目的地を決定する推論ルールの作成には、既存研究を参考として、ファジィクラシファイアシステムを導入した<sup>4)5)</sup>。本研究でのシステムは、実際の行動結果との適合により各ルールの信頼度を更新するものである。ファジィ推論では、個人属性、ゾーン特性、距離などの11変数を使用し、各目的地の選択可能性値が算出される。ルールは50種類作成する。信頼度による順位の高いルールより、タイプ

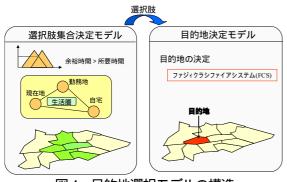


図4 目的地選択モデルの構造

の異なる代表的なルールの例を図5に示す。

R-1とR-2では、個人属性や、意思決定状況(距離、勤務状況など)を考慮して判断するルールとなっている。R-3では、個人属性等に関係なく、目的地から自宅までの距離のみのルールとなった。また、ルール郡全体において、頻繁に現れた説明要因は、職業、免許の有無、勤務地からの距離、出発地の属性(自宅・勤務地・その他)であった。

この判断の推計結果は的中率が 78.9%(451/571 サンプル)であり、距離や時空間制約におけるあいまい性を考慮したモデル化が可能となった。

R1 IF OCP is office worker and DOD is large and TWH is before and DES is other THEN POS is very large
R1 IF AGE is very small and DDH is medium and TCT is small and DES is same
THEN POS is very large
R1 IF DDH is large THEN POS is small

OCP:職業 DOD:会社までの距離 TWH:勤務前後 DES:同一ゾーン AGE:年齢 DDH:自宅までの距離 TCT:所要費用 POS:目的地の選択可能性 V-large=100, large=50, medium=10, small=-50, V-small=-100

### 図5 目的地決定の推論ルール例

## 4.ファジィ交通行動モデルの検証

# 4.1 トリップパターンについての段階的な検証

ファジィ交通行動モデルは時間的経過に従い個人のトリップ連鎖を推計する。具体的な推計過程を例により説明する。図6に具体的なサンプルの交通行動例を示す。本例は典型的なオフィスワーカーの交通行動で自宅 勤務先 買物先 自宅を巡回する。自宅(HB)以外に2箇所の訪問先(ストップ)を持つトライアングル型交通パターンである。

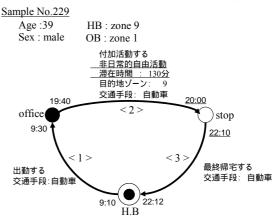


図 6 交通行動パターンの実績(サンプル No.229)

本例の推計過程はつぎのようである(図 7)。
[初期条件]各サンプルに対する設定条件として、個人属性(年齢、性別、職業など)および固定活動(勤務時間、帰宅時間など)が与件である。
[第1トリップ] 勤務開始時刻と所要時間の関係から可能性により「出勤時刻」を決定する(モデル )。個人属性(免許・自動車保有)から交通手段が「自動車」となる(モデル ;ファジィロジット)。勤務先に到着して勤務(固定活動が開始)

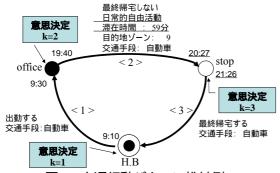


図7 交通行動パターン推計例

[第2トリップ] 勤務活動終了後、最終帰宅時刻と所要時間の関係より、「付加活動を行う」と決定する(モデル)。個人属性、意思決定状況(勤務後等)から付加活動内容が「日常的自由活動」となる(モデル)。付加活動の滞在時間が59分と推計される(モデル)。現在時刻が夜遅いこと、時空間制約等から、目的地が自宅と同一ゾーン(9 ゾーン)を選択する(モデル)。前トリップからの連鎖により、交通手段が「自動車」となる(モデル)。

[第3トリップ]自由活動終了後、最終帰宅時刻と所要時間の関係より、「最終帰宅する」と決定する(モデル )。個人属性、前トリップからの連鎖により、交通手段が「自動車」となる(モデル )。自宅に到着し、一日全ての活動を終了する。

この例では、[1]付加活動の活動内容、[2]滞在時間が誤判断された。モデル において、活動が日常的自由となったことで、モデル のファジィニューロの出力値が過少推計されている。しかしながら、一日全体でのトリップパターン、利用交通手段は正しく推計されており、行動パターンがほぼ正しく再現されているといえる。同様に、各サンプルに関してファジィ交通行動モデルから逐次推計が実行できる。第1トリップにおいて交通手段や滞在時間が誤判断された場合、次のトリップにも誤判断が連鎖し、全体のトリップパターンや時空間制約にも影響する問題が挙げられた。

### 4.2 トリップパターンの推計結果

岐阜市在住の 8,443 サンプルデータを用いて、1日の交通行動推計を行った。トリップパターンの推計値と実績値との比較を表 2 に示す。トリップパターンの的中率は 60.0%(5068 / 8443)となった。また、一日のトリップ数についての的中率は 60.4%(5097 / 8443)、交通行動の中での自動車利用の有無についての的中率は 74.1%(6249 / 8443)であった。これらの結果から得られたファジィ交通行動モデルの特徴を以下にまとめる。

ダブルピストン型やサイクル型のような、複雑なトリップパターンほど推計精度が低い。

ピストン型とトライアングル型で相互の誤推計が 多い。この場合、トリップ生成モデルでの誤判断

表2 トリップパターンの推計結果

					推計					
		1	ピストン型	トライアン グル型	W- ビストン (H-B)	W-ピスト ン	サークル 型	2-サイク ル		合計
		同一 ゾーン							その他	П
	同一ゾーン	2,425	317	99	70	0	26	25	28	2,990
	ピストン型	303	2,345	402	32	33	26	19	45	3,205
	トライアング ル型	107	205	155	41	7	18	24	25	582
実	W-ピストン (home-based)	130	78	138	63	1	22	31	25	488
續値	W-ピストン office-	33	176	11	1	0	0	0	3	224
	サークル型	51	40	52	14	7	16	13	22	215
	2-サイクル型	85	77	57	31	2	9	21	33	315
	その他	136	113	51	26	4	23	28	43	424
	合計	3,270	3,351	965	278	54	140	161	224	8,443
										camplec)

が原因であり、このモデルの改良が必要である。 各判断の推計結果では、それぞれ高い推計精度が 得られている。しかしながら、全ての要素を併せ ると、個別要素の推計精度よりも的中率は低下し ている。原因として、各判断での誤差が蓄積され ていることが考えられる。

### 5.おわりに

本研究では、一日の交通行動を段階的に記述する ファジィ交通行動モデルを構築した。本研究での成 果を以下にまとめる。

交通行動の各判断に適切なソフトコンピューティング手法を適用することで、交通行動者の意思決定に関するあいまい性や複雑性を明示的に表現可能なモデルが構築された。

各判断モデルを有機的に統合し、一日の交通行動の段階的推計を行った。これにより、意思決定の連鎖過程が明確に記述できていることが確認された。

最後に、今後の課題を以下に整理する。

行動データよりその特性を学習する機能を備えた、 複雑な現象の表現が可能な行動モデルの作成

事例データベースを活用した交通行動推計

### 【参考文献】

- 1) 高羽俊光, 秋山孝正: ファジィ時空間制約を考慮した交通 行動分析, 第 6 回ファジィ建築土木応用シンポジウム講演論 文集,pp.23-31,1999.
- 2) 水谷香織,秋山孝正:ファジィ推論を用いたハイブリット交通機関選択モデルに関する検討, , 第 16 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 , pp.39-40,2000
- 3) 小澤友記子,秋山孝正:ファジィ時間価値を考慮した交通機 関選択モデルの構築 ,第 18 回ファジィシステムシンポジウム 講演論文集 , pp.579-580,2002
- 4) 中岡謙, 古橋武, 内川嘉樹, 前田宏: ファジィクラシファイアシステムの報酬と信頼度割り当てに関する一提案・大規模システムにおける知識発見を目指して・, 日本ファジィ学会誌, Vol. 8, No. 1, pp. 65-71, 1996.
- 5) 石渕久生: ファジィクラシファイアシステム, 日本ファジィ学会誌 Vol.10, No4, pp.613-625, 1998

## 【問い合わせ先】

〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1

岐阜大学工学部土木工学科都市計画講座 <u>**奥嶋**</u>政嗣

TEL 058-293-2443 FAX 058-230-1528 E-mail: okushima@cc.gifu-u.ac.jp

# 高度情報化に対応した都市高速道路のファジィ交通制御の提案 Fuzzy Traffic Controller on Urban Expressway with Integrated Informatics

# 奥嶋 政嗣 Masashi OKUSHIMA

# 岐阜大学 Gifu University

# 秋山 孝正 Takamasa AKIYAMA

# 岐阜大学 Gifu University

**Abstract** The advanced inflow control method with the scheme of ramp metering has been discussed because of the progress of ITS technology. The traffic controller on the expressway should be designed with considering many different conditions. The fuzzy inflow controller as multipurpose control method would be formulated as a practical ramp metering method. The aim of this study is the improvement of the proposed fuzzy inflow model with ramp metering for the actual application. Several advantages of proposed method are shown in the formulation as well as practical applications.

### 1. はじめに

都市高速道路における交通制御方法は,近年の各種情報技術の進展に伴って,流入台数の高度な調整方法の適用が可能となってきている.また,現実の交通制御の局面においては,交通需要量などの不確実現象を前提とした、経験的な実用的知識の導入が必要となる.これまで,都市高速道路における流入制御にファジィ制御を導入し、既存の各種流入制御方式に含まれる知識を実用的に利用する方法が検討されている<sup>1),2)</sup>.本研究では,既存研究の成果を参考に,「流入調整型のファジィ制御」の記述方法を示すとともに,方法論的な面からの,ファジィ制御モデルの適用性を検証する.

# 2. ファジィ制御による交通制御方法の提案

### 2.1 都市高速道路の流入制御

都市高速道路においては,交通渋滞の緩和のために, 入路の料金所での流入制御が実施されている.ここでは,入口ブース数を変更するブース閉鎖制限方式が適用されている.これに対して,ETC を用いて流入台数を調整する流入調整方式の検討がなされている.

本研究では,流入調整方式の適用に関して,交通管制官の経験的知識を利用したファジィ制御の導入を提案する.このとき,多様な制御目標の実現可能性の面から,ファジィ流入制御モデルの適用性の検証を行う.

本研究で対象とする阪神高速道路 15 号堺線 (11.7km)を,図-1に示す.この路線は大阪市中心部の環状線と堺市とを結ぶ,典型的な放射線の1つであ

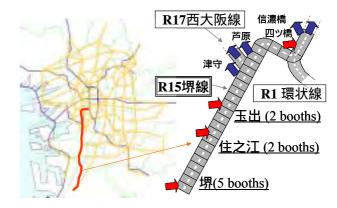


図 - 1 対象路線 (阪神高速道路 15 号堺線)

る.また路線内には,3箇所の入路,2箇所の出路と, 西大阪線への分流部が含まれている.

## 2.2 ファジィ流入制御の概要

ここでは,本研究で検討するファジィ流入制御モデルについて説明する.ファジィ流入制御モデルは,目的関数を規定することなく,制御の記述が可能である.また,制御ルールの追加は比較的容易に実現できる.

既存研究において,交通管制官の主要な制御決定要因となる「渋滞長」「流入需要量(5分間到着交通量)」,「入路での待ち台数」の3要因により、「制御レベル」を決定するファジィ制御モデルが提案されている<sup>1)</sup>.

本研究では,これらの制御決定要因を用いて,5分ごとに「流入交通量」を決定する制御モデルについて検討する<sup>2)</sup>.3種類の制御決定要因について説明する.

渋滞長(CON): 当該路線では,500m ごとに車両検知器が設置され,道路区間の渋滞・非渋滞が判定されている. 都市高速道路の流入制御の一義的な目標は,この渋滞区間を,より少なくすることにある.

流入需要量(DEM): 入路に到着する交通量の分布は, 蓄積された流入交通量の実績データより判断される. 流入制御に対しては,制約条件に相当する.

入路待ち台数(QUE):入路での待ち台数は,流入待ち時間に対応する.また,待ちスペースを超過する場合には,一般道路への迂回車両も考慮する必要がある.

これらの制御決定要因は、それぞれの状態を3段階の言語変数を用いて記述される.これらの制御決定要因のメンバシップ関数の概形を図-2に示す.また、渋滞長の変化量についても、3段階のメンバシップ関数を、三角形分布を用いて規定している.

一方で,出力値となる流入交通量(IFW)においては, 5 段階の言語変数を用いて表す.このとき,入力値と 同様に,メンバシップ関数には図-3に示すように三 角形分布を用いた.このように,すべての変数につい て,あいまい性を規定した.

### 2.3 ファジィ制御ルール

本研究で用いるファジィ制御ルール群を , 図 4 に 示す . ここで , ルール群は 2 種類に大別できる . 交通 状況による判断 (R-01~R-15)と , 一般道路への影響の判断 (R-16~R-22)である .

交通状況による判断は、渋滞長およびその変化量・流入需要量よりルールが定められている。ここでは、 渋滞長および流入需要量により、交通状況を 5 段階に 分類し、各段階において渋滞長の変化量に応じて、それぞれ3 ルールによりルール群を構成している。

また,一般道路への影響の判断は,入路待ち台数と 渋滞長よりルールを定めている.例えばルール R-16 は, 「待ち行列長が長い場合には,(渋滞長に関わらず)流 入交通量を多くする.」ことを意味する.

# 2.4 対象ケースの設定

ここでは,流入調整型のファジィ制御について,そ の特性を明確にするためにファジィ推論方式の相違に より,3 種類の対象ケースを設定する.具体的には,

Min -Max -Gravity 法 , Product -Sum -Gravity 法 , 簡略ファジィ推論法の 3 ケースとする .

ここで簡略ファジィ推論法での後件部の設定について説明する.各段階の設定値は,very small:180, small:230, medium:280, large:330, very large:380とした.これは,ファジィ数で表現した場合の,三角形分布の頂点に相当する.簡略ファジィ推論法については,この設定値を調整することで,よりよい制御効果が期待できることを考慮して評価する.

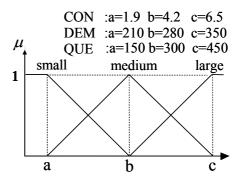
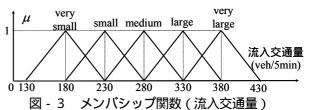


図 - 2 メンバシップ関数 (制御決定要因)



R-01:IF CON is short R-02:IF CON is short R-03:IF CON is short R-04:IF CON is medium R-05:IF CON is medium R-06:IF CON is medium R-06:IF CON is medium R-07:IF CON is medium R-07:IF CON is medium R-07:IF CON is medium R-08:IF CON is medium R-09:IF CON is medium R-09:IF CON is medium R-11:IF CON is medium R-11:IF CON is medium R-12:IF CON is medium R-14:IF CON is long R-14:IF CON is long R-14:IF CON is long R-14:IF CON is long R-08:IF CON is medium R-14:IF CON is medium R-15:IF CON is medium R-16:IF CON is medium R-16:IF CON is medium R-17:IF CON is medium R-18:IF CON is long R-19:IF CON is long R-19:
R-03:IF CON is short and CON is positive and CON is negative and DEM is small THEN IFW is very large CON is medium and CON is negative and DEM is medium THEN IFW is very large CON is negative and DEM is medium THEN IFW is large CON is negative and DEM is medium THEN IFW is large THEN IFW is large CON is zero and DEM is small THEN IFW is large CON is zero and DEM is medium THEN IFW is large CON is zero and DEM is medium THEN IFW is large THEN IFW is large CON is zero and DEM is medium THEN IFW is medium THEN IFW is medium THEN IFW is medium CON is positive and DEM is medium THEN IFW is small CON is positive and DEM is medium THEN IFW is small THEN IFW is small CON is positive and DEM is big THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is medium THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium T
R-04:IF CON is medium and CON is negative and CON is negative and R-05:IF CON is medium and R-06:IF CON is medium and CON is negative and DEM is medium THEN IFW is large  R-07:IF CON is medium and CON is negative and DEM is big THEN IFW is medium DEM is medium THEN IFW is large  R-08:IF CON is medium and R-09:IF CON is medium and R-10:IF CON is medium and R-11:IF CON is medium and R-12:IF CON is medium and R-12:IF CON is medium and R-12:IF CON is medium and R-13:IF CON is long and CON is positive and DEM is big THEN IFW is small THEN IFW is small THEN IFW is medium THEN IFW is small THEN IFW is small THEN IFW is small THEN IFW is medium THEN IFW is small THEN IFW is sma
R-05:IF CON is medium and R-06:IF CON is medium and R-07:IF CON is medium and R-08:IF CON is medium and R-09:IF CON is medium and R-10:IF CON is medium and R-11:IF CON is medium and R-12:IF CON is medium and R-12:IF CON is medium and R-13:IF CON is medium and CON is positive and R-13:IF CON is long and CON is negative and R-15:IF CON is long and CON is negative and CON is positive and CON is negative and CO
R-06:IF CON is medium and CON is negative and CON is negative and DEM is medium and CON is negative and DEM is big THEN IFW is large  R-07:IF CON is medium and CON is zero and DEM is small THEN IFW is large  R-08:IF CON is medium and CON is zero DEM is medium THEN IFW is large  R-09:IF CON is medium and CON is zero DEM is medium THEN IFW is medium THEN IFW is medium CON is zero DEM is big THEN IFW is small  R-10:IF CON is medium and CON is positive and DEM is medium THEN IFW is small  R-12:IF CON is medium and CON is positive and DEM is big THEN IFW is small  R-13:IF CON is long and CON is negative THEN IFW is medium THEN IFW is small  CON is negative THEN IFW is large  THEN IFW is large  THEN IFW is large  THEN IFW is medium THEN IFW is medium  THEN IFW is medium THEN IFW is small  THEN IFW is medium THEN IFW is medium  THEN IFW is medium THEN IFW is medium  THEN IFW is medium
R-06:IF CON is medium and CON is negative and DEM is medium and CON is negative and DEM is big THEN IFW is medium.  R-07:IF CON is medium and CON is zero and DEM is small THEN IFW is large  R-08:IF CON is medium and CON is zero DEM is medium THEN IFW is large  R-09:IF CON is medium and CON is zero DEM is big THEN IFW is small THEN IFW is medium THEN IFW is small THEN IFW is small THEN IFW is small THEN IFW is medium THEN IFW is small CON is positive and DEM is medium THEN IFW is small CON is positive and DEM is big THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is medium THEN IFW is medium THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN
R-06:IF CON is medium and CON is negative and DEM is big. THEN IFW is medium DEM is big. THEN IFW is medium DEM is small THEN IFW is large CON is zero and DEM is medium THEN IFW is large CON is zero and DEM is big. THEN IFW is large CON is zero and DEM is big. THEN IFW is large THEN IFW is medium THEN IFW is medium CON is positive and DEM is medium THEN IFW is small CON is positive and DEM is medium THEN IFW is small CON is positive and DEM is big. THEN IFW is small THEN IFW is small CON is positive and DEM is big. THEN IFW is small THEN IFW is small CON is positive and DEM is big. THEN IFW is small THEN IFW is small THEN IFW is small CON is positive and DEM is big. THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is me
R-07:IF CON is medium and CON is zero and P-08:IF CON is medium and R-09:IF CON is medium and R-10:IF CON is medium and R-11:IF CON is medium and R-12:IF CON is medium and CON is positive and CON is positive and DEM is medium THEN IFW is small THEN IFW is small THEN IFW is small THEN IFW is small CON is positive DEM is big THEN IFW is small THEN IFW is small CON is positive and DEM is big THEN IFW is very small THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is med
R-07:IF CON is medium and CON is zero and CON is positive and CON is medium and CON is positive and CON is medium and CON is positive and CON
R-08:IF CON is medium and cON is zero and and DEM is medium THEN IFW is large  R-09:IF CON is medium and cON is zero and DEM is big and DEM is big and DEM is big and DEM is small  R-10:IF CON is medium and cON is positive and R-11:IF CON is medium and cON is positive and DEM is medium and DEM is medium and DEM is medium and DEM is big and DEM is big THEN IFW is small  R-13:IF CON is long and CON is negative THEN IFW is medium THEN IFW is very small  R-13:IF CON is long and CON is negative THEN IFW is medium
R-08:IF CON is medium and CON is zero DEM is medium THEN IFW is medium DEM is big THEN IFW is small THEN IFW is medium THEN IFW is medium THEN IFW is medium THEN IFW is small CON is positive and DEM is medium THEN IFW is small CON is positive and DEM is medium THEN IFW is small THEN IFW is small THEN IFW is small CON is positive and DEM is big THEN IFW is very small THEN IFW is very small CON is negative THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is
R-09:IF CON is medium and CON is zero  R-10:IF CON is medium and R-11:IF CON is medium and R-12:IF CON is medium and CON is positive and DEM is medium THEN IFW is small CON is positive and DEM is big THEN IFW is very small THEN IFW is very small CON is negative THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium THEN IFW is medium THEN IFW is medium THEN IFW is very small THEN IFW is medium
R-09:IF CON is medium and and and DEM is big THEN IFW is small  R-10:IF CON is medium and CON is positive and R-11:IF CON is medium and CON is positive and R-12:IF CON is medium and CON is positive and DEM is medium THEN IFW is small  R-13:IF CON is long and CON is negative THEN IFW is medium  R-13:IF CON is long and CON is negative THEN IFW is medium  THEN IFW is very small  THEN IFW is very small
R-10:IF CON is medium and CON is positive and R-12:IF CON is medium and CON is positive and R-12:IF CON is medium and CON is positive and R-13:IF CON is medium and CON is positive and DEM is medium THEN IFW is small CON is positive and DEM is big THEN IFW is very small R-13:IF CON is long and CON is negative THEN IFW is medium
R-10:IF CON is medium and CON is positive and DEM is small THEN IFW is medium CON is positive and DEM is medium THEN IFW is medium THEN IFW is small CON is positive and CON is positive and DEM is big THEN IFW is very small R-13:IF CON is long and CON is negative THEN IFW is medium
R-11:IF CON is medium and CON is positive and CON is medium and CON is positive and CO
R-11:IF CON is medium and cON is positive and DEM is medium THEN IFW is small CON is positive and DEM is big THEN IFW is very small R-13:IF CON is long and CON is negative THEN IFW is medium THEN IFW is werd the control of the cont
R-12:IF CON is medium and CON is positive and DEM is big THEN IFW is small  R-13:IF CON is long and CON is negative THEN IFW is wery small
R-12:IF CON is medium and CON is positive and DEM is big THEN IFW is very small  R-13:IF CON is long and CON is negative THEN IFW is medium
and DEM is big THEN IFW is very small  R-13:IF CON is long and CON is negative THEN IFW is medium
R-13:IF CON is long and CON is negative THEN IFW is medium
R-14:IF CON is long and CON is zero THEN IFW is small
č
R-15:IF CON is long and CON is positive THEN IFW is very small
R-16:IF QUE is long THEN IFW is large
R-17:IF QUE is medium and CON is short THEN IFW is large
R-18:IF QUE is medium and CON is medium THEN IFW is medium
R-19:IF QUE is medium and CON is long THEN IFW is small
R-20:IF QUE is small and CON is short THEN IFW is very large
R-21:IF QUE is small and CON is medium THEN IFW is medium
R-22:IF QUE is small and CON is long THEN IFW is small

CON: 渋滞長, DEM: 流入需要量, QUE: 待ち行列長, IFW: 流入台数

図 - 4 ファジィ制御ルール

### 3.ファジィ流入制御の有効性

### 3.1 交通制御方法の評価手順

ファジィ流入制御モデルにより規定される制御内容を評価するため、洗滞シミュレーションを利用する<sup>4)</sup>.このとき、ファジィ流入制御モデルは、実際の流入制御と同様に、5分ごとに流入交通量の決定を行う.各制御要因は以下のように更新される.

渋滞長(CON): 500m ごとの道路区間について,区間平均速度30km/h以下と算定された場合に,渋滞区間と判定される.この渋滞区間の長さを,路線について総和することにより,渋滞長が算定される.

流入需要量(DEM):実績データより流入交通量を流入需要量とする.交通状況による変化はないとする.

入路待ち台数(QUE):流入需要量と流入交通量の差によって増減する.制御指標としては,対象路線の入路(堺·住之江·玉出)の合計値で表す.

渋滞シミュレーションを用いた制御評価の具体的手順を,図 5 に示す. ここでは,朝ピーク時の6:00~10:00の4時間帯について,渋滞シミュレーションを用いて流入制御モデルの評価を行う.

なお,渋滞シミュレーションによる現行制御方式での 渋滞状況の現況再現性は,90.6%となっている  $^4)$ .

# 3.2 流入制御効果の推定

つぎに提案したモデルの交通制御効果を検討する.ここでは,典型的な平日の交通渋滞を対象とした(平成9年10月14日実績データ).なお,ここでは推論方式に Min-Max-Gravity 法を用いている.

また,ファジィ流入制御時における推論結果の出力値は,3 入路の合計値としているため、実績値より各入路への割り当て比率は,堺:0.7,住之江:0.15,玉出:0.15 と設定した.入路待ち許容台数は,堺:404台,住之江:50台,玉出:87台と設定した.このとき,許容待ち台数を超過した流入需要量は,一般道路に迂回するとした.各入路から環状線付近までの一般道路における所要時間は,堺:40分、住之江:20分、玉出:15分とし,迂回走行時間として評価した.

流入制御の結果として,都市高速道路本線の渋滞状況の推移を図 - 6に示す.渋滞量は現行制御方式の27%となり,最大渋滞長も4.0kmと50%程度となっている.このように,都市高速道路本線の渋滞緩和について,流入調整型のファジィ制御の有効性が示された.

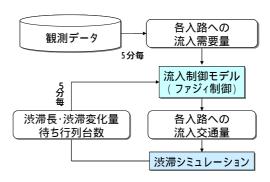


図 - 5 流入制御の評価手順

## 4. ファジィ制御の適用性の検証

ここでは,流入調整型のファジィ制御について,そ の適用性を検証するために,3 種類の推論方式を比較 し,それぞれの制御特性を明確にする.

# 4.1 制御効果による推論方式の比較 ファジィ制御における推論方式として, Min -Max - Gravity 法, Product – Sum - Gravity 法, 簡略ファジィ推論法の3通りの比較を行った.流 入制御の結果として,都市高速道路本線の渋滞状況の

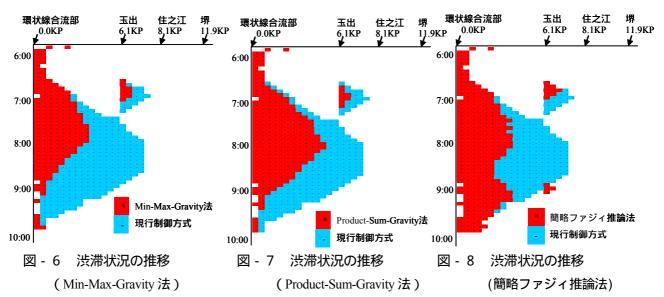
入制御の結果として,都市高速道路本線の渋滞状況の 推移を :図-7および :図-8に示す.また,制 御効果による推論方法の比較を表-1に整理する.

### (1) Min-Max-Gravity 法

3 種類の方法で最も都市高速道路本線上の渋滞緩和効果が高い.しかしながら,入路での待ち時間も長く, 迂回台数も最も多くなっている.これは,渋滞長に関するルールが優先され,待ち台数に関するルールが十分に機能できなかった結果と考えられる.

# (2) Product-Sum-Gravity 法

渋滞状況に関しては,渋滞量は現行制御方式の50% となり最大渋滞長も5.5kmと3.0km削減できている.



539

また,入路での待ち時間,迂回台数ともに,最も低く抑制できている.渋滞長に関するルールだけでなく,待ち時間に関するルールも機能していることがわかる.これは,推論方法の特徴として,各ルールが等価に評価されるため,多様な目標達成に適した方法といえる.(3)簡略ファジィ推論法

各種指標は上記の 2 種類の手法の中間的な制御結果となっている. 渋滞状況の推移では,ピーク時の後半で渋滞緩和効果が少ない. これは渋滞長の変化量が負となる場合のルールの評価が十分でないためと考えられる. ただし,後件部の値を調整することによって,制御効果が発揮される可能性は十分あるといえる.

# 4.2 制御特性と問題点の整理

ここでは,直接の制御結果である流入交通量の推移から,それぞれの制御特性を明確にし,問題点を整理していく.3種類の流入交通量の推移を図-9に示す.

簡略ファジィ推論方式については,流入交通量が 頻繁に上下しており,不安定な制御結果となっている. これは,後件部のファジィ性がないことに起因しており,この方式を利用する場合には,制御の安定性の面から,ルールセットの再構成の必要であるといえる.

一方, Min-Max-Gravity 法と, Product-Sum-Gravity 法については,渋滞延伸していく段階では,安定した制御になっている.後半の渋滞が緩和していく段階において,両推論方法ともに,流入交通量の変化量に上下動がみられる.最大の変化量は, Min-Max-Gravity 法が大きく 177 台となっており, Product-Sum-Gravity 法の 74 台の 2 倍程度の変化がみられる. Product-Sum-Gravity 法では,よりなめらかな制御が実現できており,実用的な流入調整方法としても適用性が高いといえる.

# 5. おわりに

本研究では,高度情報化する都市高速道路の交通制御として,「流入調整型のファジィ制御」を導入することにより,現実的な多目標制御の達成を意図している。本研究の成果は以下のように整理できる.

流入制御手順をファジィ推論で記述することにより、知識利用型の現実的交通制御が定式化可能となった.これは多目標制御のルール形式の運用に対応する.代表的な推論形式について、知識利用面から特徴が整理された.ここでは、product-sum-gravity型のファジィ推論が実用面から推奨できる.

表 - 1 制御効果による推論方式の比較

		Min-Max -Gravity法	Product -Sum -Gravity法	簡略 ファジィ 推論法
総走行時間	(台·時)	3231	3499	3665
総待ち時間	(台·時)	1203	741	1010
計	(台·時)	4434	4241	4676
平均旅行時間	(分)	14.0	15.1	15.9
平均待ち時間	(分)	5.2	3.2	4.4
計	(分)	19.2	18.3	20.2
総渋滞量	(km·時)	4.1	6.2	6.7
総走行台キロ	(台·km)	133780	134863	134811
	堺	9091	9248	9027
流入交通量	住之江	2266	2261	2319
(台)	玉出	2471	2402	2517
	計	13828	13911	13863
迂回台数	(台)	1057	920	1012
迂回走行時間	(台·時)	572	491	562

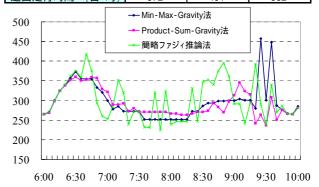


図 - 9 流入交通量の推移

現行制御方式と比較して,ファジィ制御方式は本線上の交通制御効果の面から有効性が高い、それぞれの推論形式の特徴を反映した制御パターンが得られる.

今後の課題としては,新規知識の蓄積により複合的 制御が可能であるファジィ制御の特長を活かした,よ り現実的な制御規定要因の抽出が挙げられる.

最後に本研究は、平成15年度科学研究費補助金若手研究(B)15760395の研究成果の一部であることを付記する.

### 【参考文献】

- 1) 秋山 孝正, 佐佐木 綱: ファジィ流入制御モデルを用いた交通制御方法の評価と検討, 土木学会論文集, 第413号/・12, pp77-86, 1990.
- Masashi Okushima, Yoshiharu Takihi, Takamasa Akiyama: Fuzzy Traffic Controller in Ramp Metering of Urban Expressway, Journal of Advanced Computational Intelligence & Intelligent Informatics, Vol.7/No.2, pp.207-214, 2003.
- 3) 水本雅晴: ファジィ制御の改善法 ( ) (代積法 加算 重心法による場合), 第 6 回ファジィシステムシンポ ジウム講演論文集, pp. 9-13, 1990
- 4) 奥嶋政嗣,大窪剛文,大藤武彦:都市高速道路における 交通管理施策評価のための交通シミュレーションシス テム開発,土木計画学研究・論文集, Vol. 20, No. 3, pp. 531-538, 2003.

### 【問い合わせ先】

〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1 岐阜大学工学部社会基盤工学科 奥嶋 政嗣 TEL 058-293-2446 FAX 058-230-1528 E-mail: okushima@cc.gifu-u.ac.jp

## ユーザタイプ推定のための時変な混合比率をもつ状態空間モデル

State space model with time-varying mixing weight to estimate user type

百留 貴弘 馬場 宏 生駒 哲一 Takahiro Hyakudome Hiroshi Baba Norikazu Ikon

Norikazu Ikoma Hiroshi Maeda

九州工業大学 工学部

Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

**Abstract:** We propose a state space model with time-varying mixing weight to estimate user type. Estimating time-varying mixing weight is equivalent to the user type estimation in our context. Assume that mixing weights are according to Dirichlet distribution, we define system equation with parameters of Dirichlet distribution changing smoothly based on random walk. We define observation equation in which user's property of performance is according to mixture model with time-varying mixing weight. Then we form state space model with time-varying mixing weight, and we can estimate user type by proceeding state estimation. To cope with non-Gaussian property in proposed model, we use particle filters for the state estimation. Numerical simulation of user type estimation verifies availability of proposed model. User type estimation with respect to browsing operation for cellular phone is reported.

**Key words:** state space model, mixture model, time-varying mixing weight, particle filters.

## 1. はじめに

コンピュータの小型化,高性能化に伴い,コンピュータは様々な製品に組み込めるようになり,製品を高機能化できるようになった.製品の高機能化は便利であるが,その反面,操作が複雑となり,高齢者や操作に精通していないユーザなどには,機能を十分に使いこなせないという問題が生じる.そのようなユーザには,ユーザの要望に応じて製品の側が適応する機能が有用であると考えられる.このような機能はユーザ適応と呼ばれ,インタフェースに対してユーザ適応機能を取り入れた研究がある[6][7].

最も基本的なユーザ適応の方法としては、個々のユーザに応じて、製品の(可変な)設計パラメータを変更することが考えられる. しかし設計パラメータは一般に高次元であるため、その推定は難しく、また設計パラメータが最適値に収束するまでにはユーザの長い間の操作が必要となる.

これらの問題を解決する方法として、ユーザにタイプを想定し、タイプに基づいてユーザ適応を行う方法が提案されている[5]. そこでは、ユーザ適応に先立って、ユーザ母集団の操作特性に基づきユーザタイプを抽出しておく.ユーザ適応を行うためには、ユーザの各タイプへの所属度を推定するだけでよく、ユーザ適応のための計算が簡潔であるという利点がある.また、[6]では、ユーザタイプの概念を用いて、ユーザ適応インタフェースを実現する方法が提案されている. そこでは、予めタイプ毎に最適インタフェースを用意しておく. ユーザ適応時には、現在インタフェースを操作しているユーザの各タイプへの所属度の推定結果で、各タイプの最適インタフェースを重み付けし、表示インタフェースを構成する.

本稿では、ユーザ適応時における、ユーザタイプ 推定のための時変な混合比率をもつ状態空間モデル を提案する.混合比率の時間的に滑らかな変化を記 述するため、混合比率の分布にディリクレ分布を仮 定し、ディリクレ分布のパラメータの滑らかな変化 をシステム方程式で定義する.そして観測されるユ ーザの操作特性が、時変な混合比率をもつ混合分布 モデルに従うことを観測方程式で定義する. 状態推定により時変なディリクレ分布のパラメータを推定し、これにより時変混合比率を得ることでユーザタイプが推定される.この際、ユーザ適応に先立って、ユーザ母集団の操作特性に基づき、混合分布モデルを推定することにより、ユーザタイプを抽出しておくものとする.

本稿では、まず2章にてユーザタイプの抽出方法について述べ、次に3章にてユーザタイプ推定のための時変混合比率モデルについて述べる. 4章ではモンテカルロフィルタによる状態推定の方法を述べる.5章では、まず提案モデルの検証として、数値シミュレーションを行う.次にユーザタイプ推定の検証実験として、携帯電話でのWebブラウジング操作実験について報告する.そして6章でまとめと今後の課題について述べる.

## 2. 混合分布モデルによるユーザタイプの抽出

ユーザへ提示する情報などのユーザへの入力を $\mathbf{x}$ と表し、速さ、正確さ、および訂正度などの項目から成るユーザの操作特性を $\mathbf{y}$ と表す。ユーザ母集団の操作特性データから、混合分布モデルを推定することを、ユーザタイプの抽出と呼ぶ。各タイプの操作特性を、 $\theta_j$ をパラメータとするコンポーネント分布

$$f_{i}(\mathbf{y} \mid \mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_{i}) \tag{1}$$

で表し、ユーザ母集団の操作特性を、混合分布モデル

$$f(\mathbf{y} \mid \mathbf{x}, \mathbf{w}, \Theta) = \sum_{j=1}^{p} w_j f_j(\mathbf{y} \mid \mathbf{x}, \Theta_j)$$
 (2)

で表す. ここで

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$$
 (3)

はコンポーネント分布のパラメータ集合で、また

$$\mathbf{w} = [w_1, w_2, \cdots, w_n]^T \tag{4}$$

は混合比率をベクトル表記したものである. 混合比率は、制約

$$\sum_{j=1}^{p} w_{j} = 1, \quad w_{j} \ge 0 \qquad (j = 1, 2, \dots, p)$$
 (5)

を満たす.

ユーザタイプの抽出は、ユーザ母集団の操作特性データにて各ケースのタイプが既知の場合には、タイプ毎にデータを分け、コンポーネント毎に分布のパラメータを推定することができる。各ケースのタイプが未知の場合には、EMアルゴリズム[1][3]などの教師なし学習法により混合分布モデルを推定する。

## 3. 時変混合比率モデル

混合比率の分布にディリクレ分布を仮定し、ディリクレ分布のパラメータを推定することで近似的に混合比率を推定する方法が提案されている[2]. これを時変の場合に拡張し、時変混合比率モデルを提案する.

時変な混合比率と,ディリクレ分布のパラメータ を,それぞれ

$$\mathbf{W}_{k} = [w_{1}(k), w_{2}(k), \cdots, w_{n}(k)]^{T}$$
(6)

$$\mathbf{\alpha}_{k} = [\alpha_{1}(k), \alpha_{2}(k), \cdots, \alpha_{p}(k)]^{T}$$
(7)

と表す. ディリクレ分布のパラメータは、制約

$$\alpha_{j}(k) > 0 \quad (j = 1, 2, \dots, p) \tag{8}$$

を満たす.

システム方程式にて、 $\alpha_k$ の時間的に滑らかな変化を、ランダムウォークモデルを用いて表す. ただし、式(8)の制約を満たすよう、対数変換を用いる.

$$\log \boldsymbol{\alpha}_{k} = \log \boldsymbol{\alpha}_{k-1} + \boldsymbol{v}_{k}, \quad \boldsymbol{v}_{k} \sim N(\boldsymbol{0}, \boldsymbol{R})$$
 (9)  
ここで  $\boldsymbol{R} = diag(\sigma^{2})$  である. 以降, 簡単のため 
$$\log \boldsymbol{\alpha}_{k}$$
 を単に  $\boldsymbol{\alpha}_{k}$  と表すことにする.

観測方程式では、ユーザの操作特性 $\mathbf{y}_k$ が時変な混合比率モデルに従うことを表す.

$$\mathbf{y}_{k} \sim \iint f(\cdot \mid \mathbf{x}_{k}; \mathbf{w}_{k}, \Theta) p(\mathbf{w}_{k}; \mathbf{\alpha}_{k}) p(\mathbf{\alpha}_{k}) d\mathbf{w}_{k} d\mathbf{\alpha}_{k}$$
(10)

実際の状況では、ユーザの操作特性データの項目の一部に、欠損のあることが考えられる. その際には、 観測された項目の周辺分布を用いるものとする.

## 4. モンテカルロフィルタによる状態推定

時変なディリクレ分布のパラメータを推定し、混合比率を得ることで、ユーザタイプを推定する.式(9)のシステム方程式と式(10)の観測方程式から状態空間モデルを構成し、状態推定を行うことで時変なディリクレ分布のパラメータを推定する.状態推定とは、観測データ系列が与えられた下での状態の事後分布を推定することである.観測されたユーザの操作特性データ系列を

$$\mathbf{y}_{1:k} = [\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \cdots, \mathbf{y}_k] \tag{11}$$

と表す.ここでの状態推定とは,時変なディリクレ分布のパラメータの事後分布  $p(\mathbf{a}_k | \mathbf{y}_{1k})$  を推定することである.観測方程式(10)に非ガウス性があるため,状態推定には非ガウス型フィルタの一種であるモンテカルロフィルタ[4]を用いる.

モンテカルロフィルタでは、「一期先予測粒子の生

成」,「尤度計算」,「リサンプリング」の3つの手続きにより,事後分布を近似する粒子を逐次的に生成する.

## 一期先予測粒子の生成

一期前の粒子群 $\{m{a}_{k-1}^{(i)}\}_{i=1}^N \sim p(m{a}_{k-1} \mid \mathbf{y}_{1:k-1})$ は既に与えられている。各粒子をシステム方程式に従い推移させる

$$\widetilde{\boldsymbol{\alpha}}_{k}^{(i)} = \boldsymbol{\alpha}_{k-1}^{(i)} + \mathbf{v}_{k}^{(i)}$$
,  $\mathbf{v}_{k}^{(i)} \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{R})$   $(i = 1, 2, \dots, N)$ . (12) こうして得られた粒子群 $\{\widetilde{\boldsymbol{\alpha}}_{k}^{(i)}\}_{i=1}^{N}$ は, 近似的に一期先予測分布 $p(\boldsymbol{\alpha}_{k} | \mathbf{y}_{1:k-1})$ に従う.

## 尤度計算

各粒子の尤度を計算する

$$l_k^{(i)} = p(\mathbf{y}_k \mid \widetilde{\boldsymbol{\alpha}}_k^{(i)}) \quad (i = 1, 2, \dots, N).$$

$$\mathcal{Y} + \mathcal{Y} \mathcal{Y} \mathcal{Y} \mathcal{Y} \mathcal{Y} \mathcal{Y}$$
(13)

尤度に比例した確率で粒子をリサンプリングすることにより、事後分布  $p(\mathbf{\alpha}_k \mid \mathbf{y}_{lk})$  に従う粒子群  $\{\mathbf{\alpha}_k^{(i)}\}_{i=1}^N$  を得る

$$\boldsymbol{\alpha}_{k}^{(j)} = \begin{cases} \widetilde{\boldsymbol{\alpha}}_{k}^{(1)} & \text{with prob } l_{k}^{(1)} / \sum_{i=1}^{N} l_{k}^{(i)} \\ \vdots & \vdots \\ \widetilde{\boldsymbol{\alpha}}_{k}^{(N)} & \text{with prob } l_{k}^{(N)} / \sum_{i=1}^{N} l_{k}^{(i)} \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, N) .$$

得られた粒子群から、混合比率の期待値を計算するには

$$\hat{\mathbf{w}}_{k} = \int \mathbf{w}_{k} p(\mathbf{w}_{k} | \mathbf{y}_{1:k}) d\mathbf{w}_{k}$$

$$= \int \int \mathbf{w}_{k} p(\mathbf{w}_{k} | \mathbf{\alpha}_{k}) p(\mathbf{\alpha}_{k} | \mathbf{y}_{1:k}) d\mathbf{\alpha}_{k} d\mathbf{w}_{k}$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \int \mathbf{w}_{k} p(\mathbf{w}_{k} | \mathbf{\alpha}_{k}^{(i)}) d\mathbf{w}_{k}$$
(15)

となり、積分はディリクレ分布の期待値なので

$$\hat{w}_{j}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{\alpha_{j}^{(i)}(k)}{\sum_{l=1}^{p} \alpha_{l}^{(i)}(k)} \qquad (j = 1, 2, \dots, p) \quad (16)$$

を得る.

### 5. 実験

#### 5.1 数値シミュレーション

提案した時変混合比率モデルの有効性を確認するために、次の数値シミュレーションを行った。混合分布モデルのコンポーネント数を 3 とし、各コンポーネントの分布はそれぞれ  $N_j(\mu_j,\sigma_j^2)$  の正規分布に従うものとする。表 1 に、各コンポーネント分布のパラメータを示す。

表 1 コンポーネント分布のパラメータ

j	$\mu_j$	$\sigma_j^2$
1	2.0	0.2
2	4.0	0.1
3	6.0	0.4

各コンポーネント分布から 50 個ずつデータを生成し、それらを、j=1、2、および 3 の順序で並べて構成したものをシミュレーションデータとする.

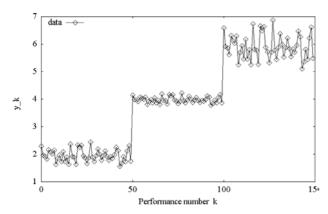
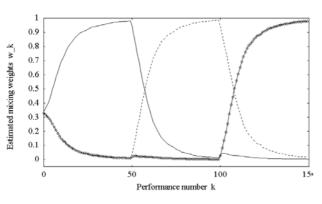


図1 シミュレーションデータ



Type-1 — Type-2 ····· Type-3 → 図 2 ユーザタイプの推定結果

図1にシミュレーションデータを示す.

このシミュレーションデータについて、ユーザタイプの推定を行った。図2にユーザタイプの推定結果を示す。図2を見ると、各区間において、混合比率が最大となったタイプと、シミュレーションデータを生成したコンポーネントとが一致しており、ユーザタイプが正しく推定できていることが分かる。

### 5.2 携帯電話での Web ブラウジング操作実験

実機実験として,携帯電話での Web ブラウジング 操作について,ユーザタイプ推定の検証実験を行う. 携帯電話での Web ブラウジングは,現在一般に普及 しているが,高齢者や初心者などにとっては,必ず しも容易ではないという現状がある.そこで,ユー ザタイプに基づいたユーザ適応が有用であると考え られる.

## 5.2.1 実験環境

図 3 に実験環境の概略を示す.実験環境は, $i-\alpha$  ppli\*の Web ブラウザを起動するエミュレータ,そのエミュレータを動作させるパソコン,およびエミュレータを操作するための入力装置から構成される. Web ブラウジングするサイトとして,複数のコンテンツから構成される模擬的 Web サイトを用意した.

Web ブラウジング操作におけるユーザの操作特性 として、速さに着目し、 $y_1$ 「スクロールキー入力平

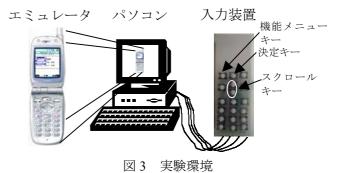




図4 高齢者カテゴリを模擬した被験者の実験風景

均時間間隔」, $y_2$ 「決定キー入力平均時間間隔」, $y_3$ 「機能メニュー利用頻度」を測定する.

## 5.2.2 ユーザカテゴリ

ユーザカテゴリとして(1)初心者,(2)高齢者,および(3)熟練者を想定する.実験では,高齢者と初心者の実際の参加が困難であるため,老化擬似体験器具を部分的に用いて,初心者と高齢者のカテゴリの特性を模擬する.図4に高齢者カテゴリを模擬した被験者の実験風景を示す.

## 5.2.3 ユーザタイプの抽出

ユーザ母集団の操作特性データを採取するために、10 名の被験者について、各ユーザカテゴリにて、Web サイトブラウジングのタスクを5回行ってもらい、 $10[人] \times 3[カテゴリ] \times 5[タスク] = 150$  ケースのデータを得た、図5に、得られたユーザ母集団の操作特性データの散布図を示す。

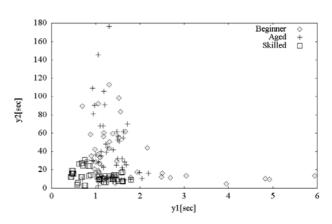


図 5 ユーザ母集団の操作特性データ $(y_1 - y_2)$ 

<sup>\*</sup> i- oppli は NTT ドコモ㈱の商標登録

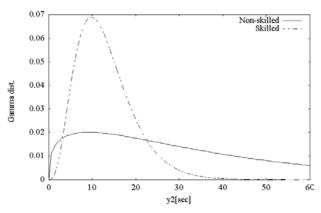


図6推定されたコンポーネント分布(火の周辺分布)

ユーザ母集団の操作特性データから、ユーザタイプの抽出を行った.  $y_2$ に関して、初心者と高齢者との分布が似ていたため、ユーザタイプを非熟練者((1)初心者と(2)高齢者)と、熟練者の2つと見なして、データをタイプ毎に分け、それぞれのコンポーネント分布を推定した。コンポーネント分布としては、正規分布とガンマ分布を候補とし、このうちガンマ分布の尤度が大きかったので、ガンマ分布を採用した。図6に推定されたコンポーネント分布の密度関数を示す。

## 5.2.4 ユーザタイプの推定

新たに1名の被験者に、Web サイトブラウジングを行ってもらい、各ユーザカテゴリの操作特性データを採取した.各カテゴリのこの操作特性データを、初心者、高齢者、および熟練者の順序で時間順に50個ずつ並べて、カテゴリが変化する操作特性データを構成した.図7に、この操作特性データを示す.

この操作特性データを用いてユーザタイプの推定を行った.図8にユーザタイプの推定結果を示す.図8を見ると、各区間において、混合比率が最大となったタイプと、想定したタイプとが一致しており、ユーザタイプが正しく推定できていることが分かる.

#### 6. おわりに

本研究では,ユーザタイプ推定のための時変な混合比率をもつ状態空間モデルを提案した.そこでは,混合比率が時間的に滑らかに変化することを想定し,

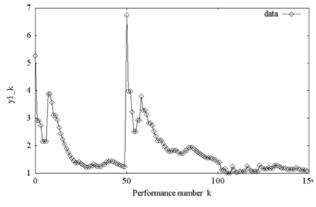
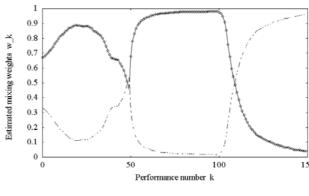


図 7 ユーザの操作特性データ( $v_1$ )



Non-skilled → Skilled · -- 図 8 ユーザタイプの推定結果

時変なディリクレ分布のパラメータを状態推定する ことで時変な混合比率を得て,ユーザタイプを知る ことができる.

ユーザタイプ推定の検証として、数値シミュレーションを行い、提案モデルの有効性を確認した.次に実機実験として、携帯電話での Web ブラウジング操作について提案モデルを適用し、ユーザタイプが正しく推定できることを確認した.

今後の課題として、次が考えられる. 提案したモデルでは、事前の実験で一度抽出したユーザタイプを固定的に用い、タイプ推定を行っている. しかし、タイプ抽出した時と現在とでタイプ自体が変化していることもあり得る. また、タイプ推定されたユーザの操作特性データもタイプ抽出に用いることで、より洗練されたユーザタイプ抽出が可能となると考えられる. そのため、ユーザタイプの推定と更新を同時に行うモデルについて検討することも興味深い.

**謝辞** 本研究は統計数理研究所共同利用研究(15-共研-2017)による.

### 参考文献

- A.Dempster, N.Laird, and D. Rubin: Maximum likelihood estimation from incomplete data via EM Algorithm, *Journal of Royal Society*, Ser.B, Vol.39, pp.1-38 (1977)
- [2] A.F.M Smith and U.E. Makov; Quasi-Bayes Sequential Procedure for Mixtures, *Journal of Royal Statistical Society*, Ser.B, Vol.40, No.1, pp.106-112 (1978)
- [3] G.McLachlan, D.Peel: Finite Mixture Models, chapter 2, Wiley Series in Probability and Statistics (2000)
- [4] G.Kitagawa: Monte Carlo filter and smoother for non-Gaussian nonlinear state space model, *Journal of Computational and Graphical Statistics* 5, No.1, pp.1-25 (1996).
- [5] N.Ikoma, W.Pedrycz, K.Baba, T.Hyakudome, Y.Matsumoto, N.Nakamura and H.Maeda: User type identification by mixing weight estimation of mixture models based on state space modeling, Proc. of 2003 IEEE International symposium on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces, and Measurement Systems(VECIMS2003), pp.20-25 (2003).
- [6] T.Hyakudome, N.Ikoma and H.Maeda: An adaptive user interface based on online estimation of time-varying mixing weight of mixture model by particle filters, *Proc. of the AIC on Science* of Modeling, No.17, pp.374-375 (2003)
- [7] 森田順,馬場惠子,生駒哲一,前田博:「インテリジェント 車椅子におけるユーザ適応型インタフェースの開発」,第 17回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp.253-256 (2001)

#### 連絡先

〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1 番 1 号 九州工業大学 工学部 生駒 哲一(ikoma@comp.kyutech.ac.jp)

# トレンド、周期変動および AR の特徴を抽出する 状態空間モデルによる SINET トラヒック系列の成分分解

Decomposition of Network Traffic Series of SINET by State Space Model to Extract Features of Trend, Periodic, and AR Component

今津 和之†清水 威臣†八名 和夫†生駒 哲一††Kazuyuki IMAZU†Taketomi SHIMIZU†Kazuo YANA†Norikazu IKOMA††法政大学工学部†九州工業大学工学部††

Department of Electronic Informatics, College of Engineering Hosei University†
Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology††

Abstract This paper describes a time series decomposition of the WAN traffic of a university campus IP network utilizing a linear Gaussian state space model. Authors' previous research on a dialup network traffic showed a time series model consists of five components, i.e. two types of trend, two types of periodic and an autoregressive (AR) components, adequately fits to observed data. In this article, the five component model has been applied to a larger scale WAN traffic data of a university IP network with maximum bandwidth 20 Mbps. The data analysis revealed that the model fits equally well to the data. The component analysis enables to characterize the statistical properties of the network traffic and will be useful in a large scale network design.

Key Words: state space model, time series decomposition, network traffic

## 1 はじめに

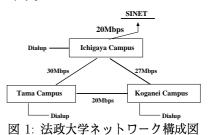
近年、インターネットユーザ数の急増やマルチメディ アの進展に伴い、インターネットの高品質化が重要な課 題となっている。よって高品質かつ効率的なネットワー クアーキテクチャを構築するためにはネットワークトラ ヒックの統計的性質を明らかにする必要がある。そこで 本論文では、ネットワークトラヒック時系列に成分分解 を施すことで、各成分の特徴を抽出し、ネットワークの 管理・設計をする上で考慮しなければならないトラヒッ クの統計的性質を明らかにする。筆者らはすでにダイア ルアップトラヒック時系列に対し状態空間モデルを用い 種々の成分分解を試み、対数トラヒック時系列が2つの トレンド、2つの周期変動及び自己回帰(AR)成分から なるとする成分構成モデルが妥当であることを報告して いる [4]。本論文では、学術ネットワークである SINET(ScienceInformationNetwork) の WAN トラヒック時 系列を対象に線形ガウス型状態空間モデルを適用し、特 徴的な成分への分解を行った結果を報告する。

## 2 データ

ネットワークトラヒックとは、人がアプリケーションを用いてネットワークに対して応答を要求することにより生ずる情報の流量のことである。これは要求に対する応答であるため、要求の種類により異なったトラヒックが現れる。またユーザが個々に発生させたトラヒックは複合して観測される為、個々のユーザの挙動をモデル化し、全体を記述することは現実的には不可能で、統計的な扱いが必要である。そしてユーザの利用は時間帯や曜日により周期性等の特定の傾向を持っているので、これ

らに着目するのは解析上有効である。

本論文ではネットワークトラヒックの実測として法政 大学のネットワーク構成図 (図1) で示されるトップルー タから上位ネットワークである SINET への接続で観測 されるトラヒックに注目した。対象とするトラヒック時 系列はSNMP(SimpleNetworkManagementProtcol)によって計測される5分毎の平均トラヒック時系列であ るが、計測時に飽和する点が生じたので、飽和する点を 両端の平均に置き換えた。また取得期間は2001年5月28 日(月)から7月8日(日)までの6週間分である。ダイア ルアップトラヒック系列[4]にもいえることだが、図2, 図3より、ネットワークトラヒック時系列の特徴として 長期的または短期的な2つのトレンド成分、また週内の 曜日ごとに変動する曜日項成分と1日における日内変動 成分の2つの周期変動成分、および定常AR成分といっ た特徴を抽出できると考えられる。よって本論文ではこ れらに分解できるモデルを提案する。また提案するモデ ルの便宜上、図2に示す原系列の1時間分データ(12点) の算術平均をとり、これを1時刻データとし、さらに各 時刻に対して対数をとったトラヒック系列を解析系列と して図4に示す。



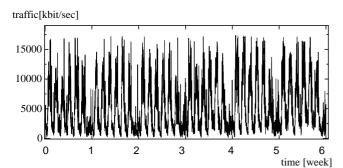


図 2: SINET トラヒック原系列 6週間

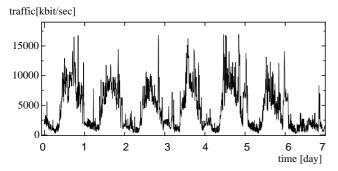


図 3: SINET トラヒック原系列 第1週目

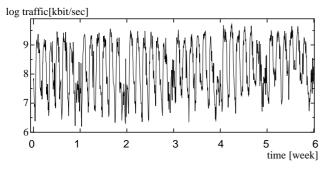


図 4: SINET トラヒック解析系列 6週間

## **3** モデル

図2のトラヒック系列の特徴より、式(1)に我々の提案するモデルを示す。

$$y_k = T_k + t_k + d_k + s_k + p_k + w_k \ w_k \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

ここで y は対象となる時系列、 T は数日に渡る長期的トレンド成分、 t は数時間に渡る短期的トレンド成分、 d は週内の曜日ごとに変動する曜日項成分、 s は 1 日における日内変動成分、 p は定常 AR 成分、 w は観測ノイズ、添字 k は時間を表す。また時間において、K = [k/24] として k は 1 時刻を表し K は 1 日を表すものとする。以下では、それぞれの成分において提案したモデルを説明する。

#### 1) T: 数日に渡る長期的トレンド成分

数日に渡る長期的トレンド成分は、 同じ日の間は一定値 とし、日にちが変わる際に滑らかさを考慮する制約を課 す。

$$\begin{cases}
\nabla^{L_T} T_K \sim N(0, \tau_T^2) \\
T_k = T_k - 1 & \text{for } k \neq (mod 24)
\end{cases}$$
(2)

ここで  $\nabla$  は、  $\nabla T_K = T_K - T_{K-1}$  として数日に渡る時間偏差を表す。  $L_T$  はトレンドの階差を表し、本稿では階差  $L_T=1$  または  $L_T=2$  とした。

## 2) t: 数時間に渡る短期的トレンド成分

数時間に渡る短期的トレンド成分は、時間が変わる際  $(L_t+1)$  に滑らかさを考慮する制約を課し、次のように定義した。

$$\tilde{\nabla}_{\alpha}^{L_t} t_k \sim N(0, \tau_t^2) \tag{3}$$

ここで  $\tilde{\nabla}_{\alpha}^{L_t}$  は時間差分オペレータを表し、すなわち  $\tilde{\nabla}_{\alpha}t_k=t_k-\alpha t_{k-1}$  である。  $\alpha$  は  $E\{t_k\}=0$  にすること によって t と T の間を同じように滑らかにするためのパラメータであり、  $0<\alpha\leq 1$  とする。また  $L_t$  はトレンドの階差を表し、本論文では階差  $L_t=1$  または  $L_t=2$  とした。

#### 3) d: 週内における曜日項成分

週内における曜日項成分は1日を単位とし、日にちが変 わる際に周期性を持つ制約を課し、次のように定義した。

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{6} d_{K-i} \sim N(0, \tau_d^2) \\ d_k = d_{k-1} & \text{for } k \neq (mod24). \end{cases}$$
(4)

#### 4) s: 日内変動成分

日内変動成分は、1日を周期とし、1周期の和がほぼ0 に等しいという制約を課し、次のように定義した。

$$\sum_{i=0}^{23} s_{k-i} \sim N(0, \tau_s^2). \tag{5}$$

## 5) p: 定常 AR 成分

定常 AR 成分は次のように定義した。本稿では AR 成分 の次数を 1 または 2 とした。

$$p_k = \sum_{i=1}^m a_i p_{k-i} + v_k, \quad v_k \sim N(0, \tau_a^2).$$
 (6)

式 (1) を観測方程式、式 (2),(3),(4),(5) および (6) からシステム方程式を構成することで、線形ガウス状態空間モデルとして表現することができる。また状態空間モデルの各ノイズの分布が正規分布に従うので、カルマンフィルタにより状態推定を行うことでトラヒック時系列を上述した成分に分解することができる。ここで観測ノイズの分散  $\sigma^2$ 、システムノイズの分散  $\tau_T^2, \tau_t^2, \tau_d^2, \tau_s^2, \tau_a^2$  や、減衰係数  $\alpha$ , 定常 AR 成分の次数をパラメータ  $\theta$  とし、各制約が満たされる程度を調整する。

表 1: 各モデルにおける対数尤度  $l(\hat{\theta})$ 

$L_T$	$\mathcal{L}_t$	AR	対数尤度 $l(\hat{ heta})$
1	1	1	-383.18
1	1	2	-384.98
1	2	1	-383.30
1	2	2	<u>-347.40</u>
2	1	1	-380.99
2	1	2	-361.66
2	2	1	-380.49
2	2	2	-362.47

## 4 パラメータ推定

トラヒック時系列の成分分解は、最適なパラメータ  $\theta$  を用いて行う。最適なパラメータ  $\theta$  の推定は、  $\theta$  に関する対数尤度  $l(\hat{\theta})$  が最大となるものを用いる。尤度を目的関数とする準ニュートン法などの数値最適化を用いることもできるが、本稿では簡便な方法であるグリッドサーチ法を用いて、対数尤度が最大となるパラメータの組合せを推定した。各パラメータの候補値として  $\sigma^2$  を  $\{10^0,10^{-1},10^{-2},10^{-3}\}$ 、  $\tau_T^2,\tau_t^2,\tau_d^2,\tau_s^2$  および  $\tau_a^2$  を  $\{10^0,10^{-1},10^{-2},10^{-3},\dots,10^{-6},10^{-7},10^{-8},10^{-9}\}$ 、 $\alpha$  を  $\{0.1,0.2,0.3,\dots,0.7,0.8,0.9\}$ ,および AR 係数を  $\{-10^0,-10^{-1},-10^{-2},\dots,0,\dots,10^{-7},10^{-8},10^{-9}\}$  とした。以上の組み合わせを用いて、各モデルごとに対数尤度を最大とするときの各パラメータ  $\theta$  を推定する。

## 5 推定結果と考察

グリッドサーチによる各モデルの推定結果を表1に示 す。表 1から、階差  $L_T = 1$ ,  $L_t = 2$ , AR 次数 = 2 の モデルが今回の解析系列に対して最適なモデルだといえ る。この時、推定された超パラメータの値は、 $\sigma^2 = 0.1$ ,  $\tau_T^2 = 10^{-5}, \tau_t^2 = 10^{-3}, \tau_d^2 = 10^{-4}, \tau_s^2 = 10^{-4}, \alpha = 0.6$  $\tau_a^2 = 0.1, a_1 = 0.5, a_2 = -0.5$  となった。ろ波、平滑化 による状態推定結果を図5,図6に示す。平滑化の推定結 果において、Tは数日に渡る長期的トレンド成分の特徴 を抽出し、 t は数時間に渡る短期的トレンド成分の特徴 を抽出しているといえる。 d は週内における曜日効果成 分として特徴を抽出していて、とくに顕著な特徴として 日曜日の利用頻度が少ないことが確認できる。またsは 日内変動成分として特徴が抽出していて、特徴として夜 間にくらべて昼間の利用が多いことが確認できる。これ らの特徴は大学内のネットワークの利用状況に合致して いるとみなせる。 p は定常 AR 成分としてランダムな変 動抽出している。

## 6 おわりに

本論文では、筆者らの成分構成モデル [4] をより大規 模な法政大学 SINET トップルータの WAN トラヒック 時系列に適用した結果、ダイアルアップトラヒック時系 列同様、数日に渡る長期的トレンド、数時間に渡る短期 的トレンド、曜日項成分、日内変動成分、定常 AR 成分 の5成分よりなる時系列モデルの妥当性が示された。

また本論文では、状態空間モデルをガウス型に限定して成分分解を行った。しかし、すべての時系列はガウス型の状態空間モデルを用いて成分分解できるわけではない。よって今後は状態空間モデルを非ガウス型の場合に拡張し、モンテカルロフィルタ等の非ガウスフィルタを用いて成分分解を行うことも興味深いと考えられる。

## 参考文献

- [1] H.Akaike: Likelihood and Bayesian procedure, *Bayesian Statistics*, University Press, Valencia, Spain, pp. 143-166(1980).
- [2] G.Kitagawa: A nonstationary time series model and its fitting by recursive filter, Journal of Time Series Analysis, 2, pp.103-116(1981).
- [3] 北川源四郎: "時系列プログラミング", 岩波書店 (1993).
- [4] T.Shimizu, K.Imazu, N.Ikoma and K.Yana, Nonstationary Bayesian time series analysis for network traffic by decomposition model into trend, periodic and AR components, Proc. of the 30th Anniversary of the Information Criterion (AIC) Science of Modeling, Yokohama, Japan, Dec.14-17, pp.408-409 (2003).
- [5] N.Ikoma, T.Shimizu, K.Imazu, and K.Yana, Decomposition of Network Traffic of Dialup Access into Trend and Periodic Components Based on Nonstationary Bayesial Model, Proc. SICE Annual Conference 2003, pp. 359-362, Aug. 2003.
- [6] G.Kitagawa and W.Gersch, "A smoothness priors-state space approach to the modeling of time series with trend and seasonality", Journal of the American Statistical Association, Vol.79, No.386, pp.378-389 (1984)
- [7] G.Kitagawa, "A nonstationary time series model and its fitting by recurve filter", Jornal of Time Series Analysis , 2, pp.103-116(1981)

#### [間い合わせ先]

〒 184-8584 小金井市梶野町 3 丁目 7 番 2 号 法政大学工学部 電子情報学科 八名研究室 八名 和夫 (やな かずお)

TEL: 042-387-6214 FAX: 042-387-6214 E-mail: yana@k.hosei.ac.jp

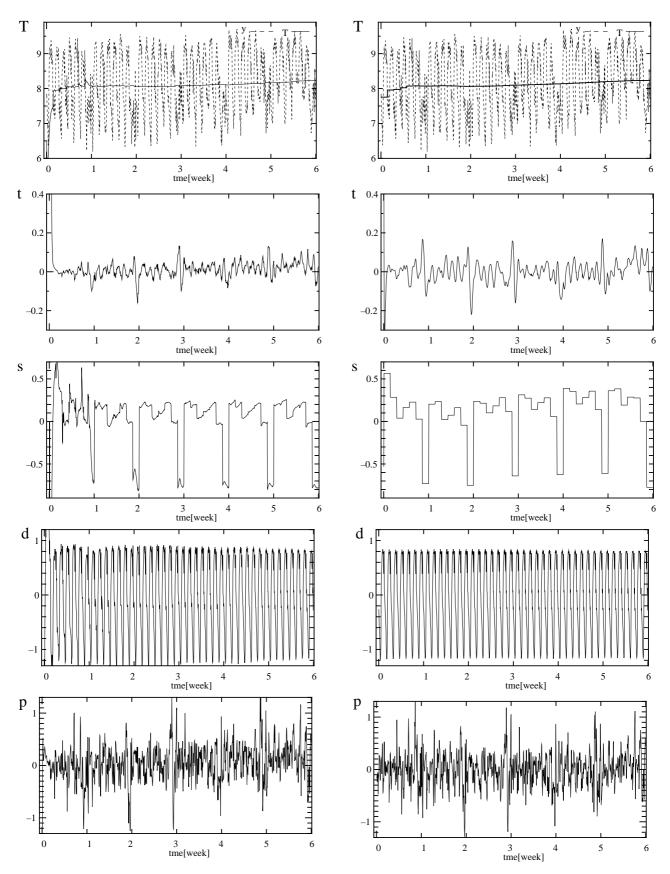


図 5: 成分分解結果(ろ波)

T: 長期的トレンド成分 t: 短期的トレンド成分 s: 曜日項成分 d: 日内変動成分 p: 定常 AR 成分

図 6: 成分分解結果 (平滑化) T: 長期的トレンド成分 t: 短期的トレンド成分 s: 曜日項成分 d: 日内変動成分 p: 定常 AR 成分

# 状態空間モデルによる飲食店売上時系列の要因分解

Decomposition of daily sales of a restaurant based on the state space modeling

山口 類

Rui Yamaguchi 九州大学

Kyushu University

土屋 映子

Eiko Tsuchiya

東京工業大学

Tokyo Institute of Technology

樋口 知之

Tomoyuki Higuchi

統計数理研究所

Institute of Statistical Mathematics

Abstract: Sales of catering establishments vary day by day, because they are affected by various factors: The day of the week, national holidays, weather, events taking place near the site, etc. Therefore, it is useful to construct a model decomposing a time series of the sales into such factors. Such a model will allow us to predict future sales with good accuracy and extract useful knowledge in order to plan various management strategies such as purchasing, staff assignments, new store openings, etc. In this study, we propose a prediction method for the daily sales of a catering establishment based on a state space model framework in which an optimal model is selected by an information criterion; we then apply it to 2-year daily sales data of a restaurant that is adjacent to a large-scale convention center and office buildings.

## 1 はじめに

1990年代から続く日本における不況の下,あらゆる産業において,業務の効率化が求められ,限られた資金,資源を集中させ効果を上げるためにも,マーケティングの重要性が増している.その重点は,近年の市場の成熟化,消費者の好みの多様化に対応するために,従来型の不特定多数を対象としたマスマーケティングから,対象とする集団をより明確にし,それぞれに個別の対応を考えるマイクロマーケティン

グ,更には,個人を対象とする One-to-One マーケティングへと移ってきている $^{1-3}$ .このようなマーケティングが可能になった背景には,情報技術の発展により POS データ,スキャンパネルデータなどの,詳細情報を含んだデータを,大量に利用することができるようになったことが挙げられる $^1$ .

外食業界においても,チェーン展開する飲食店で, 例えば,地域限定メニューを用意するなど,各地域 の実情に合わせたきめ細かいサービスが行われ,従 来の画一的な経営からの脱却が図られつつある.飲 食店の日々の売り上げは,曜日、祝日,天気,近所 での催し物への人出等の様々な要因に左右されるが 当然その影響の程度は店舗ごとによって異なる、そ こで,各個店の売上時系列データをこれら各要因成 分に分解するモデルを構成し,そのモデルに基づい て,店舗固有の情報や知識を抽出し,将来の売上を 精度良く予測しすることができれば,それは仕入れ, 人員配置,新規出店計画等,様々なレベルにおける 経営戦略立案上有益であることは想像に難くない.

本研究では,状態空間モデルの柔軟な表現力と情 報量規準によるモデル評価を利用した売り上げ予測 手法を提案し、実際に、ある大規模催事場及びビジ ネス街に隣接した飲食店の二年間分の日々売り上げ データに応用し各要因への分解および予測を行った。

## モデル

を示す<sup>4</sup>.

本研究は飲食店の売上時系列データとしてランチ:  $y_{1,n}$  , 宴会:  $y_{2,n}$  , 一日総計:  $y_{3,n}$  の三種類を用い る.また同時に隣接催事場で開かれるイベントへの 予想平均入場者数:  $X_{1,n}$  , 天候:  $X_{2,n}$  , 及び曜日:  $d_n$ の時系列を使用する データの出典は,売上時系列  $y_{i,n}, (i = 1, 2, 3)$  および天候  $X_{2,n}$  については当該飲 食店店長の記載によるものである.またイベントへ の予想平均入場者数  $X_{1,n}$  は,隣接催事場運営会社 が発表する月間催事予定表に記載された,イベント の会期および会期中の延べ入場者見込み数を基とす るものである.これについては2.3で詳しく述べる. 本研究では三種類の売上時系列  $y_{i,n}$ , (i = 1, 2, 3)を説明するために上述したような要因を考慮にいれ、 それぞれモデルを構成した、以下三種の時系列で解 析対象とする売上を $y_n$ と書き,その要因分解モデル

$$y_n = t_n + W_n + R_n + E_n + r_n + \varepsilon_n \,, \tag{1}$$

ここで  $t_n$  は確率差分方程式  $t_n=2t_{n-1}-t_{n-2}+\{eta_2(w_{f \pm,n}-w_n)+eta_3(w_{f \pm,n}-w_n)\}$  は,祝日効果同 また,ここで $N(0,\tau_t^2)$  は平均0,分散 $\tau_t^2$ のガウス分 布を表す. $W_n$  は週周期成分, $R_n$  は雨効果, $E_n$  はイー たものであり,直近の金曜(土曜)の曜日成分  $w_{\hat{\pi},n}$ 

ベント効果成分である. $r_n$  は  $r_n = \sum_{j=1}^2 a_j r_{n-j} + \sum_{j=1}^n a_j r_{n-j}$  $v_{r,n}, v_{r,n} \sim N(0,\tau_r^2)$  の定常 2 次 AR モデルに従 う成分である.AR 項数を 2 次としたことに特に理 由はない.必要に応じて増やすことも可能である.  $arepsilon_n \sim N(0,\sigma^2)$  は残差成分である.以下, $W_n$ , $R_n$ , および  $E_n$  各項のモデルについて詳述する.

## モデル:週周期成分

週周期成分  $W_n$  は以下のように書き表されると仮 定した.

$$W_n = w_n + h_{1n}\beta_1(w_{\Box,n} - w_n)$$
 +  $h_{2n}\{\beta_2(w_{\widehat{\Xi},n} - w_n) + \beta_3(w_{\pm,n} - w_n)\}(2)$  ここで第一項  $w_n$  は周期 7 の季節成分モデル<sup>5</sup>

$$\sum_{j=0}^{6} w_{n-j} = v_{w,n}, \quad v_{w,n} \sim N(0, \tau_w^2)$$
 (3)

によって表される曜日成分である.この頃は週の基 本パターンを表す. 文献6-8らはスーパーマーケット における,日次店頭スキャナーデータを,上記の基本 パターン項,トレンド成分,説明変数項に分解するモ デルを構成し値引き販促活動と売上の関係について 考察している . 第二項は当日が祝日かつ月~金曜だっ た時の効果 (祝日効果)であり,  $h_{1n} \in \{0,1\}$  はその indicator function (表1参照).  $\beta_1(w_{\mathsf{H},n}-w_n)$  は 祝日の売上は日曜の売上パターンに似ているであろ うという期待をモデル化したものであり,直近の日 曜の曜日成分 $w_{\mathsf{H},n}$ 及び当日の曜日成分 $w_n$ の差と類 似度を示す係数  $0 \le \beta_1 \le 1$  との積で表される.もし  $\beta_1=0$  ならば祝日の週周期成分は  $W_n=w_n+0$  とな リ平日の曜日成分で表される.一方  $eta_1=1$  ならば祝 日の週周期成分は $W_n = w_n + (w_{\mathsf{H},n} - w_n) = w_{\mathsf{H},n}$ となり直近の日曜の曜日成分で表される、第三項は 祝日の前日の効果 ( 祝前日効果 ) を示しており  $h_{2n} \in$  $\{0,1\}$  はその indicator function である(表1参照).  $v_{t,n},\ v_{t,n}\sim N(0, au_t^2)$  に従うトレンド成分である $^5$  . 様に祝前日の売上パターンは金曜および土曜の売上 パターンに似ているだろうという期待をモデル化し

 $(w_{\pm,n})$  及び当日の曜日成分との差と各曜日の祝前日 効果への寄与度と類似度を示す係数  $0\le\beta_2,\beta_3\le 1$  の積で表される.ただし  $\beta_2$ , $\beta_3$  は  $\beta_2+\beta_3\le 1$  を満たす.

## 2.2 モデル:雨効果

雨効果  $R_n$  は天候による売上への影響をモデル化したものであり,次式のものを仮定した.

$$R_n = \gamma_R f_R(X_{2,n}) \tag{4}$$

 $\gamma_R$  は金額を示す係数であり, $f_R(X_{2,n})$  は図 1 に示すように天候: $X_{2,n} \in \{1,2,3,4,5\}$ (晴,曇,雨,大雨,雪)によってその効果の大きさが変わることを示す関数である.この関数の形に特に根拠は無い.

## 2.3 モデル:イベント効果

イベント効果  $E_n$  は隣接する催事場で開催されるイベントへの人出  $X_{1,n}$  による効果をモデル化したものであり次式のようになるとした.

$$E_n = \alpha_{B,n} f_B(X_{1,n}) + I(f_B(X_{1,n}))(\alpha_w f_w(d_n) + h_{3n} \alpha_h)$$
(5)

第一項はイベントがある際の基本(Basic)となる項であり予想平均入場者数  $X_{1,n}$  の非線形関数  $f_B(X_{1,n})$  と時変係数  $\alpha_{B,n}=\alpha_{B,n-1}+v_B,\ v_B\sim N(0,\tau_B^2)$  の積で表した. $f_B(X_{1,n})$  はある閾値  $X_{Eve}$  から効果が現れ,ある程度以上の人出では頭打ちになる様子をモデル化した次式で表した.

$$f_B(X_{1,n}) = \begin{cases} \frac{g(X_{1,n})}{\max\{g(X_{1,n})\}} & X_{1,n} \ge X_{Eve} \\ 0 & X_{1,n} < X_{Eve} \end{cases}$$
(6)

ただし,

$$g(X_{1,n}) = 1 - \exp\{-a(X_{1,n} - X_{Eve})\}$$
 (7)

(図2参照). ここで注意を要するのは,予想平均入場者数 $X_{1,n}$ とはイベントごとに主催者側から発表される予想延べ入場者数を,イベントの期間で単純

に割ったものものであり曜日や休日による入場者数 の違いを反映していないことである.その効果は第 二項以下で表される.

第二項中, $I(\cdot)$  は階段関数であり,この項がイベント効果がある時に効いてくることを表す. $I(\cdot)$  がかかった括弧中第一項は曜日ごとにイベントへの客足が変わる効果を示す項であり(補正項第一項と呼ぶ), $f_w(d_n)$  は曜日:  $d_n \in \{1,2,\ldots,7\}$  (日,月,、、、、土) ごとの関数, $\alpha_w$  は定数係数である.括弧中第二項は,休日(土,日,祝日)にイベントがあった際には,その他の日よりも売上がかさ上げされる効果を示している(補正項第二項と呼ぶ). $\alpha_h$  は定数項(単位は金額), $h_{3n} \in \{0,1\}$  は indicator functionである(表 1 参照).

ここで注意しておくと,補正項第一項,第二項に おいて土曜日,日曜日の補正が重複して行われてい る.これはモデルを段階的に構築していったことに 由来する.まず休日は平日に比べて客の入りが増え るだろうと考えるのは自然であり,推定も困難では ないので休日のかさ上げ項 $\alpha_h$ (補正項第二項)を導 入した.しかし上で述べたような  $f_w(d_n)$  を,いきな り推定することは困難なので、この項を除いたモデ ルによって予測誤差を求め,その曜日ごとの平均値 を平均的な客足の変動パターンとみなし, それを関 数  $f_w(d_n)$  とした . そして , それに係数  $\alpha_w$  を乗じて 補正項第一項とした.その結果,補正項第一項,第 二項の両方において土日の補正が行われている.特<br/> 記しておくと、モデル化は段階的に行ったが後述の 状態推定において最終的には全ての状態ベクトルに 含まれる成分を同時に推定している.

## (6) 2.4 モデル:状態空間表現

上記のモデルは状態ベクトルを

$$x_n = \left[ x_{t,n}^t \mid x_{W,n}^t \mid x_{R,n} \mid x_{E,n}^t \mid x_{r,n}^t \right]^t$$
 (8)

とすることにより,状態空間モデル<sup>5,9</sup>

$$x_n = F_n x_{n-1} + G_n v_n \qquad [システムモデル] \qquad (9)$$

$$y_n = H_n x_n + \varepsilon_n$$
 [観測モデル] (10)

で表現できる.ここで状態ベクトル中の $x_{t,n}$ ,  $x_{W,n}$ ,  $x_{R,n}$  ,  $x_{E,n}$  ,  $x_{r,n}$  はそれぞれ , トレンド成分 , 週周 期成分,雨効果成分,イベント効果成分,ARモデ ル成分にかかわる部分ベクトルであり, それぞれ以 下のように表される.

$$x_{t,n} = [t_n, t_{n-1}]^t (11)$$

$$x_{W,n} = [w_n, w_{n-1}, w_{n-2}, w_{n-3}, w_{n-4}, w_{n-5}]^t$$
 (12)

$$x_{R,n} = [\gamma_R] \tag{13}$$

$$x_{E,n} = \left[\alpha_{B,n}, \alpha_w, \alpha_h\right]^t \tag{14}$$

$$x_{r,n} = [r_n, r_{n-1}]^t (15)$$

注意しておくと状態ベクトルに含まれる  $\gamma_R, \alpha_w, \alpha_h$ はシステムノイズがなく,平滑化の結果としてnに 依存しない定数項となるものである.

状態遷移行列 $F_n$  は次のような $14 \times 14$  行列である.

ここで  $F_t$ ,  $F_W$ ,  $F_R$ ,  $F_E$ ,  $F_r$  はそれぞれ , トレンド成 分,週周期成分雨効果成分,イベント効果成分,AR モデル成分に対応する部分行列である.

観測行列  $H_n$  は 14 次元横ベクトルであり以下のよ うに表される.

$$H_n = [H_{t,n} \mid H_{W,n} \mid H_{R,n} \mid H_{E,n} \mid H_{r,n}]$$
 (17)

横ベクトル $H_{t,n}$ ,  $H_{W,n}$ ,  $H_{R,n}$ ,  $H_{E,n}$ ,  $H_{r,n}$  はそ れぞれ,トレンド成分,週周期成分雨効果成分,イ ベント効果成分, AR モデル成分に対応する観測行 列である.

トレンド成分観測行列  $H_{t,n}$  , 雨成分観測行列  $H_{R,n}$ および AR モデル成分観測行列  $H_{r,n}$  はそれぞれ以 下のように表される.

$$H_{t,n} = H_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{18}$$

$$H_{R,n} = \left[ f_R(X_{2,n}) \right] \tag{19}$$

$$H_{R,n} = \left[ f_R(X_{2,n}) \right]$$

$$H_{r,n} = H_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$
(20)

またイベント効果成分観測行列  $H_{E,n}$  は以下のよ うに表される.

$$H_{E,n} = \begin{bmatrix} \zeta & I(\zeta) f_w(d_n) & I(\zeta) h_{3n} \end{bmatrix}$$
 (21)

ただし, $\zeta = f_B(X_{1,n})$ である.

週周期成分観測行列は  $H_{W,n}$  は , indicator function  $h_{1,n}, h_{2,n} \in \{0,1\}$  の組み合わせにより次の三 つの場合に分けられる(表1参照).

1. 祝日,祝前日以外の日:  $(h_{1n},h_{2,n})=(0,0)$ 式 ( 2 ) より  $W_n = w_n$  である.ここで状態ベク トル $x_n$ 中の週周期成分にかかわる部分ベクト  $\mathcal{L}_{XW,n}$  (式(12))と,式(1)(10)より,

$$W_n = H_{W,n} x_{W,n} \tag{22}$$

となる.故に $H_{W,n}$ は以下のようになる.

$$H_{W,n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (23)$$

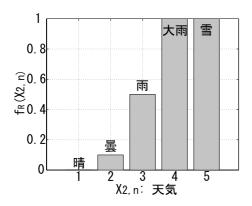
る.ここで直近の日曜の曜日成分  $w_{\mathsf{H},n}$  は  $x_{W,n}$ の中に含まれるが、その位置は当日の曜日  $d_n$  に 応じて変わる(例:当日が月曜  $(d_n=2)$  の時  $w_{\exists,n}=w_{n-1}$ ). 故に式 (22)より  $H_{W,n}$  は次 のようになる.

$$H_{W,n} = \begin{cases} [\kappa & \beta_1 & 0 & 0 & 0 & 0], \not\exists (d_n = 2) \\ [\kappa & 0 & \beta_1 & 0 & 0 & 0], \not\not \& (d_n = 3) \\ [\kappa & 0 & 0 & \beta_1 & 0 & 0], \not\& (d_n = 4) \\ [\kappa & 0 & 0 & 0 & \beta_1 & 0], \notå (d_n = 5) \\ [\kappa & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_1], \not\lessapprox (d_n = 6) \end{cases}$$

$$(24)$$

ここで  $\kappa = 1 - \beta_1$  である.

3. 祝前日:  $(h_{1n}, h_{2,n}) = (0,1)$ 式(2)より $W_n = (1-\beta_2-\beta_3)w_n + \beta_2 w_{\widehat{\pm},n} +$  $eta_3 w_{\pm,n}$  である.ここで直近の金曜土曜の曜日 成分  $w_{\pm,n}, w_{\pm,n}$  は祝日の場合と同様に  $x_{W,n}$  の 中に含まれ、その位置が当日の曜日  $d_n$  に応じて



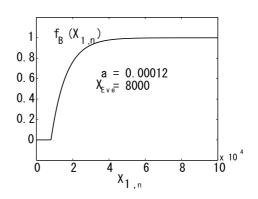
変わる(例:当日が月曜  $(d_n=2)$  の時, $w_{\pm,n}=w_{n-3}$ , $w_{\pm,n}=w_{n-2}$ ). ただし当日が木曜  $(d_n=5)$  の時,直近の金曜の曜日成分は  $w_{\pm,n}=w_{n-6}$  となり  $x_{W,n}$  の中に陽には含まれない. しかしながら,この場合,式(3)の季節成分モデルにより  $x_{W,n}$  の成分を用いて  $w_{\pm,n}=-\sum_{j=0}^5 w_{n-j}$  として表現できる.故に式(22)より  $H_{W,n}$  は以下のようになる.

$$H_{W,n} = \begin{cases} [\xi & 0 & \beta_3 & \beta_2 & 0 & 0], \exists (d_n = 2) \\ [\xi & 0 & 0 & \beta_3 & \beta_2 & 0], \not \times (d_n = 3) \\ [\xi & 0 & 0 & 0 & \beta_3 & \beta_2], \not \times (d_n = 4) \\ [\chi & \psi & \psi & \psi & \psi & \omega], \not \times (d_n = 5) \end{cases}$$
(25)

ここで  $\xi=1-\beta_2-\beta_3$  ,  $\chi=1-2\beta_2-\beta_3$  ,  $\psi=-\beta_2$  ,  $\omega=\beta_3-\beta_2$  である .

# 3 状態ベクトルおよびパラメータ推定

前節で構成したモデルは式(9)(10)のように状態空間モデルで表現できることから,カルマンフィルタおよび固定区間平滑化と呼ばれるアルゴリズムを用いて効率良く状態推定および時系列の分解を行うことができる5,9-13.以下では時系列 $Y_i=\{y_1,\dots,y_i\}$ 



 $\boxtimes 2$ :  $X_{1,n}$  vs  $f_{B(X_{1,n})}$ 

が与えられた下での状態  $x_n$  の条件付き平均と分散 共分散行列を

$$x_{n|j} \equiv E(x_n|Y_j) \tag{26}$$

$$V_{n|j} \equiv E[(x_n - x_{n|j})(x_n - x_{n|j})^t]$$
 (27)

と表す.状態推定では,時刻nでの状態を推定する際に利用する時系列 $Y_j$ の時刻jと時刻nの関係に応じて,それぞれj < nの場合は,予測(prediction),j = nの場合は,濾波(filtering),j > nの場合は,平滑化(smoothing)と呼ばれる.

統計的モデルの良さはモデルの予測能力によって 評価することができる. モデルの尤度は近似的にその モデルの予測精度の良さを評価したものである.した がって,尤度を最大にすることにより近似的には予測 能力を最大とするパラメータを求めることができる。 長さ N の時系列  $y_1, \ldots, y_N$  が与えられたとき , パラ メータ $\theta$ を持つモデルによって定まる $y_1, \ldots, y_N$ のN次元同時密度関数を  $f_N(y_1,\ldots,y_N\mid\theta)$  とする.この ときこのモデルの尤度は  $L(\theta) = f_N(y_n, \dots, y_N \mid \theta)$ によって定義される.さらにこの尤度は条件付密度関 数の積により  $L(\theta) = \prod_{n=1}^N p(y_n \mid y_1 \dots y_{n-1}, \theta) =$  $\prod_{n=1}^N p(y_n \mid Y_{n-1}, \theta)$  と表現できる.ただし  $Y_0 =$  $\phi$  ,  $f_1(y_1 \mid \theta) = p(y_1 \mid Y_0, \theta)$  とする . したがっ て,時系列モデルの対数尤度は  $l(\theta) = \log L(\theta) =$  $\sum_{n=1}^{N} \log p(y_n \mid Y_{n-1}, \theta)$  によって与えられる. 時系 列モデルのパラメータの最尤推定値  $\hat{\theta}$  を求めるため には,数値的最適化の方法により,この対数尤度を

	$h_{1n}$	$h_{2n}$	$h_{3n}$
1	月~金の祝日	祝日ではない月~木で翌日が祝日	休日(土日祝)
0	それ以外	それ以外	それ以外

表 1: Indicator functions

最大にするパラメータを求めればよい<sup>5</sup>.また異なる モデルの優劣を評価するには AIC ( 赤池情報量基準 ) を比較すればよい.

本研究のモデルはパラメータベクトル  $\theta=[\sigma^2,\tau_t^2,\tau_w^2,\tau_B^2,\tau_r^2,\beta_1,\beta_2,\beta_3,a_1,a_2]^t$  により規定される.文献 $^4$ では,ランチの売上時系列に対して当モデルを適用し,グリッドサーチによりパラメータの最適化を行い時系列を各成分に分解した結果が示され,詳細な考察がなされている.

## 参考文献

- [1] 矢田勝彦, 加藤直樹, 羽室行信. 発見科学とデータマイニング, 顧客の購買履歴からのデータマイニング, pp. 169-178. bit 別冊. 共立出版, 2000.
- [2] 恩藏直人. マス・マーケティングとミクロ・マーケティング ~ 市場細分化の考え方 ~ . 環境マーケティング & ビジネス, p. 110, June 2003.
- [3] D. Peppers and M. Rogers. The One to One Future: Building Relationships One Customer at a Time (One to One). Bantam Doubleday Dell Pub., 1997.
- [4] 山口類, 土屋映子, 樋口知之. 状態空間モデルを 用いた飲食店売上の要因分解. オペレーション ズ・リサーチ. 印刷中.
- [5] 北川源四郎. FORTRAN 77 時系列解析プログラミング. 岩波コンピュータサイエンス. 岩波書店, 1993.
- [6] 近藤文代. デイリー POS データにおける曜日変動および値下げ効果の抽出. オペレーションズ・リサーチ, Vol. 44, No. 3, pp. 154–163, 1999.

- [7] F. N. Kondo and G. Kitagawa. Time series analysis of daily scanner sales: extraction of trend, day-of-the-week effect and price promotion effect. *Marketing Intelligence & Planning*, Vol. 18, No. 2, pp. 53–66, 2000.
- [8] H. Kitagawa, T. Higuchi, and F. N. Kondo. Smoothness prior approach to explore mean structure in large-scale time series. *Theoretical Computer Science*, No. 292, pp. 431–446, 2003.
- [9] G. Kitagawa and W. Gersch. Smoothness Priors Analysis of Time Series. Springer-Verlag, New York, 1996.
- [10] 廣田薫, 生駒哲一. 確率過程の数理, 数理工学基礎シリーズ, 第4巻. 朝倉書店, 2001.
- [11] 片山徹. 新版 応用カルマンフィルタ. 朝倉書店, 2000.
- [12] A. C. Harvey. Forecasting, structural time series models and the Kalman filter. Cambridge University Press, New York, 1989.
- [13] M. West and J. Harrison. Baysian Forecasting and Dynamic Models. Springer-Verlag, New York, second edition, 1997.

## 連絡先:

山口 類

九州大学大学院数理学研究院

〒 812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1

Phone+Fax: 092-642-7134

E-mail: ruiy@math.kyushu-u.ac.jp

# 意図認識機構を用いたヒューマンビークルにおける 人間支援システム

## Humane Automotive System Using Intention Recognition

山口 亨\* 玉井 郁夫\* 大橋 邦博\* 阿山 みよし\*\* Toru Yamaguchi Ikuo Tamai Kunihiro Ohashi Miyoshi Ayama

\*東京都立科学技術大学 大学院工学研究科 システム基礎工学専攻 Systems Engineering Science, Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan Institute of Technology

\*\*宇都宮大学 大学院工学研究科 情報制御システム科学専攻 Department of Information Science Faculty of Engineering Utsunomiya University

Abstract— In our country, advance of aging is remarkable and IT gap is progressing. A user's situation is judged based on the information from two or more information terminals (camera, GPS, etc.), and the intellectual wall type human-being center IT system which returns the information which man needs is built.

## 1. はじめに

現在、わが国では平均寿命の伸長と少子化の進行により急速度で高齢化社会がやってきつつある。特に高齢者の中には情報機器を有効活用できてない情報弱者と呼ばれる方が多く存在し、IT格差が進んでいるのが現状である。

本研究では、従来の「人間がシステムに働きかけて作用するシステム」ではなく、「システムが人間を見て状況を判断し作用する人間中心型のネットワークシステム」が必要であると考えた。

特にマルチプラットホームな表示とヒューマンビークルに注目し、意図認識機構を用いた人間中心型システムの構築を行い、その有効性を検証する。[1]

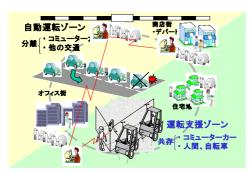


図1. 人間中心型ネットワークシステム全体図

# 意図認識機構を用いた実験システム

人間の動作や状態によって意図を認識しその 意図と状況に適した処理を行う人間中心型システ ムを構築する。

今回は携帯情報端末(ノート PC)を用いて、カメラ等のセンサー情報から人間の状況や動作から意図を認識する。携帯情報端末に人間が必要としている情報をプラットホームに最適な形で表示し、また利用者の意図に応じた動作を電気自動車が行う人間中心型システムを構築する。

システムを構築するにあたり生活空間を車外、車内の2シチュエーションに分けた。

車外:電気自動車が利用者の意図におうじたマクロな動作をおこなう人間中心型システム。 車内:ドライバの意図から必要な危険表示をする 人間中心型システム。

以上の2シチュエーションにおいて人間の状況 に応じて機能の切り替わる人間中心型のネットワークシステムを構築し評価する。

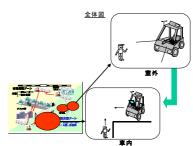


図2.システムの全体図

## 3. 意図認識機構

人間の意図を認識する意図認識機構を構築する。周囲の環境とコマンドの二つから人間の意図を認識することが可能となる。車外システムでは利用者が電気自動車に対してコマンドを送り、電気自動車は周囲の環境(T字路、L字路、車庫スペースありなど)がわかることにより利用者の意図認識を可能とする。

また車内システムでは運転者の顔の向き、車速、ハンドル角から運転者の意図を認識する。

## 4. 車外システム

車外システムでは電気自動車が人間の自然な 動作に基づいた手の動作によって意図を認識し、 人間の意図に応じたマクロな動作を行う人間中心型システムを構築する。 電気自動車に設置したカメラから人間の動作を検出し周囲の状況とコマンドから電気自動車は人間の意図を認識する。

今回は図3のような状況下において実験を行った。電気自動車が走行中のこの状況下では電気自動車はアフォーダンスにより可能な動作に制限がある。すなわち人間の意図となりうる代替案を集約することができる。それによって電気自動車が人間の意図を認識することを可能とする。

今回の実験では人間が歩行中でも人間の動作を認識するために電気自動車が自身の動きを知る必要がある。そこで通路上にポールを設置する。電気自動車は意図を認識した後、意図に応じたマクロな動作を行う。「車庫スペースへ回避」「道なりに直進」の2パターンにおいて実験を行う。

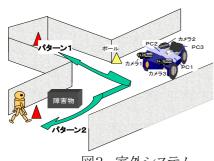


図3. 室外システム

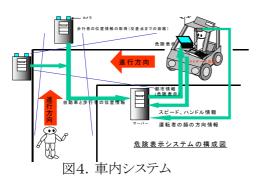
## 5. 車内システム

電気自動車に乗り込んでから情報端末は危険表示によって運転者を支援する人間中心型システムに切り替わる。危険表示を行う為には周囲の環境情報を見極める事が必要である。

路上に設置したカメラシステムによるステレオ視 や各種センサーから周囲の情報を取得し、本当 に危険な時に最適な警告を出す実験を行う。(宇 都宮大学 阿山研究室との共同実験)

今回は見通しの悪いL字路のシチュエーションで実験を行った。まず歩行者と電気自動車は交差点に向かって直進する。歩行者の位置情報と電気自動車の位置情報は交差点に設置されているステレオ視システムから得られる。さらに、運転者の頭上カメラと車内カメラから運転者の顔の方向情報、電気自動車からスピード、ハンドル角の情報が得られる。これらから運転者が行いたい操作を認識する。

これらの運転者の意図と周囲の環境情報をリアルタイムに処理する事で状況を判断し運転者への危険表示を行う。[4]



## 6. 危険表示

シミュレーションと実験により提示するタイミング を検証した。提示内容は図5に示すように、大きい 画面には周辺の全体図を小さい画面には交差点 付近の詳しい情報を提示する。



図5. マルチプラットホームな危険表示

## 7. 人間中心型システムの評価

被験者10名に対して、室内、室外、車内システムを5段階で(5:有効,4:やや有効,3:普通,2:やや有効でない,1:有効でない)評価した。結果は以下のようになった。

- ・車外システム 1:0 名,2:0 名,3:2 名,4:4 名,5:4 名 車外システムの平均:4.2
- ・車内システム

音声のみ 1:0 名,2:1 名,3:7 名,4:2 名,5:0 名 表示と音声 1:0 名,2:1 名,3:3 名,4:5 名,5:1 名 結果より、システムの有効性を示す事ができた。

## 8. おわりに

意図認識機構を用いた人間中心型のネットワークシステムを構築し、有効性を示す事が出来た。

今実験では被験者が20代工学部の学生であった、高齢者の方を被験者とし評価するとさらに高い評価が得られると思われる。

今後は対応するシチュエーションを増やし、 様々な状況に対応できるシステムにしていく必要 がある。

## 参考文献

[1]高羽禎雄、津川定之、藤井治樹、桑原雅夫:21世紀の自動車交通システム 情報化・知能化・自律化へ,工業調査会,1998

[2]山口亨、谷萩隆嗣、萩原将文共著:ニューラルネットワークとファジィ信号処理, コロナ社, 1998

[3]T.Yoshifuji : Human centered interface at cyber-agent system, ARTIFICIAL LIFE AND ROBOTICS, 7th, pp320~323, 2002

[4]T.Yoshifuji : Development of ITS simulator and Humanvehicle,17thFuzzySystemSymposium,pp235~238,2001

## 連絡先

〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6 東京都立科学技術大学大学院 システム基礎工学専攻 山口研究室 玉井 郁夫

電話/FAX: 042-585-8641

Email: tamai@fml.ec.tmit.ac.jp

## 対象の見え方を考慮した知識獲得に関する研究

# A Study of Knowledge Acquisition System Considering Difference in Vision of Object

前本 啓貴\* 矢野 良和\*\* 大熊 繁\*

Hiroki MAEMOTO Yoshikazu YANO Shigeru OKUMA

## \*名古屋大学大学院工学研究科

\*\*名古屋大学大学院経済学研究科

Graduate School of Engineering, Nagoya University Graduate School of Economics, Nagoya University

Abstract: When we recognize something in the real world, we need to deal with abstract targets like car or people. But Pattern Matching, which is commonly used, is needed enormous quantity of data, if we use pattern matching to recognize them. Because They can't be described only one pattern. So we propose new knowledge system which can describe abstract concepts. The system is made by integrating several features of target object. It can realize data compression and improvement of versatility. Additionally,we use the system for vehicle recognition in general road. But performance of recognition is affected by environmental changes. So we incorporate the method of human's recognizing in our system. The method is changing the knowledge according to the environment. In this paper, We consider ways and means to realize our proposed system.

keyword: Knowledge Acquisition, Vision of Object, Feature Integration, Object Recognition, ITS, GMM

## 1 研究背景

近年,ITS やロボットビジョン,セキュリティ,ヒューマンインターフェースなど様々な分野で画像からの物体認識の研究が進められている.そのような研究の中で提案されている認識手法の多くは認識対象のパターンを事前に与え,適合する部分を探索するパターンマッチングが用いられている.パターンマッチングは画像中から特定のパターンを抽出する場合には有用な手法だと言える[1][2].

しかし,実世界で認識を行う場合には「車」「人」などといった抽象的,不特定な対象を扱う必要がある.パターンマッチングをこのような対象に適用する場合,単一のパターンでは対象を十分に表現できないため,対象の見え方や種類に対応するために膨大な量のパターンを用意する必要がある.よって膨大なメモリ,計算量が必要となってしまう.そのため上記のような抽象的な対象を扱う技術が必要になる.

現在でもそのような抽象的な概念を扱う様々な研究がなされている[3][4].しかし,抽象的な概念を明確な形で提案しているものは少ない.そこで本研究では対象物体のもつ特徴情報を複数組み合わせることにより物体を抽象表現化し「知識」として獲得,利用する新たな枠組みを提案する.

また,本研究では車載カメラから得られた一般道路画像上の前方車両を認識対象としている.屋外の環境では天候,時刻など様々な要因により取得する画像は影響を受ける.このような様々な撮影環境において単一の知識のみで対応することは難しい.しかし,人間は様々な環境下において対象をロバストに認識することが可能である.人間がそのような様々な環境下においても認識対象を同じものと判断できるのは,環境に応じて知識を使い分けているからだと考えることができる.そこで,我々の提案する知識構造にも人間の特性に習い画像の状態に応じて知識を動的に変更させる枠組みを取り入れる.

本稿では,画像の見え方を考慮した新たな知識構造について提案を行う.また,提案する知識構造を実現するために,モデル化の方法について検討を行った.実験により作成した知識構造が有効であることを示す.

## 2 提案する知識構造

ここでは提案する知識構造及びその特徴について述べる.また, 画像の見え方を定義するパラメータについて述べる.



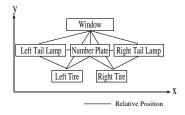


図 1: 前方車両画像例

図 2: 基本となる提案知識構造

#### 2.1 基本構造

前方車両画像の例を図1に示す。図1の様に,画像中から車両領域を矩形で抜きだし,画像サイズを正規化した画像をシステムへの入力とする.自動的な切り出し方法としては,オプティカルフローを用いて移動物体を捉え,その輪郭を算出して,輪郭から外接矩形を特定することにより,切り出しを行う方法などが考えられる.

このような車両画像を元に提案する知識構造の基本構造を図 2 に示す.ここでは前方を走行する車両を表現するオブジェクトとしてウィンドウガラス,テールランプ (左右),ナンバープレート,タイヤ (左右)を用いて表現している.それぞれのオブジェクトは色,面積,重心位置などの特徴量を持っている.各オブジェクトの知識モデルにおける特徴量は,複数の車画像データから取得したものを統合することによって一般的な特徴量としてモデル化されたものである.図 2 では車を構成するオブジェクトの画像上での位置関係が示してあり,それぞれのオブジェクトをつなぐ線はオブジェクト間の相対位置関係を表現している.この構造を基準に,以下に示す画像の見え方を定義する鮮明度を軸とし,オブジェクトらしさを表すオブジェクトの知識モデル出力値の上限・下限を変更する.オブジェクトのモデル化及び出力値の上限・下限を変更する.オブジェクトのモデル化及び出力値の上限・下限については,実際のデータを用いて作成する.

提案手法の特徴としては,知識構造を作成することにより,一般的なパターンを表現できない車を抽象的に表現することが可能であることがあげられる.情報を圧縮し抽象化するため,パターンマッチングに比べて圧倒的に保持するデータ量が少なくなる.そのため,認識の際の計算量も削減できる.また,獲得した知識は再利用性が高く,汎用性の向上も期待できる.

見え方を定義する鮮明度ごとに、認識の基準となる知識モデル

の出力値の範囲のを定義することによって見え方に応じた認識が可能となる.これにより屋外のような環境の変化する状況において,柔軟に対応することが可能となる.知識を用いた認識手法の欠点として,車画像のすべての情報を知識として表現することができないことがあげられる.知識表現はエンブレムやワイパーなどの細かな情報は,車種に依存しない共通情報ではない場合,利用されない.よって特定の車種を認識することは困難である.今回は車種を特定することではなく,車両前方の危険物を回避することが目的である.そのため車であることが認識できればよく,問題ないと考えられる.

## 2.2 鮮明度

画像の色やエッジなどは見え方によって変化する.同じ画像で も距離や天候が異なる場合など取得する環境によって見え方は異 なる.よって対象画像の見え方に応じた知識モデルの記述が必要 となる、そこで、画像の見え方を表すパラメータを画像から獲得 する必要がある.このパラメータを鮮明度と定義する.鮮明度と しては画像中のエッジ量,対象までの距離,対象の画像上の面積, 画像の彩度などから画像の決定するパラメータから決定すること ができる.今回はその中でも画像中のエッジ量に注目する.入力 された正規化画像に対して FFT(Fast Fourier Transform) で周 波数解析を行い,得られた有効な次数を元に鮮明度を算出するこ ととした. 高周波成分が多ければ濃度変化に鋭敏な部分が多く, 画像は鮮明であると言える.また,高周波成分が少ない場合は濃 度変化が緩やかで,対象の形状がはっきりしないことを表す.画 像への適用結果をスペクトル表示し、スペクトルの分布から有効 な次数を求める.表示されたスペクトル分布は分布の中心付近ほ ど低周波成分を含み,中心から離れるにつれて高周波成分を含む ことになる. そこでスペクトル分布の分散から鮮明度を求めるこ ととした.分散が大きいほど高周波成分を含むことになり,鮮明 度の値も大きくなる.

## 3 オブジェクトの知識獲得と検証

オブジェクトごとの知識モデル獲得までの流れと作成したモデルの検証方法について述べる.本稿で述べる知識とは,システムに提示された画像から共通の情報として抽象化されたものである.本稿では知識の表現方法として混合ガウス分布モデル(GMM:Gaussian Mixtured Model)を用いる.

まず、知識の獲得手順について説明する.各オブジェクトを正規化された画像から抽出する.オブジェクトの特徴量を鮮明度ごとに記憶し,モデルを生成する.生成したモデルにおいて,鮮明度ごとにオブジェクトらしさを表すモデルの出力値の上限・下限を決定する.次に,最後に生成したモデルの検証を行う.ここでは,車両の知識に対して様々な画像を入力し,モデルの出力値をあらかじめ決定した上限・下限を用いて判断を行い,オブジェクトの認識を行う.

以下に知識モデル獲得に用いる GMM , オブジェクトごとの特徴データ抽出手順 , 特徴データの統合方法 , 上限・下限の設定 , オブジェクトの認識について順に説明する .

#### 3.1 GMM

知識のモデル化の方法として,オブジェクトの領域における特徴分布の形状を GMM により関数近似する.以下に GMM 及び尤度の説明を行う.

確率密度関数  $p(x;\Theta)$  が,r 個の確率密度分布  $p(x;\theta_j)(j=0,1,2...,r)$  の重み付き線形結合

$$P(x;\Theta) = \sum_{j=1}^{r} \omega_j p_j(x;\theta_j)$$
 (1)

によってモデル化できるとする.ここで, $\Theta=(\theta_1,\theta_2\dots\theta_r)$  と表されるパラメータベクトルであり, $\theta_i$  は確率度数分布  $p(x;\theta_i)$ 

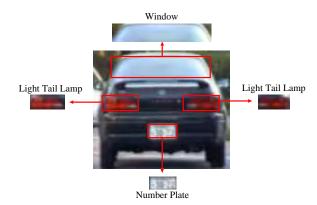


図 3: 正規化した画像からオブジェクトを抜き出した図

のパラメータとする.このような分布を混合分布と呼ぶ.特に確率密度分布  $p(x;\theta_j)$  として,平均  $\mu_j$ ,共分散行列  $\Sigma_j=\sigma_j I$  のガウス分布の場合を GMM と呼ぶ.

$$p_j(x;\theta_j) = \frac{1}{(2\pi\sigma_j^2)^{d/2}} \exp\left(-\frac{|x-\mu_j|}{2\sigma_j^2}\right)$$
 (2)

また , 式 (1) 中の重み係数  $\omega_j$  は混合パラメータと呼ばれており , 条件

$$\sum_{i=1}^{r} \omega_{i} = 1 \quad , \quad 0 \le j \le 1$$
 (3)

を満たすものとする.同様に各確率密度分布  $p(x;\theta_i)$  は,

$$\int p_j(x;\theta_j)dx = 1 \tag{4}$$

を満たすものとする.

推定すべきパラメータは確率密度分布のパラメータ  $\Theta$  と重み係数  $\Omega=(\omega_1,\omega_2,\dots\omega_r)$  となる.混合ガウス分布のパラメータ推定法には EM アルゴリズムを用い,式(5)で表現される尤度 (Likelihood) が最大になるように推定を行う.尤度とは対象としている観測データの分布がある確率論モデルにどの程度あっているかを表す尺度である.ここで,n 個のパターンを含む学習パターン集合を  $X=(x_1,x_2,\dots x_n)$  とする.

$$Likelihood(X;\Theta) = \prod_{j=1}^{n} P(x_j;\Theta)$$
 (5)

## 3.2 特徴データの抽出手順

知識モデル作成のためのデータ抽出手順について説明する. 今回はオブジェクトの特徴量として色情報 (YUV) のみに注目した.また,検討するオブジェクトはウィンドウガラス,テールランプ(左右),ナンパープレートとした.

まず後方から撮影した車画像を用意する.図3のように画像サイズを正規化した距離の異なる各画像から各オブジェクト領域を矩形で抜きだす.それぞれのオブジェクト領域からYUV成分分布を求める.各画像について鮮明度を求める.複数台の車画像を比較するために,各画像データの鮮明度を統一し,各鮮明度のYUV データを得る.以上の作業を対象とする車画像の台数分について行う.ここで求めたある鮮明度に統一した複数台の車画像のオブジェクトの色特徴を統合して各オブジェクトの知識モデルを構築する.

## 3.3 特徴データのモデル化

特徴データの統合方法について検討する.今回,簡単なためオブジェクトを矩形で切り出している.そのため本来得たい部分の







Image3







Image1

Image2

Image4

Image5

Image6

図 4: 距離の異なる画像を正規化した画像





図 5: 鮮明度検証用画像

図 6: 図 5 の周波数解析結果

表 1: 平均値フィルタ適用前後の画像の鮮明度

画像	鮮明度 (Original)	鮮明度 (filtered)
Image1	35.47	32.25
Image2	33.39	30.79
Image3	31.55	28.58
Image4	29.51	26.99
Image5	25.92	23.63
Image6	23.69	21.41

情報の他に,背景やボディなどの不要な情報も含まれる.そのような不要な情報を除去するために,オブジェクトごとの YUV データを各鮮明度ごとに複数台分加算する.つまり相対的に有用なオブジェクト情報に対して不要な情報が少なくなると考えられる. GMM によりこの統合したオブジェクトのデータを学習し,知識モデルを構築する.知識モデルは鮮明度ごとに算出する.

#### 3.4 知識モデルの検証

獲得した各オブジェクトの知識モデルを用いた,オブジェクト認識手法を説明する.まず,入力された対象画像領域を正規化し,対応する位置からオブジェクトを抽出する.次に,得られたオブジェクトをそれぞれの知識モデルに入力したモデルとの適合度を計算する.モデルの適合度として尤度比を用いた.以下に示す尤度比を用いてモデルと入力との一致度を算出する.

### 3.4.1 尤度比

尤度比 (Likelihood Ratio) は,式 (6) で表される.ここで,学習用に用いたデータ集合を X,比較したいデータ集合を Y,X を用いて学習したパラメータを  $\Theta_{learn}$  とする.学習後の尤度と作成したモデルに比較したいデータを入力した時の尤度の比で表すものとする.よって,比較したいデータの分布が学習用データの分布に近いほど,値は 1.0 に近くなる.

$$Likelihood \ Ratio = \frac{Likelihood(Y; \Theta_{learn})}{Likelihood(X; \Theta_{learn})}$$
 (6)

尤度比を用いることによって,入力されたオブジェクトがどれほどモデルとして獲得されたオブジェクトの共通情報と類似してい

るかを表現できることになる.

## 3.5 上限・下限値の設定

モデルの出力である尤度比の上限・下限の設定について説明する.作成した知識モデルに,実際のデータを与え,尤度比を求める.学習させた全てのデータの尤度比の値域によって各モデルにおいてオブジェクトとして認識する上限・下限が決定される.

## 4 実験

提案する知識モデルの有効性を示す実験を行った.

まず,鮮明度についての検討を行った.次に GMM を用いて 鮮明度ごとのオブジェクトの知識モデルを構築した.そしてオブ ジェクトごとに尤度比の上限・下限を求めた.最後に様々な画像 を鮮明度ごとにモデルに入力し,その時の尤度比とモデルの持つ 上限・下限の関係について検討した.

今回は知識モデルの作成に5台分の画像を使用した.5台の画像は同じ環境下において撮影した画像中から,色の分布の近いものを選択した.

## 4.1 鮮明度の検討

## 4.1.1 実験条件

鮮明度を求めるまでの作業手順を以下に示す.

まず車画像を様々な距離で撮影を行う.撮影した画像から,車領域を矩形で抜き出す.抜き出した車画像のサイズを正規化する.今回は $256 \times 256$ に正規化を行った.よって,距離の遠い画像ほど,大きく引き伸ばされた画像となる.

今回は距離の異なる 6 枚の画像を撮影することにより評価した.画像を図 4 に示す.それぞれ鮮明な画像から 1 Image 1 とする.また,フォーカスが合っていない状況も想定し,それぞれの画像に平均値フィルタを適用した場合の鮮明度についても算出した.それぞれの車両において,距離を変えて撮影することで,異なる鮮明度を持つ複数の入力画像を作成した.

## 4.1.2 結果と考察

取得した 6 枚の画像中で最も鮮明度の高い画像及びそれに対する FFT 適用結果のスペクトル表示を図 5,6 に示す.図 6 の分布の分散により求められた鮮明度は 34.21 となった. 同様に距離を変えた 6 枚の画像及びそれぞれに平均値フィルタを適用した画像から求めた鮮明度を表 1 に示す.それぞれの表中の Image1 は最も距離の近い画像であり,Image6 まで順に対象までの距離が遠くなっている.

表1の結果から対象までの距離の違いによる画像の見え方の違いを周波数解析により得られた鮮明度で表現できることが確認できた。また,同じ画像でも平均値フィルタを適用した画像は鮮明度が下がっている。この結果から周波数解析の結果により,距離やフォーカスが合っていない状況などの見え方の違いを FFT 処理のによる分散値に反映されており,鮮明度として利用できることが確認できる。

以降 , モデル表現の基準とする鮮明度として , 32 , 30 , 28 , 26 , 24 を用いることにした .

## 4.2 知識モデル獲得

#### 4.2.1 実験条件

10台分の画像データを統合したデータを用いて GMM により各オブジェクトにおける鮮明度の知識モデルを学習した.撮影した画像より切り出された車両領域の画像サイズを  $256\times256$  に正規化して用いた.鮮明度に対する GMM のパラメータの変化を観察するため,鮮明度 32 から順に学習を行った.各オブジェクト毎の GMM のガウス混合数は,鮮明度 32 において最適な混合数を利用した.GMM のパラメータ変化を鮮明度の変化と対応付けるため,各鮮明度の GMM 学習に用いたパラメータの初期値は前鮮明度における収束結果を用いた.ただし,鮮明度 32 の場合の GMM を学習させる際の初期値は乱数で与えた.

#### 4.2.2 結果と考察

ウィンドガラスのモデルは5混合モデルで表現された.ウィンドウガラスのモデルにおける鮮明度とGMMのパラメータ(分布の重み,平均値,分散値)の関係を図7に示す.横軸は鮮明度を表し,縦軸は重み係数,平均値,分散値の値を表している.図中の各線は,各ガウス関数のパラメータ変化を示している.

ウィンドウガラスのモデルにおいて,鮮明度が高い時は対象がはっきり見えて様々な色を含むことから,Y成分の分散値,中心値については大きな値を示している.鮮明度が低くなるにつれて,オブジェクト内の色分布が一様になる.それにより,各ガウス関数の示す色は類似し,それぞれの色の幅も小さくなっていることが確認できる.Y成分の値が小さくなっているのは,撮像対象までの距離が変わったためと考えることができる.UVの成分については UV 方向へのデータの広がりが小さいため,中心値は若干の変動はあるものの,ほぼ一定になっている.

## 4.3 尤度比の上限・下限の決定

## 4.3.1 実験条件

オブジェクトとして認識する尤度比の値域の上限・下限を画像 データから求めた.画像データにはモデル構築に用いた10台分 の画像を用いた.

#### 4.3.2 結果と考察

各オブジェクトにおける尤度比の上限・下限を示したグラフを 図8に示す、それぞれグラフの横軸は鮮明度を表し、縦軸は尤度 比を表している。

結果を見みると全てのオブジェクトの上限・下限値は,鮮明度が高いほど低い値となっている.鮮明度が高いほど,オブジェクト内の色分布は幅広い帯域に存在する.鮮明度が高い場合の分布を統合するとさらに幅広い帯域を持つ.統合された分布に対して,入力データの分布は帯域が狭いため,一致しない部分が多く含まれる.よって,鮮明度が高い場合には比較的尤度比が小さいと考えられる.また,分布の存在する帯域が広いため,モデルの分布に対して狭い帯域の入力の分布が変動しても尤度比はあまり変動しない.入力に対して尤度比があまり変動しないため,尤度比の値域も小さい.

鮮明度が下るに従って,オブジェクト内の色分布は一様になる.分布が一様なため,存在する帯域は狭い.一様な分布を統合しても,存在する帯域はほとんど変わらない.鮮明度が低い場合,統合された分布帯域に対して,入力データの分布帯域は類似した点に存在する.また,分布の形状も類似している.そのため,鮮明度が低い場合には尤度比は比較的大きくなる.また,モデルの存在する帯域が狭いため入力分布の変化に対して,モデルとのずれが大きい.モデルとのずれが大きい.モデルとのずれが大きいほど尤度の変化は大きい.つまり,尤度が入力に対して大きく影響を受けるため,鮮明度が低い場合では尤度比の値域も広い.

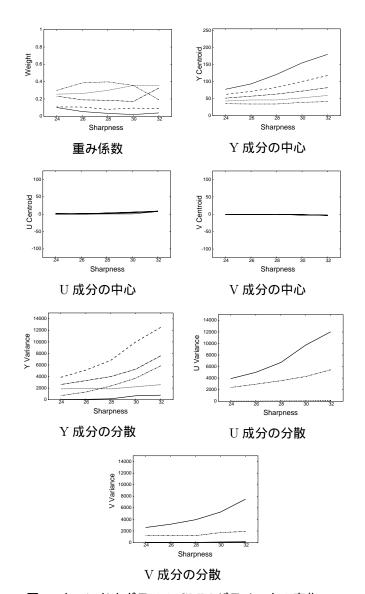


図 7: ウィンドウガラスの GMM パラメータの変化

## 4.4 知識モデルを用いた認識

#### 4.4.1 実験条件

オブジェクトを表す尤度比の上限・下限を取り入れた知識モデルをの有用性を示すための実験を行った、検証用の 4 枚の画像を入力することにより、尤度比の上限・下限と各画像に対する尤度の関係を検討した。

用いた入力画像を図9に示す.入力画像としては学習に用いたデータのうちの1台の画像,学習用画像と色分布が類似している未学習画像1,学習用画像とは異なる分布の未学習画像2,車以外の画像(信号)の4枚を用いた.車以外の入力画像には道路走行環境中おいてテールランプ以外で見られる赤い物体の例として,赤信号の写った画像を用いた.信号機を撮影した画像から他の車画像と同等の処理を行い,平均的な各オプジェクトの位置,サイズで切り取り同等の認識処理を行った.

## 4.4.2 結果と考察

入力画像のオブジェクトデータを各鮮明度における知識モデルに入力した時の出力結果を図 $10 \sim 13$ に,各オブジェクトの上限値・下限値と共に示した.各入力に対する尤度比は破線で示してある.図の横軸は鮮明度を,縦軸は尤度比を表している.

各画像の認識結果について考察する.

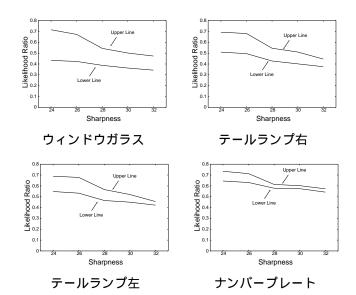


図 8: 各オブジェクトにおける尤度比の上限・下限

学習に用いた画像と見学習画像1のすべてのオブジェクトの尤度比は上限値・下限値の間に含まれている.学習に用いたうちの1台の画像と未学習画像1は車の撮影環境,色の分布などが類似していたため,同等の認識結果が得られている.

未学習画像 2 についてはウィンドウガラス,テールランプ右の 尤度比が小さな値を示している.未学習画像 2 はウィンドウガラスが太陽光を反射しており,色分布が学習画像とは異なる.よって,ウィンドウガラスの尤度比は,下限を下回る部分が存在する. 学習画像では太陽光が画像上の左側からさしているため,テールランプ左に対して,テールランプ右は全体的に暗い.それに対して未学習画像ではテールランプ右においても,光が差し込んでいるため,学習画像に比べて明るい.そのため,テールランプ右の尤度比は下限に近い値となっている.しかし,上限・下限内に含まれるため,オブジェクトとしては認識ができている.その他のオブジェクトについては学習画像と類似しているため上限値・下限値内に含まれている.

車以外の画像の認識結果はテールランプ右の出力以外は下限に対して尤度比が小さい.車以外の画像には,テールランプ右の位置に赤信号が存在する.赤信号はテールランプに比べ輝度値の高い赤色であるため,上限・下限内には含まれていない.しかし,色分布は類似しているためテールランプ右の下限値に近い大きな尤度比がでている.その他のオブジェクトについては,学習画像と大きく異なるので,出力結果は小さい.

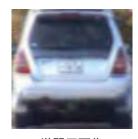
結果から学習した知識モデルが,学習画像のデータ分布を表現できていることがわかる.尤度比の上限・下限も鮮明度毎に適切に設定出来ていることがわかる.

しかし,学習した知識モデルでは,距離の変化に対しては対応できているが,太陽の方向によるオブジェクトの色の変化等には対応できていない.この様な状況に対応するには,統合するデータ数を増やすことで,モデルの精度をあげること,また状況ごとに知識モデルを用意することによって対処する必要がある.

## 5 結論

本研究では,鮮明度を軸にオブジェクトごとに知識モデルの尤度比の上限・下限を変化させ,状況に応じて対処できる知識構造の提案を行った,

提案手法を実現するために,鮮明度を周波数を用いて定義し,車画像の見え方を表現した.また,統一した鮮明度ごとに複数のオブジェクトのデータを統合し,GMMでモデル化をおこなった.様々な画像から各オブジェクトにおいて鮮明度ごとの尤度比の上限・下限を求め.作成した知識モデルが有効であることを,認識



学習用画像



未学習画像 1



未学習画像 2



車以外の画像 (信号)

図 9: 知識モデルへの入力画像

を行うことにより確認した.

今後は用いる画像を増やし,モデルの精度を高めることを検討する.また,オブジェクト間の相対位置関係についても検討する予定である.

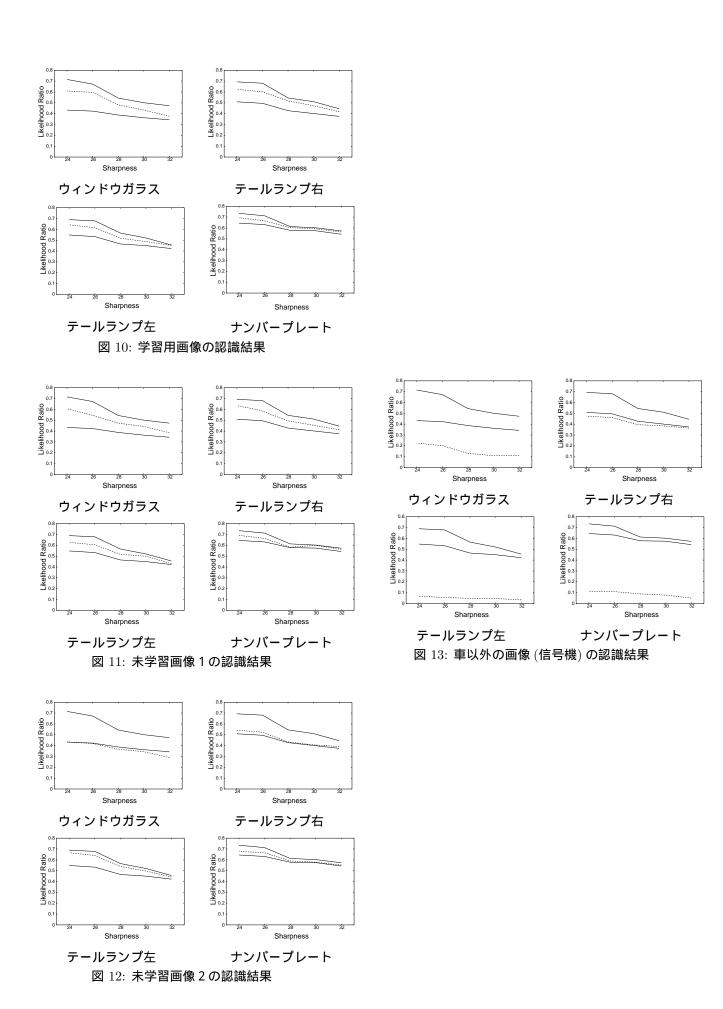
## 参考文献

- [1] 二宮芳樹, 高橋新, 太田充彦 "高速パターン照合手法を用いた レーン認識システム"電子情報通信学会論文誌,D-2,Vol.86-D-2,No.5,pp625-632,2003 年 5 月
- [2] Takashi NAITO, Toshiko TSUKADA, Keiichi YA-MADA, Kazuhiro KOZUKA, Shin YAMAMOTO "Robust License-Plate Recognition Method for Passing Vehicle Under Outside Environment" IEEE Trans. on VEHICLAR TECHNOLOGY, No. 49, No. 6, pp 2309-2319, 2000
- [3] A.Mohan, C.Papageorgiou, T.Poggio "Example-Based Object Detection in Images by Compornents", IEEE Trans. on PAMI, Vol.23, No.4, pp349-361, 2001
- [4] 太田貴彦, 渡辺俊典, 菅原研 "Locality Sensitive Hashing を利用した静止画像からのオブジェクト概念発見", 信学技報 (PRMU),2004 年 2 月 20 日,pp113-128

## 連絡先:

〒 466-8603 愛知県名古屋市千種区不老町名古屋大学 工学研究科 電子情報学専攻前本 啓貴

TEL:052-789-2776 FAX:052-789-3140 E-mail:maemoto@okuma.nuee.nagoya-u.ac.jp



## 判別問題向け知識獲得ツールの開発

A development of knowledge acquisition tools for classification problems

稲葉 広典 糀谷 和人 中嶋 宏

Hironori Inaba Kazuto Kojitani Hiroshi Nakajima

オムロン株式会社 コントロール研究所 知識制御グループ

Control Technology Laboratory, Knowledge & Control Technology Group, OMRON Corporation

**Abstract:** The knowledge acquisition tool for classification problems is presented in this article. The problems to be solved here is that the performance of acquired knowledge depends on experts' skill. In order to get stability, reliability, and performance of knowledge, the tool enables to form knowledge with using the results given by human experts. The tool has been applied to the classification problem of a sensory inspection system. A simple experiment of the tool results in good performance.

#### 1. はじめに

モータなど駆動部を有する製品は、ベアリング不良、異物混入、回転不良、ギア欠けといった不良があると、良品とは異なる音や振動を発する。従来、熟練した検査員がこの音を耳で聞いて製品の良否を判定し、この種の不良品検出を行ってきた。自動車業界では、エンジンやトランスミッションなどの製品に対して、検査員による良否判定を行い、品質の確保につとめてきた。

しかし、このような官能検査では、検査員の体調変化や 熟練度不足などにより、判定基準にばらつきが生じたり、 不良品を見逃したりすることがあった。したがって、人間 の聴覚に頼った定性的かつ相対的な基準による検査では なく、定量的かつ絶対的な基準による、安定した音・振動 検査が求められている。そこでは、当然ながら熟練検査員 と同等以上の判定性能が必要である。

このような背景のもと、これまで人間の聴覚に頼っていた異音検査工程を安定化 定量化する 異音検査システム 'と、熟練検査員と同等以上の判定を実現する '判定知識生成サービス'の提供を中心としたソリューションビジネスが行われている[1][2]。

筆者らは、このような異音検査に代表される判別問題を対象に、判別問題向け知識獲得環境 C-KAP (C-KAP: Classification-Knowledge Acquisition Platform)を構築した[3] [4] [5]。しかし、C-KAPで定義された知識獲得手順では、広範な探索空間を扱う必要がある。したがって、人手で作業する場合、作業者のスキルに応じて獲得される知識の性能にばらつきが生じるという課題があった。

本稿では、この課題を解決するため、知識獲得を支援するツール群を開発し、作業者によらず安定した知識獲得を可能としたので報告する。開発したツールでは、熟練者の判定結果を元に、遺伝的アルゴリズムとファジィ決定木を利用して、知識の性能の確保を目指している。

## 2. 異音検査システムの知識獲得

## 2.1 異音検査システム

異音検査システムは、マイクや加速度センサから入力された波形をコンピュータ上のプログラムで解析し、ファジィ推論を行って、OK / NG / GRAY の 3 段階で判定結果を出力するシステムである(図1)。異音検査システムを導入することで、40 種類の特徴量を組み合わせた、定量的な検査が可能となる。また、最大で8種類の不良種別を判定することができる。

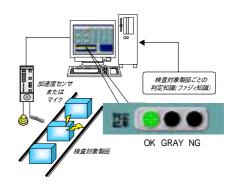


図 1: 異音検査システム

## 2.2 異音検査システムの知識獲得手順

一般に、知識を獲得するには、入力データに対して 選択 前処理 特徴量抽出 モデリング 解釈 / 評価

という手順で処理を行う[6] [7] [8]。 C-KAP での異音検査システムの知識獲得も、この手順にしたがう。 C-KAP で構築した異音検査システムの知識獲得手順を図 2 に示す。判定知識を評価して、十分な性能が得られなければ、前段のいずれかのステップに戻って、再度、手順をやり直す。

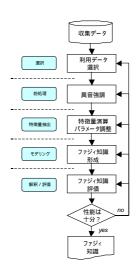


図 2: 異音検査システムの知識獲得手順

[選択]:利用データ選択

収集されたデータの中から知識形成に利用するデータ を選択する。

[前処理]: 異音強調

良品と不良品をより正確に区別できるように、波形データに対してフィルタをかける。

[特徴量抽出]:特徴量演算パラメータ調整

40 種類の特徴量を計算するためのパラメータを調整し、 判定に有効な特徴量を見つける。

[モデリング]:ファジィ知識形成

選択された有効特徴量を使ってメンバシップ関数(以下、MFと表記)を調整し、ファジィルールを定義する。

[解釈 / 評価]:ファジィ知識評価

収集データを用いてファジィ知識を評価し、有効性を検 証する。

#### 2.3 異音検査システムの知識獲得の課題

異音検査システムでは、40 種類の特徴量を使ったファジィ知識の形成、および、最大 8 種類の不良種別の判定を行う。異音検査システムの知識獲得作業者が、検査員と同等以上の性能のよい知識を獲得するには、良品と不良品の特徴を適切にとらえた、高度な分析が不可欠である。

単一の特徴量のみで判定可能な場合は、ある1つの特徴量に着目してパラメータを調整し、その特徴量を使った判定知識を形成すればよい。しかし、単一の特徴量のみで判定不可能な場合は、複数の特徴量を組み合わせて判定知識を形成しなければならない。また、複数の不良種別を判定するには、複数の特徴量を使い分けなくてはならない。

したがって、すべての特徴量に対して、良品と不良品を判定するのに有効なパラメータ調整を行う必要があるが、調整すべきパラメータの数は 100 種類以上に及ぶ。同様に、判定知識を形成する際も、最大 40 種類の特徴量の中から判定に最適な組合せを見つけ出す必要がある。このような広範囲な探索空間の中から最適な知識を見つけられるかどうかは、作業者の分析スキルによるところが大きい。その結果、獲得される知識の性能にばらつきが生じてしまい、安定した性能の知識を獲得することが困難であった。

## 3. 知識獲得ツールを用いた課題解決

### 3.1 ツール導入による課題解決

2.3 で述べた課題を解決するため、

- (1) [前処理] および [特徴量抽出]
- (2) [モデリング]

のステップに対して、以下の 2 つの知識獲得ツールを導入 し、知識獲得作業の一部を自動化する。作業者は、ツール 上で操作を行えば、広範な探索を実行することができる。

#### (1) パラメータ調整ツール

良品と不良品を聞き分けるために有効なすべての特徴量演算を最適にするパラメータ調整を行う。

## (2) ファジィ知識生成ツール

良品と不良品を聞き分けるために有効な複数の特徴 量を最適に組み合わせてファジィ知識を形成する。 図 3 にパラメータ調整ツールとファジィ知識生成ツールの画面を示す。





パラメータ調整ツール

ファジィ知識生成ツール

図 3:パラメータ調整ツールとファジィ知識生成ツールの画面

#### 3.2 期待される効果

ツールを導入することで、次のような効果が期待できる。

### a. 安定した知識獲得

作業者のスキルによらず、どのような検査対象に対して も、安定した知識獲得が実現できる。

## b. <u>知識の性能確保</u>

検査員の判定結果を元に知識を評価するため、形成される知識の性能を確保できる。

#### c. 手戻り作業の軽減

一度に複数の特徴量を最適化して知識を形成するため、試行錯誤の回数が削減できる。

## 4. 知識獲得手法

## 4.1 特徴量演算パラメータ調整の実現方法

波形データとそれぞれのデータに対する熟練者による 判定結果を入力し、良品と不良品を最もよく区別できるように特徴量演算パラメータを調整し、特徴量演算結果を出 力する。パラメータ調整処理の流れを図4に示す。

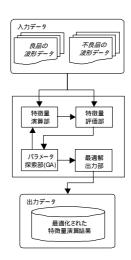


図 4:パラメータ調整処理の流れ

【遺伝的アルゴリズムを用いたパラメータ調整の最適化】すべての特徴量に対する演算パラメータの最適化を実現するために、遺伝的アルゴリズム(以下、GAと表記)を用いたパラメータ探索を行う。GAにより、広範な探索を効率的に行うことができる。ここでは、すべての特徴量を個別に評価するため、特徴量ごとに個体を生成し、特徴量演算パラメータを遺伝子としてコーディングした。

【複数の不良種別に対応したパラメータ調整の評価】 異音検査システムでは、最大 8 種類の不良種別を扱うことで、単なる良品 / 不良品の判定だけではなく、どのような不良であったのかも判定する。つまり、個々の不良種別に対して、それぞれを一意に判定する知識を形成する必要がある。よって、式 1 を GA の個体選択のための評価式として採用し、それぞれの特徴量に対する評価値

#### 各特徴量に対する評価式:

を求めた。

$$V_{i} = \frac{\int_{j}^{N} N_{CLASS} \int_{j}^{j} \left( CLASS_{k\_ave} - ALL\_ave \right)^{2}}{\int_{j}^{k} \left( CLASS_{j\_k} - CLASS_{k\_ave} \right)^{2}} \dots (\vec{\pi}1)$$

 $N_{\mathit{CLASS}}_{j}$  : 第j番目のクラスに含まれるデータ数

 $CLASS_{k\_ave}$  : 第j番目のクラスのデータに対する

----- 特徴量値の平均

 $ALL\_ave$  : 全データに対する特徴量値の平均  $CLASS_{j,k}$  : 第j番目のクラスのk番目データに

対する特徴量値の平均

この評価式では、各クラス間でのばらつきが大きく、かつ、クラス内でのばらつきが小さいほど評価値が高くなる。したがって、後段の[モデリング]での知識形成にも有効な評価指標であると期待できる。

#### 【特徴量間の競合関係を考慮した多目的最適化】

異音検査のように波形データを対象とする場合、これまでに述べた方法では、十分な評価ができない特徴量が存在する。[前処理]で複数の特徴量に対して同一のフィルタをかけて波形を変換した後、それぞれの特徴量に対して [特徴量抽出]を行うことがある。特徴量ごとに最適なフィルタのかけ方は異なるが、検査時間を考慮して、フィルタ処理が共有される(図5)。

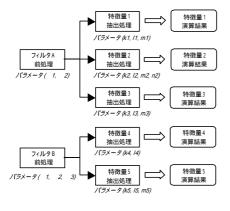


図 5:前処理パラメータと特徴量抽出パラメータの関係

フィルタをかける際に必要なパラメータは、複数の特徴量で共用されるため、特徴量間に競合関係が生じ、ある特徴量の評価値を上げるパラメータ設定が他の特徴量の評価値を下げる場合がある。したがって、同一のフィルタを共有する特徴量は、式2のように重み付き加重和を求め、まとめて評価した。また、各特徴量に対する重み係数も含め、これらの特徴量を1つの遺伝子として、まとめてコーディングした。(図6)。

フィルタを共用する特徴量群に対する評価式:

$$EVAL = w_i V_i$$
 ただし  $w_i = 1$  ... (式2)

 $oldsymbol{V}_i$ : 同一フィルタ内の $oldsymbol{i}$ 番目の特徴量に対する評価値

 $w_i$ : 同一フィルタ内のi番目の特徴量に対する重み  $\begin{pmatrix} 0 & w_i & 1 \end{pmatrix}$ 

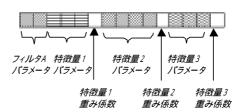


図 6:フィルタを共用する特徴量群の遺伝子コーディング方法

図6のように遺伝子をコーディングすれば、各特徴量に対する重みも GA によって探索することができる。したがって、あらかじめ人手で重みを設定しなくても、式 2 を最大化するための最適な重みへ自動的に近づくと期待できる。

## 4.2 ファジィ知識形成の実現方法

特徴量演算結果を入力し、複数の不良種別を判定するファジィ知識を出力する。ファジィ知識形成処理の流れを図7に示す。

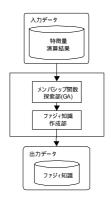


図 7:ファジィ知識形成処理の流れ

## 【複数の特徴量を組み合わせたファジィ知識の形成】

与えられた MF にしたがってファジィ決定木を生成し、最適なファジィルールを求める。ファジィ決定木生成を行うことで、複数の特徴量を組み合わせたルールが作成できる。 MF の最適化には GA を使用した。各特徴量に対して定義される台形 MF の 4 つの座標が遺伝子としてコーディングされており、それぞれの個体ごとにファジィ決定木を生成する。

ファジィ決定木の生成には、ファジィ ID3[9]を利用しており、あらかじめクラスがわかっている教師データを元に、最適な決定木を出力することができる。また、得られたファジィ決定木は、一意にファジィルールへ変換可能である。

#### 【見逃し率·過検出率によるファジィ知識の評価】

ファジィ知識生成ツールでは、熟練者の判定結果を元に評価することで、判定性能を確保する。一般的な判別問題では、性能の評価指標として誤判別率(error rate)を用いることが多い。

異音検査のような検査システムの検査性能は、不良品を 良品と誤判定する'見逃し率 (FNR: false negative rate)'と良品を不良品と誤判定する'過検出率(FPR: false positive rate)'の2種類を区別し、両方の要求を 満たす必要がある(式3,式4)。

見逃し率 (FNR): 過検出率 (FPR):

$$FNR = \frac{N_{NG-OK}}{N_{NG}} \dots (\vec{x}_{NS}) FPR = \frac{N_{OK-NG}}{N_{OK}} \dots (\vec{x}_{NS})$$

 $N_{NG\ OK}$ : 良品と誤判定された不良品の数

 $N_{OK}$  NG: 不良品と誤判定された良品の数

 $N_{NG}$ : 全不良品の数  $N_{OK}$ : 全良品の数

製品検査では、最終検査工程で見逃しが発生してしまうと、不良品が市場に出ることになるため、通常、見逃し率をゼロにすることが求められる。一方、過検出が多くなると、製品の再検査や廃棄にかかるコストの増加を招くため、過検出は最小限に抑えたいという要求がある。これらの要求を満たすため、式5を個体選択のための評価式とした[10]。

ファジィ知識に対する評価式:

FNR : 見逃し率 FPR : 過検出率

eta : 見逃し率の最小化を優先するための重み

 $(0 < \beta \ 1)$ 

ここで、重み を十分小さく設定すれば、見逃し率の最小化を優先し、個体間で見逃し率の優劣がないときのみ、 過検出率が考慮されるので、上記の要求を見たすような 最適化が行われると期待できる。

## 5. 実験

パラメータ調整ツールとファジィ知識生成ツールによる知識獲得手法の効果を検証するため、卓上扇風機の異音から不良種別を判定する実験を行った。

実験に使用したデータ数は、合計 40 件(良品データ 10 件、不良品データ 3 種類、各不良種別につき 10 件ずつ)である。これらすべてのデータを対象にパラメータ調整を実施し、特徴量演算を行った。その後、3 種類すべての不良種別を判定する知識形成を行った。その結果、すべての不良種別を完全に判定するファジィルール(見逃し率 0%,過検出率 0%)を形成することができた。ツールを用いた知識獲得で、検査員と同等の判定性能を実現できることがわかった。

## 6. まとめ

異音検査システムの知識獲得の安定化を目的として、2 つのツールを開発した。これらのツールを使うことで、検 査員と同等の性能を持つ知識を安定して獲得できた。今後 は、実際の検査データに対して、ツールの実用性を検証し ていきたい。

### 【参考文献】

- [1] 入江篤他: 異音検査システムならびに波形解析ソリューションサービス, 第 19 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集(2003)
- [2] http://www.signarc.com
- [3] 熊本浩他:知識獲得作業における課題と考察, 第 13 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集(1997)
- [4] 糀谷和人他: 知識獲得作業の効率化のためのアーキテクチャに関する考察, 第 13 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集(1997)
- [5] 稲葉広典他: 判別問題向け知識獲得環境について, 第 19 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集(2003)[6] U.M.Fayyad, G.Piatetsky-Shapilo, and P.Smyth.:
- [6] U.M.Fayyad, G.Piatetsky-Shapilo, and P.Smyth.: Advances In Knowledge Discovery and Data Mining, AAAI Press/The MIT Press (1996).
- [7] G.Piatetsky-Shapilo: An Overview of Knowledge Discovery in Databases: Recent Progress and Challenges: W.P.Ziarko (Ed.): Roughsets, FuzzySets and Knowkledge Discovery, pp.1-10, Springer-Verlag (1995)
- [8] H.Nakajima: Fuzzy Logic and Data Mining, Proc. Of the 1996 Asian Fuzzy Systems Symposium, pp.133-138 (1996).
- [9] 馬野元秀他: ID3 に基づくファジィ・ル ールの抽出とその推論法, 第 9 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集pp.857-860 (1993)
- [10]糀谷和人他: 検査システム向けファジィ判別知識の生成に関する考察・ファジィ決定木学習と遺伝的アルゴリズムの適用・,第 19 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集(2003)

## 【連絡先】

〒619-0283 京都府相楽郡木津町木津川台9丁目1番 オムロン(株) 技術本部 コントロール研究所 知識制御グループ 稲葉広典

TEL: 0774-74-2018 FAX: 0774-74-2004 E-mail:hironori\_inaba@omron.co.jp

# 新しい知識の生成と利用が可能なコンサルテーションシステム

A Consultation System to Use Generated New Knowledge

時田 洋輔 横井 博一 Yosuke Tokita Hirokazu Yokoi

九州工業大学 大学院生命体工学研究科 Graduate School of Life Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract: A goal of this research is to develop a consultation system as an expert is really consulted. An expert system, which has been studied in the field of knowledge technology, cannot be used as a consultation system described previously because the arranged and fixed knowledge base must be prepared. In order to realize such consultation system, it is necessary to generate new knowledge from the existing one. In case of a human, such intellectual processing is realized in the cerebral neocortex. That organism is ultra large-scale column network, whose basic unit is a column and a multilayered neural network. This network model is useful in generation of new knowledge because advanced generalization function of the learnt column network is expected. Moreover, the learnt column network is represented as knowledge network. Modification of value of parameters enables change of concept or knowledge network. Then, we propose the method for a large-scale column network to learn the declarative knowledge of the expert. Furthermore, we explain how new knowledge is generated through example of the knowledge of a beef bowl and a pork cutlet.

## 1. はじめに

家電製品や情報通信機器の多機能化にともない,機器を十分に使いこなせないユーザが増加している.このため,使い易いユーザインタフェースの研究が盛んになってきた[1].しかしながら,多機能な機器を使い易くするには,インタフェースの改善だけでは解決できない.なぜなら,ユーザは使う前にまず取扱説明書を読まなければならないからである.

一般に,取扱説明書を読むよりも,機器をよ く知っている人や専門家に尋ねたり,相談する ほうが、はるかに簡単に機器を理解したり、操 作方法を習得することができる.これは人間が 質問者に対して、If-Then 形式で答えるのではな く、相手の質問に対して極めて柔軟に対応する ことができ,また,質問内容から「一を聞いて 十を知る」ことができるからである.すなわち, 相談者があらかじめ想定していない質問をして も,あるいは,間違った言葉を用いて質問をし たり,全てを尋ねなくても,適切な回答を与え ることができる.したがって,人間に対するよ うに相談できるコンサルテーションシステムが 実現でき,最終的に全ての機器に内蔵できれば, だれにとっても真に使い易いものとなるである う.また,このようなコンサルテーションシス テムは家庭での料理相談,法律相談,教育相談 等に利用でき,新しい家電製品としても期待で きる.

ところで,知識工学では,専門家の持つ知識 を構造化し,それを利用することにより専門家 のような推論を行うエキスパートシステムが開 発されている.しかし,これは整理され固定化された知識ベースを基に推論が行われ,先に述べたような意味でのコンサルテーションシステムに使うことはできない.あらかじめ想定しいない質問や,一部に間違った言葉を用いたり,中途半端で完全ではない質問に答えるなど、あしい推論パスをたくさん追加するれを支持する必要がある.なぜならる根拠が多くあることを意味し,正しい解であるで、人の推論パスを持つ解は,正しい解である可能性が高いと考えられるからである.と考えられるからである.とが必要になる.

新しい知識を生成するためには,まず人間の 持つ既存の知識を効率的に学習させる方法を検 討する必要がある.人間は,上述のような知的 処理を大脳新皮質で行っており、そこでは多く のニューロンがネットワークを形成している. さらに,このネットワーク内には多くのコラム が形成され,それらが相互作用をしている[2]. 最近では,視覚野や運動野だけでなく,思考な ど高度な働きに関係する領域にもコラムが存在 することが明らかになりつつある.したがって, 人間の持っている既存の知識は、このようなコ ラムを基本単位としたネットワークで学習させ るのが最も適していると考えられる.そこで, 筆者らは,人間の知識構造に合わせて,複数個 のコラムを集めてコラム群をつくり、それによ り超大規模コラムネットワークのモデルを構成 した[3],[4].

このような超大規模コラムネットワークモデルは、新しい知識の生成に有効であると考えられる.なぜなら、人間の持っている既存の知識を学習させた後、高度な汎化機能が期待できるし、ネットワークのパラメータ値を暫時的に変化させれば、概念の変容や知識ネットワークの構造の変容が可能となるからである.

そこで本稿では,新しい知識の生成と利用が可能なコンサルテーションシステムの実現を目的とする.そのための第一歩として,人間の持つ既存の知識を学習させたコラムネットワークが,上に述べた方法によってどのように新しい知識を生成するかを,宣言的知識に関して検討する.そのためまず,本研究で用いる知識構造モデルである知識ネットワーク[5]について構造明する.次に,これを学習させる超大規模コラムネットワークモデルについて述べる.最後に,人間の宣言的知識の学習方法と新しい知識の生成及び利用方法について具体的に示す.

## 2. 知識ネットワーク

人間は,知識を巧妙に構造化し,それを利用することによって知的処理を行っている.その知識構造について様々なモデルが提案されてきた.本研究では,多くの心理学実験によって支持されている知識ネットワークを,人間の宣言的知識の表現として用いる.

図1は知識ネットワークの一つの例を示す.これは,概念をノードとして配置し,一つの概念が他の概念を全て含む上位-下位関係リンクで表わす.また,一つの概念とその属性の関係もリンクで表わす.この図では,動物と鳥が上位-下位関係にあり,飛べる」、羽がある」、クチバシがある」が鳥の属性である.

## 3. 超大規模コラムネットワークモデル

人間の大脳新皮質では,ニューロンが無秩序に分布しているのではなく,機能的に共通する 性質を有するニューロン群が皮質表面から垂直

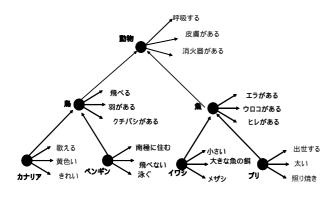


図1 知識ネットワークの一例

方向に,円柱状に集まっている.これをコラムという.このようなコラムは大脳新皮質において規則正しく配列されている.一つのコラムには,1,000個から100,000個程度のニューロンが含まれており,6層構造をしている.

あるコラムが活動すると、その隣のコラムは抑制される。次に、抑制されたコラムを刺激すると、今まで興奮していた隣のコラムが逆に抑制される。このようにコラム同士は相互に作用する。さらに、互いに似た機能を持つコラムは集まって一つの領野を形成する。これらの領野の間では、機能的に下位の領野から上位の領野へ情報が階層的に伝達される。視覚野の場合には、一次視覚野から高次の視覚野へ段階的に情報が伝達される。

図 2 は,超大規模コラムネットワークモデルを示す.このモデルでは,一つのコラム群の中心となるコラムが同じコラム群の他のコラムと結合しており,中心以外のコラム同士は結合しない.さらに,各コラム群の中心コラムはコラム群の外にある中継用のコラムとも結合している.

図3はコラムの構造を示す.コラムは恒等写像を学習する砂時計型の階層型ニューラルネットワークとし,バックプロパゲーション法を用いる.恒等写像を学習させるのは一種のフィルタ効果を得るためである.また,このネットワークの学習能力と汎化能力を向上させるために,各層の間に特殊な介在素子をもうける.

#### 4. 人間の持つ宣言的知識の学習

以上述べた超大規模コラムネットワークモデルに,人間の持つ宣言的知識を学習させる方法について,料理に関する知識を例に説明する.まず,図4に示す知識ネットワークを学習させるとする.この図の中で,「牛丼」の属性は,「茶色」,「塊状」であり,「牛丼」と「牛丼食材」は上位・下位関係にある.また,「牛丼食材」と「牛肉」,「玉葱」も上位・下位関係

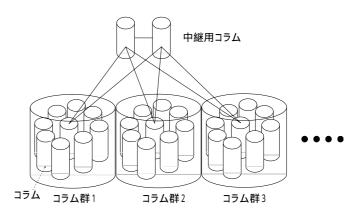
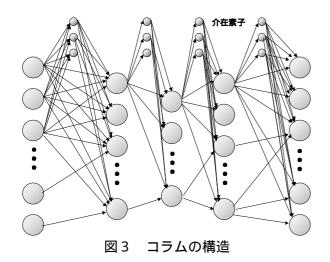


図 2 超大規模コラムネットワークモデル



にある、豚カツについても同様である、

図5は,超大規模コラムネットワークモデルに,図4の知識を学習させた結果である.各概念と属性はランダムパターンで表わされ,それぞれ概念用中継コラムと属性コラムに学習させる.属性コラムは色,形など,それぞれに対応した属性コラム群を形成する.

一つの概念用中継コラムにただ一つの概念だけを学習させると、コラムが多数必要になり、効率が悪い・したがって、一つの概念用中継コラムに複数の概念を学習させる・図では、黒い文字が牛丼に関する概念であり、灰色の斜体文字が豚カツに関する概念である・ただし、牛丼の食材に関する概念である「牛肉」や「玉葱」を同じ概念用中継コラムに学習させる・それぞれ異なった概念用中継コラムに学習させる・

## 5. 新しい知識の生成と利用

図4の知識を持ったエキスパートシステムに, 仮に「豚肉と玉葱で何か料理ができるか」という質問をしたとする.その場合,牛丼に関する知識に「豚肉」がなく,また豚カツに関する知識に「玉葱」がないため,エキスパートシステムは「できない」という回答を出す.しかし,

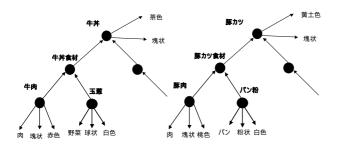


図4 学習に用いる知識ネットワーク

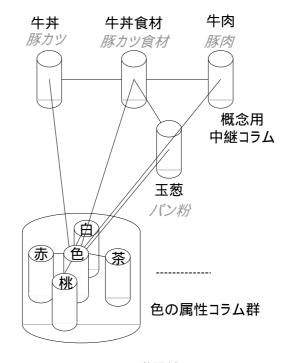


図 5 学習結果

このように知識が不足している場合でも,適切な回答を出さなければシステムとして役に立たない.

そこで、図4の知識を学習させた超大規模コラムネットワークモデルに、「豚肉と玉葱で何か料理ができるか」という同じ質問をしたとする.ただし、ここでは簡単のため「豚肉」が入力されると、その属性である「肉」、「塊状」及び「桃色」が想起される.これらの属性のうちの二つは「牛肉」の属性と同じである.そのため、、乳化機能により「牛肉」が想起される.さらに、「牛肉」が想起されたことにより「牛丼食材」が想起され、続いて「牛丼」が想起される.しかし、「豚肉」だけからは「豚カツ食材」や「豚カツ」は想起されない.

一方,「玉葱」が入力されると,その属性の「野菜」,「球状」及び「白色」が想起される.このうち「白色」が「パン粉」の属性と同じである.しかし,この場合は一致する属性が少ないため、汎化機能が働かず,「パン粉」は想起されない.その結果,「玉葱」からは「牛丼」のみが想起される.したがって,「豚肉」からも「玉葱」からも「牛丼」が想起されるため,「牛丼です」という回答を出す.このようにして,あらかじめ想定していない質問に対しても意味のある回答を出すことができるようになる.

以上のように,「豚肉」だけから「牛丼」が想起されたため,ネットワークのパラメータ値を 暫時変更することにより,「牛丼食材」の下位の 概念として「豚肉」を追加することができる.これにより,「牛丼」という解が持つ推論パスは増え,早く回答できるようになる.この推論パスが定着すれば,ネットワークのパラメータ値を固定すればよい.

一部に間違った言葉を用いたり、中途半端で完全ではない質問に対しても、以上述べたのと同じように、汎化機能を手がかりに、適切な場所に新しい推論パスを追加すれば、望ましい回答を出すことができるようになる. なお、学習後に、ネットワークのパラメータ値を暫時的に変化させ、学習した知識を変容させることも可能であって、新しい知識を生成させることも可能である

本稿では、宣言的知識だけを学習させたが、手続き的知識も今後は必要である.また、知識を扱うので、ファジィ概念も導入しなければならない.さらに、機器へ内蔵するためには、ハードウェア化が必要になる.ただし、配線の複雑化や内部回路の大規模化という問題が生じ、超大規模コラムネットワークのハードウェア化は非常に難しい.そのため、以前著者の一人が提案したフーリエ級数型学習しきい素子Folthret によるハードウェア化が期待される[3]、[4]、[6].

## 6. むすび

本稿では,人間の持つ既存の知識を学習させた超大規模コラムネットワークモデルが,どのように新しい知識を生成するかを,宣言的知識に関して検討した.

すなわち,まず超大規模コラムネットワークモデルに,一例として,牛丼と豚カツに関する料理の知識を学習させた.このとき,概念は概念用中継コラムに,属性は属性コラムにそれぞれ学習させた.

次に,以上述べた知識を学習させた超大規模コラムネットワークモデルに,「豚肉と玉葱で何か料理ができるか」という質問をした場合,汎化機能を手がかりに,どのように新しい知識が生成され利用できるかを示した.

今後の課題は、手続き的知識とファジィ概念の導入である。また、ハードウェア化のために Folthret を利用することも必要である。

## 参考文献

- [1] 石橋洋一,横井博一:長期記憶のモデルを用いた使い易いメニュー選択システム,電子情報通信学会技術報告書, Vol.103, No.465, NC2003-71, pp. 1-6, 2003
- [2] N. D. Cook: The brain code, Routledge Kegan & Paul, 1986

- [3] 時田洋輔,横井博一: ニューラルネットワーク用基本素子 Folthret による超大規模コラムネットワークの大規模化,電子情報通信学会技術報告書, Vol.103, No.466, NC2003-92, pp.71-75, 2003
- [4] 時田洋輔,横井博一:創造機械 クリアトロン,第5回日本知能情報ファジィ学会九州支部学術講演会予稿集,pp.31-32,2003
- [5] M. R. Quillian: Semantic Memory, Semantic Information Processing, MIT Press, pp.227-270, 1968
- [6] H. Yokoi : A fundamental element for neural computer – Folthret , Neuro computing , Vol. 6 , No. 4 , pp. 473-486 , 1994

#### 連絡先:

時田 洋輔

九州工業大学大学院生命体工学研究科

〒808-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-4

Mobile: 090-7133-6508

E-mail: tokita-yohsuke@edu.life.kyutech.ac.jp

## 横井 博一

九州工業大学大学院生命体工学研究科

〒808-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-4

Phone + Fax: 093-695-6045 E-mail: yokoi@life.kyutech.ac.jp

# オブジェクト指向プログラム設計における UML クラス図の自動レイアウト

Automatic layout of UML class diagram in object oriented programming

上原 良史

増永 愛

永松 正博

Yoshifumi Uehara

Ai Masunaga

Masahiro Nagamatu

## 九州工業大学

Kyusyu Institute of Technology

Abstract: Figures or graphs are often used to show information stored or calculated in computes. The UML (Unified Modeling Language) which is used in upstream software development is one of the typical examples. When human draws figures of the UML by hand, he has to consider several constraints which are imposed between components of the figures. This makes the drawing task difficult as the scale of the software becomes large. This is the reason why automatic layout systems are desired and well studied. In this paper we propose an automatic layout algorithm which is based on the constraint satisfaction.

## 1. はじめに

近年 Java をはじめとして、オブジェクト指向開発の流れが加速している。オブジェクト指向開発では再利用性や保守性の向上といった利点があるが、それらの利点を見いだし、かつ効率よく開発を進めるには適切な手法とツールが必要である。このような背景から、ソフトウェアのオブジェクト指向開発の上流工程では UML (Unified Modeling Language)が注目されている。UML はソフトウェアのオブジェクト指向開発の分析・設計の過程で用いられる図形言語であり、9 種類の図形の描き方を細かく規定している。これらの図を人間の手や単なる図形ソフトで描こうとすると、ユーザーには大きな負担がかかる作業となる。これらのことから、オブジェクト指向開発の上流工程を支援するための CASE ツールが開発されている。

しかし、一般に出回っている CASE ツールの UML 図形エディタでは、部品をユーザーの手で一つ一つ配置していくという環境をとっており、UML の図を人間の手で描くためには、それらを描くための「望ましい位置関係」を意識しながら描いていく必要がある。このことはソフトウェアが大規模化するに伴って、UML の図をレイアウトする作業も自ずと大変なものとなることを意味している。また一部の CASE ツールでは自動でレイアウトする機能を備えているが、ユーザーの意志を反映したレイアウト結果が得られなかったり、図が複雑になると見た目に良いレイアウト結果が得られないなどの問題を備えている。

このような背景から、オブジェクト指向開発の上 流工程を図形の自動レイアウトの観点から支援する のが本研究の目的である。

## 2. UML クラス図のレイアウト上の制約

UMLの図の中でもクラス図は、オブジェクト指向開発でよく利用される図であり、開発者間での重要なコミュニケーションツールとなっている。今回は、クラス図の自動レイアウトを例にとって説明する。

クラス図のレイアウトを行うということは、クラス図の描画規則に従ってクラスを望ましい位置に配置、つまり各クラスの (x 座標, y 座標) を適切に指定することである。これまでに作成・利用された多くのクラス図から、作図者が意識してレイアウトしたであろうと思われる各クラスの配置関係がいくつかみられる。それらの配置関係をレイアウト制約として取り入れることとする。図1~7のように、いくつかの配置関係を例にとってそれらの制約を数式として表現すると以下のようなものがある。

## • 各クラスが重ならない

各クラスは互いに重ならないように配置する必要がある。これらの制約を数式で表現すると以下のような不等式の選言になる。

$$(x_1 + \frac{w_1}{2} < x_2 - \frac{w_2}{2}) \lor (x_1 - \frac{w_1}{2} > x_2 + \frac{w_2}{2})$$
$$\lor (y_1 + \frac{h_1}{2} < y_2 - \frac{h_2}{2}) \lor (y_1 - \frac{h_1}{2} > y_2 + \frac{h_2}{2})$$

## ● クラスの継承

クラスの継承は有向エッジを持っており、親クラスは子クラスより上部に配置されるものとする。これらを数式で表現すると以下ような不等式になる。

$$y_1 - \frac{h_1}{2} > y_i + \frac{h_i}{2} \ (i = 1, 2, \dots, n)$$

図2のような場合には、子は親の真下に配置されるものとする。これらを数式で表現すると以下ような不等式になる。

$$x_1 = x_2$$

クラスが複数ある場合には図3のように子クラスが横一列にならび、かつ子クラスのまとまりが親クラスの中心にくるものとする。これらを数式で表現すると以下のような不等式になる。

$$y_1 = y_2 = \dots = y_n$$

$$|x_0 - x_i| < \{\sum_{j=1}^n \frac{w_j}{2}\} + space \ (i = 1, 2, \dots, n)$$

クラスの集約関係も継承と同様に親クラスが 上、子クラスが下になるよう配置されるものと する。

## ● クラスの関連

クラスの関連は無向エッジを持っており、図 4 のようにあるクラスはもう一方のクラスの左右 いずれかに配置されるものとする。これらの関係を数式で表現すると、下記のような不等式の 選言になる。

$$(x_1 + \frac{w_1}{2} < x_2 - \frac{w_2}{2}) \lor (x_1 - \frac{w_1}{2} > x_2 + \frac{w_2}{2})$$

またクラスが複数ある場合には図5のように、 クラスが縦一列にならび、かつ子クラスがまと まって配置されるものとする。これらを数式で 表現すると以下のような不等式になる。

$$x_1 = x_2 = \dots = x_n$$

$$\left| \frac{\sum_{j=1}^{n} y_j}{n} - y_i \right| < \sum_{j=1}^{n} \frac{h_j}{2} + space \ (i = 1, 2, \dots, n)$$

## • 関係のないクラスが入り込まない

レイアウトされた関係の親クラスと子クラスとの間に無関係のクラスが入り込むと、非常に読み取りにくいクラス図となってしまう。このようなレイアウトを避けるために図6のように、レイアウトされた関係のある各クラスの中に他の関係のないクラスが入らないような制約を作成する。これは、図の斜線部分の枠と関係のないクラスが重ならないということと同様となる。

#### ● 各クラスが画面の中に収まる

各クラスは図7のように画面(描画領域)に収まるように配置されるものとする。これらを数式で表現すると以下のような不等式になる。

$$x - \frac{w}{2} > 0$$

$$x + \frac{w}{2} < CanvasWidth$$

$$y - \frac{h}{2} > 0$$

$$y + \frac{h}{2} > CanvasHeight$$

## エッジの長さのばらつきを少なくする

また、図8のように、エッジの長さをできるだけ均一にした方が見やすいレイアウトとなる。

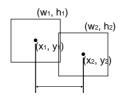


図 1: 各クラスが重ならない

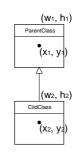


図 2: クラスの継承関係

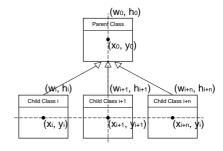


図 3: クラスの継承関係



図 4: クラスの関連関係

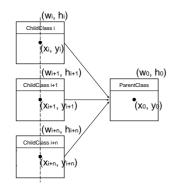


図 5: クラスの関連関係

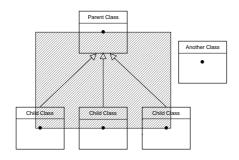


図 6: 関係のないクラスが入り込まない

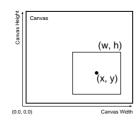


図 7: 各クラスが画面の中に収まる

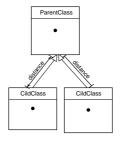


図 8: エッジの長さのばらつきを少なくする

## 3. ラグランジュの方法による制約充足

前項のようにレイアウトの望ましい位置を制約として定義し、それらの制約を効率よく解くニューラルネットワーク (SAT や CSP の解法として提案されている LPPH  $^{[3]}$  と呼ばれる力学系を拡張したもの)を用いて制約解消を行う。本手法ではこれらの制約に対して、制約が充足していない度合い (制約が充足していれば 0、していなければそれらの度合いを正の値で返す関数) $h_r(x)$ 、制約を充足させるた

めに変数を動かす量  $f_{ri}(x)$  を以下のように定義し、式 6 の LPPH のダイナミックスに従って自動レイアウトを行う。

制約 C<sub>r</sub>

制約の集合  $C = \{C_1, C_2, \cdots, C_m\}$  は、線形不等式の不等式の選言からなる。

$$C_r = \{ (EXP_1 \le 0) \lor \dots \lor (EXP_{rl_r} \le 0) \}$$
(1)

• 制約  $C_r$  が充足していない度合い 制約  $C_r$  の  $EXP_{rk}(x) \leq 0$  が充足していない度 合いを  $h_{rk}(x)$  とする。

$$h_{rk}(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} 0 & if \ EXP_{rk}(\boldsymbol{x}) \le 0\\ \frac{EXP_{rk}(\boldsymbol{x})^2}{EXP_{rk}(\boldsymbol{x})} & if \ 0 < EXP_{rk}(\boldsymbol{x}) \le \epsilon \end{cases}$$
(2)

また、制約 $C_r$ が充足していない度合いを $h_r(x)$ とすると以下のようになる。

$$h_r(\boldsymbol{x}) = \min\{h_{r1}(\boldsymbol{x}), h_{r2}(\boldsymbol{x}), \cdots, h_{rl_r}(\boldsymbol{x})\}$$
(3)

 $\bullet$  制約  $C_r$  を充足させるために変数を動かす量

$$f_{rki}(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} 0 & \text{if } EXP_{rk}(\boldsymbol{x}) < 0\\ -\frac{EXP_{rk}(\boldsymbol{x})}{\epsilon} \times \frac{\partial EXP_{rk}(\boldsymbol{x})}{\partial x_i} & \text{if } 0 \leq EXP_{rk}(\boldsymbol{x}) < \epsilon\\ -\frac{\partial EXP_{rk}(\boldsymbol{x})}{\partial x_i} & \text{otherwise} \end{cases}$$

また、制約  $C_r$  を充足させるために変数  $x_{rki}$  を動かす量を  $f_{kr}(x)$  とすると以下のようになる。

$$f_{ri}(\boldsymbol{x}) = f_{r1i}(\boldsymbol{x}) \min\{h_{r2}(\boldsymbol{x}), h_{r3}(\boldsymbol{x}), \dots, h_{rk}(\boldsymbol{x})\}$$

$$+ f_{r2i}(\boldsymbol{x}) \min\{h_{r1}(\boldsymbol{x}), h_{r3}(\boldsymbol{x}), \dots, h_{rk}(\boldsymbol{x})\}$$

$$+ \dots$$

$$+ f_{rl_ri}(\boldsymbol{x}) \min\{h_{r1}(\boldsymbol{x}), h_{r2}(\boldsymbol{x}), \dots, h_{rk_{k-1}}(\boldsymbol{x})\}$$
(5)

以上のことから、以下のようにニューラルネット ワーク LPPH を定義する。ここで  $x_i$  は変数であり 各クラスの  $\mathbf{x}$  座標または  $\mathbf{y}$  座標を表す。また  $w_r$  は 制約 r の重み、 $\alpha$  は重みの減衰率である。

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{r=1}^{m} w_r f_{ri}(\boldsymbol{x}) \tag{6}$$

$$\frac{dw_r}{dt} = h_r(\boldsymbol{x}) - \alpha w_r \tag{7}$$

$$\boldsymbol{x} \in (0,1)^n, \boldsymbol{w} \in (0,\infty)^m$$

これまでクラス図のレイアウトの良さを制約を 定義し、それらの制約を解消するいうことを述べた が、すべてを制約の形で定義してしまうと、厳密にそれらを充足させようとしてうまくいかなくなることがある。これらのことから、以下のように制約を充足させようとする力とは別の、できるだけある好ましいレイアウトに近づけようとする力をバイアスとして導入する。今回の例では、エッジのばらつきを少なくするためにスプリングモデル [2] による力をバイアスとする。

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{r=1}^{m} w_r f_{ri}(\boldsymbol{x}) + bias \tag{8}$$

$$\frac{dw_r}{dt} = h_r(\boldsymbol{x}) - \alpha w_r \tag{9}$$

$$\boldsymbol{x} \in (0,1)^n, \boldsymbol{w} \in (0,\infty)^m$$

## 4. 実験結果

クラス図レイアウト問題を作成し、一般的な CASE ツールのクラス図の自動レイアウトアルゴ リズムとして知られているマグネティックスプリングモデル  $^{[1]}$  と提案手法によりレイアウトを行った。マグネティックスプリングモデルでの描画結果は図  $9{,}11$ 、提案手法によるレイアウト結果は図  $10{,}12$  のようになった。

図 10 の結果において、変数の数は 20 個、制約の数は 160 個である。また、図 12 の結果においては、変数の数は 30 個、制約の数は 271 個である。いずれもレイアウトに要する時間は 3 秒ほどである。

## 5. まとめと今後の課題

提案手法では制約を定義し、それらをラグランジュの手法で制約解消を行うことでクラス図をレイアウトした。制約に従ってクラス図がレイアウトされており、マグネティックスプリングモデルのような従来手法の問題点であった、ある状況下において力が釣り合ってしまいクラスが動かなくなってしまうという点が解消されていることが分かった。また、レイアウトの観点から使いやすい CASEツールにするには、ユーザーの意志をいかにレイアウトに組み込むかが問題となる。その点で、本手法ではUMLのクラス図をレイアウトするのに必要な制約を考慮しやすく、ユーザーの意志を組み込みやすいという点を確認できた。

今後の課題としては、ユーザーとのメンタルマップやインタラクティブ性を考慮し、CASEツールにおいてユーザーの使いやすい環境をどのように本手法に組み込んでいくかが課題である。

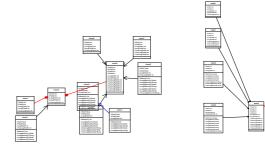


図 9: 従来手法 1

図 10: 提案手法 1

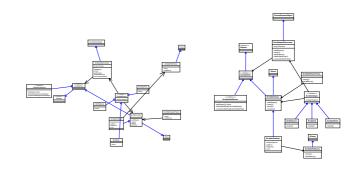


図 11: 従来手法 2

図 12: 提案手法 2

## 参考文献

- [1] T.Noguchi and J.Tanaka, Interactive layout method for object diagrams of omt, Proceeding of Asia-Paci.c Software Engineering Conference(APSEC '99)(1999), 110-117.
- [2] P.Eades, "A heuristic for graph drawing", Congressus Numerantium, vol.42, pp.149-160, 1984.
- [3] M.Nagamatu and T.Yannaru, "Solving SAT by Lagrange Programming Neural Network with Long and Short Term Memories", ch. 11 in "Information Modelling and Knowledge Bases", IOS Press, pp.289-301, 2000.

## 連絡先

上原 良史

九州工業大学 大学院 生命体工学研究科 〒 808-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-6 Tel:093-695-6088

Fax:093-695-6088

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

## TCP シーケンスモデルを用いた異常検出手法の改良

## Improvement of for Anomaly Detection Method using TCP Sequence Model

## 安井 浩之 Hiroyuki YASUI 武蔵工業大学

## Musashi Institute of Technology

We proposed anomaly detection method based on TCP sequence model. TCP sequence model is a fuzzy Markov process model which is made from the time series of TCP packets classified by SOM. For introducing this model into practical IDS, the number of states of TCP sequence model must be small because of real time intrusion detection. In this report, we show an abbreviation method of TCP sequence model and considerate this result.

## 1. はじめに

侵入検出システム(IDS)は、外部ネットワーク(インターネット)に接続された LAN 内のコンピュータやネットワーク機器に対する侵入行為を検出して、LAN 管理者に警報を発するシステムである.通常はIDS と Firewall を併用するなどの多重システムでLAN のセキュリティを高める.

実用化されている IDS の多くは、既知の侵入パターン(シグネチャ)を用いる不正検出(Misuse Detection)型であるが、未知の侵入に対しては有効でないため、異常検出(Anomaly Detection)型が注目されている。本研究では、TCP セッションにおけるパケットの時系列をモデル化したものをプロファイル(通常状態を定義した情報)とする異常検出型 IDS の構築を目的としており、[2]で SOM を用いて量子化した TCPパケットの時系列データをファジィマルコフ連鎖でモデル化した TCP シーケンスモデルを用いた新たな異常検出手法を提案し、異常検出能力を確認している。しかし、本手法を異常検出型 IDS に導入するためには、即時性を考慮する必要があり、現在のモデルをより小さいものにする必要がある.

今回の報告では、異常検出型 IDS への実装へ向け TCP シーケンスモデルを簡略化する手法を提案する.

## 2. TCP シーケンスモデル

TCP の通信は、相手とのコネクションを確立したから開始され、終了するまで同一コネクション上で情報のやり取りを行う.TCP シーケンスモデルはそのセッション中の通信のやり取りを時系列として、ファジィマルコフ連鎖[3]でモデル化したものである.ファジィマルコフ連鎖は、状態遷移をファジィルールと見なした非決定性状態遷移モデルで、ある時刻tにおいて状態 $g_i$ である度合を $\mu^t(g_0)$ 、状態 $g_i$ から $g_i$ 

への遷移の度合を  $R(q_i,q_j)$ とすると、時刻(t+1)に状態  $q_j$ である度合は、次のようになる.

$$\mu^{(t+1)}(q_j) = \bigcup_{i=0}^n R(q_i, q_j) \wedge \mu^t(q_i)$$

多くの異常検出手法は、一定時間における統計的な特徴をプロファイルとするため、即応性に欠ける上、どのセッションが異常の原因となったのか特定することも難しいという欠点を持っているが、時系列モデルをプロファイルとすることで、1つ1つのセッション単位での異常検出が可能となるため、不正検出と同じような即応性も期待できる. [4]のように動的な異常検出に SOM を適用したものもあるが、本手法のようにセッション1つ1つを対象とするものは無い. さらに本モデルでは状態の定義を、SOM を用いて自動的に生成しているため、導入する環境により適したモデルの生成が期待できる.

1 つ 1 つの TCP パケットは、パケットの状態を表す 6 種類のコードビットとセッション開始方向を基準 とした向き、正規化したパケットサイズの 8 次元ベクトルで表現している.いずれの次元も[0,1]の値を とり、経験的に得たパケットサイズの特徴に準じて 21 段階に量子化したものを採用している.

## 3. 簡略化 TCP シーケンスモデル

SOM では隣接するユニットが良く似た、または全く同じ参照ベクトルを持つことも少なくない.これらのユニットをまとめて1つの状態に割り当てることでTCPシーケンスモデルの簡略化を行なう.単純にモデルの各状態の中から参照ベクトルの距離が近いもの同士を集約する手法も考えられるが、TCPシーケンスがモデルに受理されるかどうかは、含まれるパケットが SOM で分類された時点で決定されるの

で、モデルを小さくする以外の効果は得られない. SOM 上で集約する簡略化手法であれば、モデルに受理されるパケットが広がり、誤検出の改善につながることも期待できると予想した結果である.

## 4. 実験

SOM の生成には、SOM\_PAKv3.1[6]を用いた. 縦横同じユニット数の hexagon(4×4~24×24で4刻み、以下 HEX4~HEX24 と呼ぶ)で、1次学習(1000回、 =0.05、近傍半径10)2次学習(10000回、

=0.02、近傍半径 3) で各 10 回の試行をして、もっとも誤差の少ないものを採用している.

学習には、テスト時に用いない 65563 パケットのデータ (1日分の測定データ 1490 セッション分 )を用いた.続いて、学習後の SOM の類似する参照ベクトルを持つユニットの集約を行ない、簡略化 TCP シーケンスモデルを求める.今回は、ユニット数の100%,80%,60%,40%になるようにした.

最後に、8日分のデータを用いてプロファイル(TCPシーケンスモデル)を生成する.ただし、1日ごとに独立したプロファイルを作成するのではなく、前日までのプロファイルを半分にして累積する.こうすることで、常に最新の状態でプロファイルが作成されるだけでなく、過去の情報が減衰的に反映されたプロファイルを作成することができる.

なお今回の実験では、プロファイル作成に充分なデータ数を比較的短期間で確保できる HTTP ポートのみを扱うが、プロファイル期間を延ばすことで FTP や SSH などにも適用可能である.

#### 誤検出テスト

テスト用のデータ (1 日分)を 8 日目のプロファイルに適用した結果を示す.

## 表 1 誤検出率

	HEX4	HEX8	HEX12	HEX16	HEX20	HEX24
100%	0.01%	0.16%	0.42%	0.71%	0.79%	0.82%
80%	0.00%	0.16%	0.32%	0.67%	0.62%	0.44%
60%	0.00%	0.12%	0.12%	0.36%	0.31%	0.19%
40%	0.00%	0.01%	0.02%	0.09%	0.22%	0.01%

#### 異常検出テスト

誤検出テストと同じプロファイルを用い、8 日目の プロファイルに対して、他のサービスポート用のテ ストデータ(1日分)に適用した結果を示す.

表 2 異常検出テスト

nonwww	HEX4	HEX8	HEX12	HEX16	HEX20	HEX24
100%	0.00%	65.98%	62.89%	62.89%	62.89%	62.89%
80%	0.00%	36.08%	60.82%	46.39%	43.30%	44.33%
60%	0.00%	27.84%	54.64%	46.39%	43.30%	40.21%
40%	0.00%	6.19%	30.93%	16.49%	4.12%	4.12%

#### 結果と考察

表 1 より、今回提案した簡略化手法で誤検出率を下げられることが確認できた.また、モデルは状態数が少ないほど誤検出率が低くなることも判った.

一方、表 2 より、異常検出の能力はモデルが大きいほうが優れていることも確認できた.誤検出と異常検出は表裏の関係にあるため、この結果は予想通りといえる.しかし、モデルの元となる SOM の学習初期値が異なるため単純には比較できないが、HEX12 は他と比べても良い結果となっており、一番バランスの取れたモデルであるといえる.

#### 5. まとめ

異常検出のための TCP シーケンスモデルの簡略化 手法を提案し、その効果を確認した.今回の実験で は、HEX12 が最も良いモデルであり、60%程度の簡 略化でも充分役に立つことが明らかになった.

今後は、導入環境に最適なサイズと簡略化の比率を 自動的に決定する手法を検討する必要がある.

#### 参考文献

- [1]安井浩之,川島清幸,松山実:SOM を用いた異常検出型侵入検知システム,第18回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp.95-96
- [2]安井浩之,: 異常検出のための TCP シーケンスモデル, 第 19 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.237-240
- [3] Avrachenkov, K. E., Sanchez, E.: Fuzzy Markov Chains and Decision-Making, Fuzzy Optimization and Decision Making, 1, pp.143-159
- [4] Lichodzijewski, P., Zincir-Heywood, A. N., Heywood, M. I.: Dynamic Intrusion Detection Using Self-Organizing Maps, the 14<sup>th</sup> Annual Canadian Information Technology Security Symposium, CITSS 2002
- [5]Ye, N.: A Markov Chain Model of Temporal Behavior for Anomaly Detection, Proc. of the 2000 IEEE Workshop on Information Assurance and Security, pp.171-174
- [6]http://www.cis.hut.fi/~hynde/lvq/: SOM\_PAK, Neural Networks Research Centre

#### 連絡先

〒158-8557

東京都世田谷区玉堤 1-28-1

武蔵工業大学 情報処理センター 安井浩之

yasui@ipc.musashi-tech.ac.jp

## 状態分類・予測による機器診断システム

## Machine Diagnosis System using a Status Classification and Forecasting

堅多 達也 Tatsuya Katada Hitz 日立造船株式会社

HitachiZosen Corporation

藤吉誠

Makoto Fujiyoshi Hitz 日立造船株式会社 HitachiZosen Corporation

**Abstract**: We proposed the machine diagnosis system using a status classification and forecasting. This diagnosis system has two features, one is a function that can collect and analyze the information of five senses, and judge the status by fusion of the analyzed results, like a human behavior, and another is a function that can make the association rules for judgment by data-mining method. We developed the system that can diagnose the status of oscillating-sieve machine. And we confirmed this system is effective through the experiments.

#### 1 はじめに

プラントの運転においては、運用管理上故障などによるアイドル時間の短縮は重要課題であり、構成する主要機器の設備異常の早期発見による予防保全技術が重要となる。当社では遠隔監視システムの開発・導入を通じて、プラントにおける AOM (After-service, Operation, Maintenance)のあり方を検討し、ユーザーに役に立つ仕組み作りを始めている。それを実現するための1つのアイテムとして、機器診断システムの開発に取り組んでいる[1][2]。本稿では、診断の対象となる機器の運転情報として五感情報を時々刻々と収集し、これらの情報から機器の運転状態を診断する手法について報告する。

#### 2 診断の考え方

本稿における診断とは、機器の運転状態を、 通常の運転状態である正常、 なんらかのトラブルが発生した状態である異常、 正常か異常かはっきりしない状態である異常傾向、のいずれの状態に属しているかを推定することである。

これを実現するための診断アルゴリズムを構築し、 検証のための実験を行っている。次章以降で、アル ゴリズムの詳細、実験内容について述べる。

#### 3 診断アルゴリズム

#### 3.1 五感情報の収集

機器の運転状態を診断するためには、五感情報のうち視覚情報(画像)、聴覚情報(音)、触覚情報(振動)が特に有益と考え、この3つの情報を中心に収集することを考えている。

基本的に、画像はカメラを使って連続静止画像の形で取り込み、例えば特定領域の平均輝度のように静止画を数値化して記録する。また、音と振動はマイクと加速度計を使って計測し、その出力をAD変換によりデジタルデータ化して記録する。

#### 3.2 データ解析

#### (1) 特徴量計算

データ解析として初めに記録したデジタルデータを使って特徴量計算を実施する。特徴量計算は対象の物理的特性を考慮し、時間領域と周波数領域の2つの観点から行なう。この特徴量はデータが記録されるたびに計算され、最終的に収集したデータは特徴量の時系列となる。

#### (2) 時系列解析

次に、得られた特徴量時系列をトレンドとアトラクタの2つの観点から分析する。トレンドは時系列データを時間ごとにプロットしたもの、アトラクタは2次元リターンマップでプロットしたもので、これらから形状や変化のパターンを抽出する。

#### (3) 状態推定

現時刻の状態推定を、特徴量ごとに単独で行なう。この時の推定する状態は、先に述べた通り正常、異常、異常傾向の3つで、現時刻の状態は必ず3つの状態のいずれかに属するものとし、かつ、一サイクルごとに状態移行するものと考える(図1参照)。この考えに基づき予め収集 蓄積したデータにより、トレンド・アトラクタの形状・変化パターンと状態位置・移行との対応付けをルール化した知識ベースを作成しておき、特徴量が計算されるごとにこれを参照することで現時刻の状態を推定する。

なお、予め収集できるデータが正常状態のみで、 異常・異常傾向のデータ収集が不可能な場合は、状態を正常と正常以外の2つとし、正常時のパターンのみを知識ベースとして構築する。

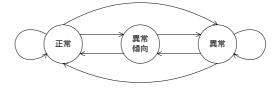


図1 状態分類の概念

#### 3.3 フュージョン・診断

最終的な機器の状態診断は、特徴量ごとの推定結果(各状態に属する確率)を統合して、どの状態に属する確率が最も高いかで判断する。この時の結果統合手法としてニューラルネットを用いる。その際、診断する異常の種類に応じて、予め収集・蓄積されたデータに対しデータマイニング手法により求められた相関ルールに基づき学習されたニューラルネットを使用する。ただし、データマイニングによる相関ルールの導出は、予め異常・異常傾向時のデータを収集できる場合である。

#### 4 実験

上記診断アルゴリズムを組み込んだ機器診断システムの実験として、流動床型ごみ焼却炉の振動ふるい(図2参照)を対象とした状態診断を実施している。

この実験では、五感情報として音と振動を計測している。また、運転時に外乱(異常荷重)を加えることで、異常状態と異常傾向状態を実現している。

図3に実験時の振動に関する特徴量のトレンド推移とアトラクタ形状の一例を示す。また、図4に正常状態と異常状態を交互に繰り返した場合の状態分類結果の一例を示す。この図が示す通り、振動ふるいの異常荷重という状態診断に関しては、正常・異常の診断が本手法により可能であるという結果が得られている。

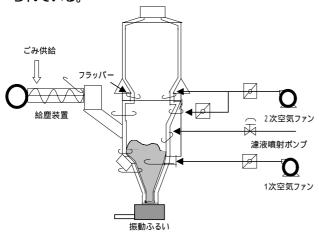


図2 流動床型ごみ焼却炉の機器構成

#### 5 結言

音・振動データを多角的に分析し、結果を統合化することで、計測対象の運転状態を推定するシステムを開発した。実験により、機器の運転状態診断としての有効性を確認することができ、人の状態判断を補助・支援するシステムとして実用化の目処が立った。

今後は、システムの完全自動化のために、画像データの収集・解析や知識ベースの自動学習機能の開発を継続して行なう予定である。

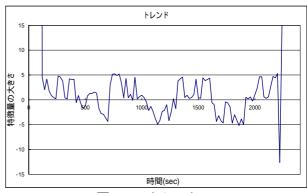


図 3(a) トレンド

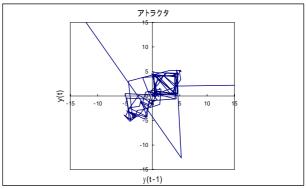


図 3(b) 2次元リターンマップ

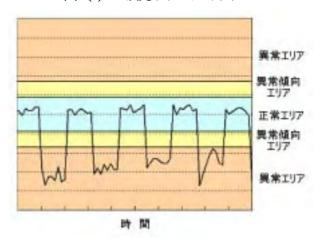


図4 状態分類結果一例

#### 参考文献

- [1] 藤吉誠ほか:RO 海水淡水化設備の遠隔診断システムの開発,日立造船技報,Vol.63, No.3, pp.12-15(2003)
- [2] 堅多達也、藤吉誠:造水プラントにおける遠隔機器診断システム,第19回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp.645-646(2003)

#### 連絡先:

〒551-0022 大阪市大正区船町 2-2-11 Hitz 日立造船(株) 技術研究所 生産技術研究室 堅多 達也

電話: 06-6551-9550 FAX: 06-6551-9876 Email: katada@hitachizosen.co.jp

## 超音波センサを用いた衝突回避のための危険度評価システム Risk evaluation system using ultra sonic sensor for collision avoidance

神酒 勤†

岡本 茂樹 †

Tsutomu Miki

Shigeki Okamoto

† 九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻

Graduate School of Life Science and systems Engineering Kyushu Institute of Technology

**Abstract:** It is important to get the information of surroundings in collision avoidance. We try to get such information with low cost. A risk evaluation system using an ultra sonic sensor for collision avoidance is described in this paper. The proposed system consists of a sensing unit and a risk evaluation unit employing fuzzy inference. In the sensing unit, information, such as its distance, position and

unit employing fuzzy inference. In the sensing unit, information, such as its distance, position and transition angle, about the object can be obtained from detected signals by the ultra sonic sensor and the speed and direction of the object can be calculated by the information. In the risk evaluation unit, human's risk evaluation algorithm can be described by fuzzy inference rule. Finally, the simple and low-cost risk evaluation system can be realized by combining the ultra sonic sensing system and the fuzzy inference.

### 1 はじめに

ロボットや自動車の危険回避行動において周囲の情景を的確に把握することは特に重要である。接近する物体に対する危険を判断する要素として、物体までの距離や移動速度などが考えられる。人間は、これらの情報を総合的に判断し、リアルタイムでの衝突回避を実現している。物体の危険度を評価し、その情報を利用することで、人間のように効率的な衝突回避を行うシステムが実現できると考えられる。本稿では、超音波センサとあいまいな情報の取り扱いに優れたファジィ理論を用いて、物体のもつ危険度を評価するシステムを提案する。本システムは、障害物の持つ危険性に対し、ファジィ理論による人間の「主観」を取り入れた危険度評価システムである。本システムでは、超音波センサの特性を利用し、安価かつ簡易にシステムの実現を目指す。

#### 2 超音波センサを用いた物体情報の抽出

本システムで用いる超音波センサは、1つの送信センサと 2つの受信センサからなる。本システムの構成を図 1 に示す。中央に配置された送信センサから発信された超音波は物体で反射し、その反射波を左右に配置された受信センサで受信する。図 2(a) に受信波形を示す。図 2(a) に示すように、閾値波形の立ち上がりから、最初の受信波形が閾値波形を超える時刻までを時間情報として抽出する。抽出した時間情報から距離 D と、距離 D の単位時間あたりの変化量である距離速度  $V_D$  を算出する。超音波の伝搬速度に比例した基準パルス

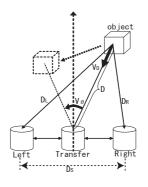


図 1: システム構成

 $1(17.2 {
m kHz})$  を用いて、左右の受信センサから得た時間情報を距離情報  $(D_L, D_R)$  に変換する。変換した  $D_L, D_R$  と左右受信センサ間の距離  $D_S$  から距離情報 D を算出する。

物体がシステムの正面に存在しない場合は、左右受信センサで得られた時間情報に差が生じる。この差は、図 2(b) に示すように、左右受信センサから得た時間情報の exor をとることで抽出する。角度情報は時間差情報に超音波センサの最大検出角度から求めた基準パルス  $2(188 \mathrm{kHz})$  を用いて変換する。角速度: $V_{\theta}$  は、角度情報の単位時間あたりの変化量である。

#### 3 ファジィ理論による危険度の表現

前述の3つのパラメータからファジィ推論[1]を用いて危険度を算出する。危険度が最も高いのは、距離 D、

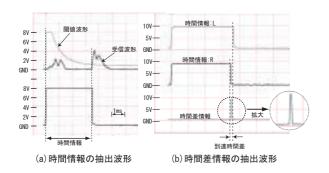


図 2: 超音波センサによるパラメータ抽出波形

V <sub>L</sub>	s	М	L		V <sub>L</sub>	S	М	L	V <sub>L</sub>	s	М	L
s	s	s	М		S	s	М	М	S	М	L	L
М	s	s	S		М	s	М	М	М	М	L	L
L	s	s	s		L	s	s	s	L	М	М	М
(a)距離:	(a)距離:Lのときの危険度マップ					Mのとき	の危険	度マップ	(c)距離:	Sのとき	の危険原	度マップ

図 3: 危険度マップ

角速度  $V_{\theta}$  が小さく、距離速度  $V_D$  が大きい場合であると考えられる。一方、危険度が最も低いのは、距離 D、角速度  $V_{\theta}$  が大きく、距離速度  $V_D$  が小さい場合であると考えられる。これらの特徴を考慮し、人間の主観で記述した危険度マップを距離別 (D=L、M、S) に表す。メンバーシップ関数を図 4 に示す。ファジィ推論法には、Min-Max-重心法を用いた。

上記ルールからファジィ推論により生成される危険度 特性を図5に示す。ここで利用した超音波センサの特性 から、各パラメータは次の範囲となる。

 $0 \le D \le 300, \quad 0 \le V_L \le 6, \quad 0 \le V_\theta \le 600$ 

また、本システムの危険度算出は 1 cycle(20 msec) ごとに行う。

図 5 は、主観で記述した危険度マップを表現している。また、この危険度マップは、ファジィ推論を用いることで、代表ルールのみで全入力空間の特性が内挿されているのがわかる。距離 D に注目した場合、距離が近くなるに従い、危険度が大きくなる。距離速度 D が大きく、角速度 D が小さい場合、すなわち、物体がシステムに向かってくる場合に危険度が大きくなる。また、距離 D が

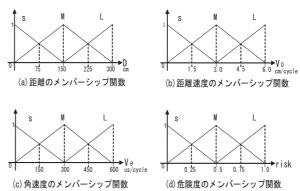


図 4: メンバーシップ関数

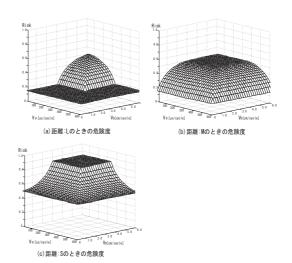


図 5: ファジィ推論による危険度マップ

#### 4 おわりに

本稿では、超音波センサを用い、物体の危険度を評価するシステムを提案した。本システムは、超音波センサの特性を生かし、安価かつ単純なシステムで物体情報の抽出を実現する。また、ファジィ推論を用いることで、人間の危険に対する「主観」を表現することができる。今後は、本システムをハードウェア実装し、リアルタイム処理での危険回避システムの構築を目指す。

#### 参考文献

[1] 本多中二, 大里有生:"ファジィ工学入門 ", 海文堂 (1991)

#### 連絡先:

₹ 808-0196

北九州市若松区ひびきの 2-4

九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻

神酒 勤

 ${\rm Tel/Fax}\ : 093\text{-}695\text{-}6125$ 

Email: miki@brain.kyutech.ac.jp

## RAA における反応時間計測システムの開発

Development of the Reaction Time Measurement System in RAA

橋本智己 浜田利満 赤澤とし子 香川美仁

Tomomi Hashimoto Toshimitsu Hamada Toshiko Akazawa Yoshihito Kagawa

Saitama Institute of Technology Nasu University Nasu University Takusyoku University Takusyoku University

高倉保幸 高橋佳恵 山本満 草野修輔

Takakura Yasuyuki Yoshie Takahashi Mitsuru Yamamoto Shusuke Kusano

埼玉医科大学総合医療センタ 埼玉医科大学総合医療センタ 埼玉医科大学総合医療センタ 埼玉医科大学総合医療センタ Saitama medical centers Saitama medical centers Saitama medical centers Saitama medical centers Saitama medical centers

永沼充木村龍平Mitsuru NaganumaRyuhei Kimura帝京科学大学帝京科学大学

Teikyo University of Science Teikyo University of Science and

and Technology Technology

Abstract: Now, the method of performing simultaneously by the participant in a lot of people as the enforcement method of visited type RAA has been proposed. However, there was some subjects who will be tired if RAA is carried out for a long time. In this paper, we developed a reaction time measurement system. This system presents sound and a vision stimulus to a subject. And a subject's cautions and concentration for RAA are guessed by measuring the reaction time to the stimulus. If this system is applied, the suitable enforcement form (ex., a simultaneous enforcement form, individual enforcement form, etc) of RAA may be able to be classified for every subject.

#### 1. **はじめに**

高齢化社会を考慮して,高齢者を支援する機械システムの実現が期待されている。その例としてロボット・アシステッド・アクティビティ(RAA: Robot assisted activity)が提案されている。RAAとは,複数のペット型ロボットをケアハウス等に持ち込み,30分~60分程度,入居者の方にロボットに触れ合っていただくというものである[1,2]。

筆者らが RAA を実施したところ,長時間の RAA で疲れてしまったり,他の事柄に注意を向けたりする被験者が見られた。そのため,実施時間を短くしたり,小人数で個別に行うなど,被験者ごとに適切な実施形態での分類が望まれていた。しかし,どのような方法で被験者を分類するかはいまだ検討課題であった。

一方,岡田らは,図形認知などの高次脳機能課題に対する反応時間を測定するシステムを提案した[3,4]。提案システムは,モニタ上に図形や数字を表示して,指定された図形が表示された場合のみ被験者にマウスを押させるといった課題を提示した。そして,マウスを押すまでの反応時間を計測することで,記銘力,認知,判断といった被験者の高次脳機能状態を推測した。

ところで,ケアハウス等の訪問先で使用する計測

システムは,特殊な装置を使うのではなく,誰でも簡単に扱えるようなものが望ましい。

本稿では、被験者に対し聴覚・視覚刺激を提示し、 その刺激に対する反応時間を計測することで被験者 の注意・集中力を推測するという、反応時間計測シ ステムをソフトウェアで開発する。

本システムを応用することで,例えば,多人数一 斉実施形態や,少人数個別実施形態など,被験者ご とに適切な実施形態へ分類できることが期待できる

#### 2. 反応時間計測システム

#### 2.1 計測システムの概要

提案する計測システムのクラスは,初期設定として PC ごとの遅延時間を計測するクラス,計測に関するクラス,ファイル入出力に関するクラス,プログラムの起動に関するクラスの4つのクラスで構成されている。

計測システムの操作手順は次のとおりである。

まず、オペレータは PC ごとの遅延時間を計測する。現在、提案システムは Windows OS 上で動作する。この OS は実時間での動作を保証していないため、ハードリアルタイム計測ができない。そのため、計測を始める前にどの程度の計測誤差(遅延時間)が発生するかを調べておく必要がある。

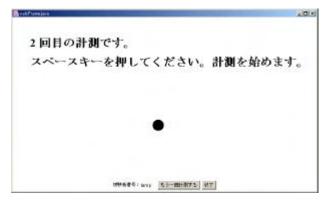


図1:計測を開始した時の画面



図2:刺激を提示した時の画面

次に,001 や 123 といった被験者ごとに決められた被験者番号をオペレータは入力する。システムは,その番号をファイル名として保存する。ファイルは CSV あるいはテキスト形式で保存できるので,後日,市販のアプリケーションソフトで統計処理が可能である。

想定する計測手順は次の通りである。

まず、オペレータは被験者に対し「スペースキーを押して、音が聞こえたり画面に黒い四角が表示されたらキーを離してください」と指示する。被験者がキーを押した後、被験者が注意・集中しやすくするために、システムは黒丸の印を画面上に表示する(図1)。5 秒 ± 2 秒の範囲内でランダムな時間経過後、システムは聴覚(150ms 間の音)・視覚(画面上に黒四角を表示)刺激を被験者に呈示する(図2)。被験者はそれらの刺激を受けたらキーを離す。この「刺激」 「キーを離す動作」の経過時間を反応時間とする。

#### 2.2. 遅延時間の計測結果

どの程度の遅延時間が発生するか 4 台の PC 上で実験した (表 1)。

表 1 に示すように , 個々の PC で遅延時間が異なる。 CPU の処理速度が遅いほど , 遅延時間が大きくなる傾向がみられた。

表1: 遅延時間の計測結果

機種名	OS	最大遅延時間
Libretto ff	Windows98	180ms
Mouse Computer デ スクトップPC	Windows 2000	50ms
MURAMASA MM1	Windows XP	30ms
HP d530デスクトッ プPC	Windows 2000	16ms

#### 3.考察

表 1 で示したように個々の PC によって遅延時間 が異なる。これは , OS がハードリアルタイムを保 証していないことが一因である。

今後提案システムをハードリアルタイム処理できるようにするのが望ましい。

#### 4. おわりに

本稿では,聴覚・視覚刺激を用いた反応時間計測システムを開発した。この計測システムはソフトリアルタイムであった。また PC ごとに遅延時間が異なっていた。今後の課題としてハードリアルタイムができるように修正する必要がある。

#### 参考文献

- [1] 橋本智己,山口亨,宮道壽一:福祉知能ロボットにおける情動指向のマンマシンインタフェース,日本ロボット学会誌,第16巻,第7号,pp.993-1000,1998
- [2] 浜田利満,橋本智己,赤澤とし子,水川真:ペットロボットの福祉・介護への応用に関する検討 ロボット・アシステッド・セラピーの研究 (第1報),第19回日本ロボット学会学術講演会,pp.149-150,2001
- [3] 岡田芳和,島健,山中千恵,豊田章宏,丸石正治:パーソナルコンピュータを用いた反応時間による高次脳機能評価法の開発,脳卒中,第22巻,第2号,pp.307-312,2000
- [4] 丸石正治,島健,岡田芳和,西田正博,山根冠児,真辺和文,豊田章宏,守山研介:高次脳機能課題に対する反応時間の有用性について,脳神経,第48巻,第7号,pp.631-635,1996

#### 連絡先 :

#### 橋本智己

埼玉工業大学工学部情報工学科 〒369-0293 埼玉県大里郡岡部町普済寺 1690 TEL 048-585-6901 FAX 048-585-6901 e-mail:tomomi@sit.ac.jp

## 磁気センサ及び地中レーダー計測情報の効果的表示手法の提案

### Synthetic Display of Measurement Data by Magnetic Sensor and GPR

長谷川泰久 横江和則 福田敏男

Yasuhisa HASEGAWAKazunori YOKOEToshio FUKUDA筑波大学名古屋大学大学院名古屋大学大学院University of TsukubaNagoya UniversityNagoya University

Abstract: In this paper, we introduce asynthetic display of measurement data for land mine detection using a metal detector and a ground penetrating radar (GPR). In order to reduce fault alarm in demining process, a GPR is a promising tool as an additional sensor. When a sensor head of a GPR is raster-scanned precisely by a manipulator system, a buried object shape can be observed in C-scan image. Therefore it is possible to detect a land mine with less fault alarm based on not only metal detection but also object shape. It enables to shorten the demining process. When a land mine is synthetically detected based on two sensors, an synthetic display system is however indispensable, because human can not simultaneously deal with multiple information from sensors. The measurement data are represented in a form that enables an operator to tell a land mine from measured objects. In this paper we therefore propose an synthetic display of measurement data based on C-scan image and on intensity distribution of metal detector, considering qualities of each sensor and then show some experimental results.

Key Words: Ground penetrating radar, SAR, Metal Detector, Sensor Fusion, Mine Detection, C-scan

### 1. はじめに

世界の紛争地域では、現在も約7000万個の未処理の地雷が埋設されており、国連等の援助によって除去が進められている。人道的な地雷除去活動には時間の拘束がない代わりに、100%に近い地雷の処理率が求められている(現在は99.7%).正確をきすために、探知・除去の過程では人の手による地道な活動が主となっており、作業者は危険な環境に身を置き、劣悪な環境下での作業を余儀なくされている。そのため、先端技術を用いたロボットによる地雷探知除去システムが望まれている。

現在、地雷探査に用いられているセンサは主として磁気センサであり、誤探知率が約 99.95%と非常に高いのが問題である。つまり地雷を見逃すことはまれであるが、地雷以外の多くの金属物に反応している[1] [2] [3].そこで本研究では、磁気センサと地中レーダ(Ground Penetrating Radar)を用いることによって得られる複数の探知情報を効率良く表示し、作業者の地雷判定作業の誤探知率を軽減する地雷判定支援システムの開発を目的とする。GPR を用いることにより、従来の磁気センサの使用では得られなかった埋設物の形状や深さ情報を得ることができる。

しかし, GPR の垂直断面表示(B-scan)は一般の人

には判定が困難であるという問題点がある。本稿ではこの問題を解消するために、合成開口処理によりGPRから得られる水平断面表示(C-scan)を使用する。また、GPRによる水平断面表示に磁気センサの強度分布を重ね合わせ、情報を複合的に表示することで、オペレータが正確かつ効率良く地雷判定が可能となる地雷判定支援システムを開発を目的とする。そこで、地雷判定に有効なセンサ情報を選択するルールを導出するために、摸擬地雷を含む7点の対象を砂中に埋設し、GPRと磁気センサを正確に走査し、各深さに対して埋設物の平面形状と強度分布を計測する。その実験結果をふまえて、相補的に磁気センサと GPR のセンシング情報を表示することにより、オペレータの地雷判定作業の効率化を行う。

#### 2.地雷探知システム

図1上に示すようなクレーン車と6軸マニピュレータを搭載した小型車両システム(図2)または図1下に示す X-Y ステージからなる地雷探知システムを開発する.例えば,図2に示した無人小型車両システムでは,地雷を起爆させることなく地雷原を自由に移動が可能となる低接地圧タイヤを装着し,6軸マニピュレータを用いて一体化された磁気センサとGPRの複合センサを精度良く走査する.この走査に

よって計測された情報に基づき,オペレータが埋設された地雷を発見し,地面へ地雷箇所をマークする.本稿では,この地雷探知作業において,オペレータの地雷判定作業を容易にする地雷判定支援システムについて検討する.

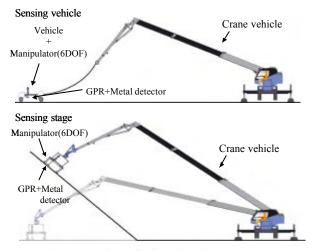


Fig.1 Overview of mine detection systems

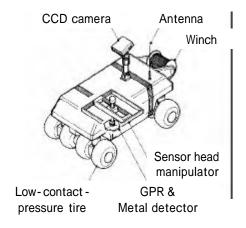


Fig.2 Unmanned vehicle of mine detection system

#### 3. 地雷判定支援システム

#### 3.1 センサフュージョンシステム

センサとしては磁気センサと GPR を用いる .磁気センサは地雷探知の際に,現状で最も一般的に用いられているセンサである.これは探知率が 100%に近く,地雷を見逃すことがないという実績が評価されている.ただし誤探知率が非常に高く,99.95%の割合で地雷以外の金属物を検知してしまうという効率の面から致命的な問題がある.そこで,磁気センサの欠点を補う形で,GPR にて埋設物の形状を推定し,地雷候補の中から地雷だけを選出し誤探知率を軽減を行う.GPR にて C-scan を得る際,合成開口処理を行なうために高精度な位置・姿勢制御が必要となる.また,地面との距離を一定に保ち地面形状に

GPR を追従させないと,地面からの反射波が悪影響を及ぼし,クラッタのなかに埋設物のセンシングデータが埋もれてしまう.そのため,本システムは,6軸アームによって地形適応センシングを行い,そのシステム構成を図3に示す.

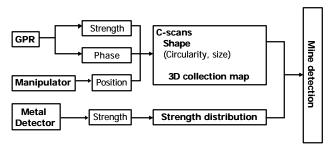


Fig.3 Sensor fusion system

#### 3.2 各センサからの計測情報

#### 3.2.1 磁気センサからの計測情報

磁気センサを金属物周りにおいてラスタースキャンを行った場合,その反応領域は円形状となる(図4左図).この磁気センサの反応領域の半径を反応半径 Ra とし,また,反応強度がある一定値を越えた領域を反応半径 Rb と定義する.この反応領域を地雷判定支援システムにて表示する.

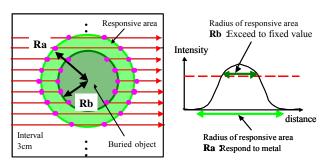


Fig.4 Radius of responsive area

#### 3.2.2 GPR からの計測情報

GPR からの計測情報は 、C-scan によって得られた深さ 、形状(真円度 、大きさ)を用いる[4][5] . C-scan は特定の周波数成分のみを抽出することで得られるので 、使用した周波数毎に計測画像が得られる . 1 つの C-scan から得られる情報は 周波数 埋設深さ 、画像処理の閾値の 3 つのパラメータにより大きく変化する . 埋設されている環境と物体の組成に応じてこれらのパラメータを適切に選ばないと C-scan の像から特徴量をうまく抽出できない . 各値は経験的に与える必要があるが 、本稿では一つのデータについて図 5 に示すような全ての値を網羅する 3D

collection map を作成し,周波数方向と深さ方向の連続性を考慮し,ある条件を満たす最も地雷に近い候補の計測画像を選択して表示する.詳細は,文献[4][5]を参照.

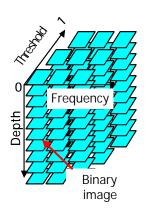


Fig.5 3D collection map

#### 3.3 試験フィールドにおける計測実験

深度に応じたセンサの選択方法の検討を行なうために,磁気及び GPR を用いて,各種埋設物による計測限界深度を求める.磁気センサとしてフェルスター社の MINEX 2FD 4.500を用い,図 6に示す川砂のフィールドにおいて各種金属物質(図 7)の深度を変えて図 8のように計測を行なった.その評価は反応半径 Ra を用い,結果を表 1 に示す.どの模擬地雷も釘やワッシャより反応強度が弱く,例えばType72(金属量 0.4g)模擬地雷では,探査可能深度は約 10cmであった.

一方,GPRを用い,同様の環境にて各埋設物の検出限界深度を計測した.センシング結果を地雷判定支援システムで利用することを想定し,B-scanではなく C-scanにて探査深度の評価を行なった.埋設物深度を 5cm毎に変化させた場合の計測結果を表 2に示す.上記の磁気センサの特性とは大きく異なり,地表面近くの物体は,地表面反射の影響のため検出性能が劣化し,またレーダ断面積が大きい模擬地雷の方がより深い深度まで検出が可能であった.



Test field (Sand)



Burying condition (Sand over a mine is removed)

Fig.6 Test field

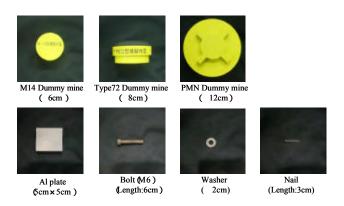


Fig.7 Buried objects

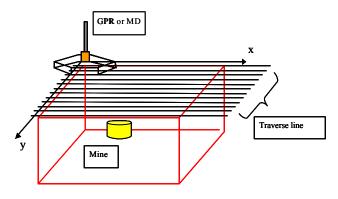


Fig.8 Sensing situation

Table.1 Detection depth of metal detector

Unit cm

Type Depth	M14	Type72	PMN2	Nail(3cm)	Bolt(6cm)	Washer	Al Plate
0cm	1	7 15	16	19	20	20	28
5cm	1	7 13	16	19	19	19	26
10cm	10	10	15	17	18	18	26
15cm	1:	-	12	15	17	14	25
20cm	1:	3 -	9	14	17	12	25
25cm	-	-	-	12	14	-	18
30cm	-	-	-	-	12	-	13

- Non-responsive

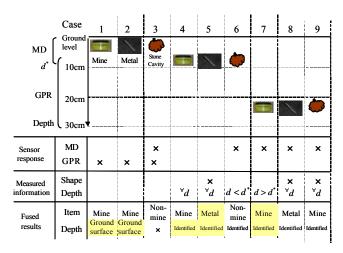
Table.2 Detection depth of GPR

	M14	Type72	PMN2	Nail(3cm)	Bolt(6cm)	Washer	Al Plate
Maximum of detectable depth	25cm	35cm	35cm	5cm	40cm	5cm	45cm

#### 3.4 センサ融合による地雷判定ルール

実験結果から,多数の地中埋設物から地雷を精度 良く選出するには,埋設物の深度に応じて磁気セン サ及び GPR の計測情報を選択的に使用する必要が ある.その使用法を図 9 にまとめる.例えば,地雷 が 10cm程度にある場合(ケース 4)では,磁気センサ と GPR が共に地雷からの反応を検出し,GPR にて 測定された埋設物形状が[4][5]にて述べられた条件 を満たせば,地雷として判定することができる.ま た,その埋設物の深さの情報を得ることも可能であ る.これにより,単に磁気センサを用いた場合と比 較して,

- 地雷候補に関する深さ情報の獲得(ケース 1,2,4,7)
- 2. 深度(5-15cm)における地雷候補の削減(ケース 5)
- 深い深度における地雷候補発見のケース(ケース7)
- の3点について効果が期待できる.



C-scan での検出結果(地表面の粗さに依存)

Fig. 9 Production rule for mine detection

#### 3.5 統合表示システム

以上の実験結果に基づき、GPRによる水平断面表示に磁気センサの強度分布を重ね合わせ計測情報を複合的に表示することで、地雷判定がより正確かつ効率的行うことが期待される。そこで、図10左に示すように、GPRの水平断面表示上にGPRより荒いピッチにて計測された磁気センサの反応エリアRbを重ねて表示することによって、視覚的に地雷を判定することが可能となり、作業者がより判断しやすくなる。

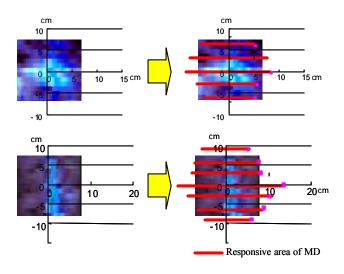


Fig.10 Dual display mode

#### 4. 結論

本論文では,磁気センサおよび地中レーダを用いた地雷判定支援システムを提案し,川砂中に埋設した各種埋設物の計測結果から,オペレータが効率よく地雷を判定できる統合表示システムの検討を行っ

- た. 計測実験結果から
  - ・ 磁気センサは浅い領域のみ有効
  - ・ GPRにより、より深い領域まで探査可能
  - ・ GPRにより,形状及び深さ情報の取得可能

の3点が明確となり,両者の特徴を生かした統合表示ルールの検討を行った。

今後,実際のオペレータによるシステム評価を行う予定である.

#### 参考文献

- [1] GICHD (Geneva International Centre for Humanitarian Demining), Mine Action Equipment: Study of Global Operational Needs, 2002.
- [2] K.A.Moody and J.P.Lavasseur, Current and Emerging Technologies for Use in a Hand-Held Mine Detector, Land Force Technical Staff Course V, Department of Applied Military Science, The Royal Military College of Canada, 2000
- [3] James P. Trevelyan, Technology Needs for Humanitarian Demining, Department of Mechanical and Materials Engineering, the University of Western Australia, February 2000.
- [4] 長谷川泰久、福井猛晴、横江和則、福田敏男、地中レーダによる地中埋設物の推定-反射波形及び 2 次元分布による埋設物の種類の推定-、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003
- [5] T. Fukuda, K. Yokoe, Y. Hasegawa, and T. Fukui "Land mine detection algorithm using Ultra Wide Band GPR" Proceedings of the first international symposium on systems & human science, pp.295-300, 2003

#### 連絡先

長谷川 泰久 筑波大学 機能工学系

〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1

TEL: 029-853-5259 FAX: 029-853-5207 E-mail: hase@esys.tsukuba.ac.jp

## 距離型ファジィ推論法 Part 18

#### 距離型図形推論法

Distance Type Fuzzy Reasoning Method Part 18
Distance Type Figure Reasoning Method

王 碩玉 1)水本 雅晴 2)土谷 武士 3)Shuoyu WangMasaharu MizumotoTakeshi Tsuchiya

1): 高知工科大学 2): 大阪電気通信大学 3): 北海道大学

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

**Abstract**: We propose a distance type figure reasoning method, in order to realize more man-like reasoning. In this paper, the conceptual expression in the feature space is discussed first, and the algorithm and the feature of the distance type figure reasoning method are stated below. The figure reasoning system was developed based on this reasoning method. An experiment of this system shows the feature of the distance type figure reasoning method.

#### 1.はじめに

知識の表現形式としては多種多様であるが、図形による知識表現は推論によく使われている。これは、脳内の知識表現においては、視覚的図形情報が形象的で且つ情報量が多いので、記号情報だけではなく図形情報も非常に重要からである[1]。より人間らしい推論を実現するために、本報告では図形間の距離情報を利用して距離型図形推論法を提案する。

メンバーシップ関数によって描かれたファジィ集合の図形を一般な図形の一種類として捉える場合、今まで提案されている諸推論法<sup>[2]~[5]</sup>は閉区間[0.1]の値を取る横軸上の図形による推論法として考えられる。著者らはファジィ集合間の距離情報に基づいて、距離型ファジィ推論法を提案している<sup>[6]</sup>。本報告では、ファジィ集合だけではなく、空間図形も取り扱えるために、距離型ファジィ推論法の拡張について論じる。まず特徴空間における概念の表現について論じる。次に、図形と特徴空間中のベクトルとの対応関係を利用して、距離型図形推論法を提案する。本推論法が距離型ファジィ推論法の主な特長を継承し、より少ない計算量で推論でき、図形により定量化したあいまいな概念に適用できる。

また、Windows 上で動作可能な距離型図形推論システムを開発した。本システムの特長としては次のとおりである。ユーザの画面操作により、予め与えられる初期図形から様々な概念の表現できる図形を生成することができ、言語ルールを更新するまたは新たな事実を入力される度に、推論結果は画面上でリアルタイムに反映されて、分離規則や漸近特性が満たされることをビジュアル的に確認することができる。従って、本図形推論システムを用いれば、言語ルール及び事実図形はどのように推論結果を左右するかを画面上でビジュアル的に確認しながら、適切な言語ルールを簡単に設定することが可能である。

#### 2. 特徴空間における概念の表現

平面や空間においては、図形の形状や図形の位置など、図形の情報を利用して意味や概念を表すことができる。例えば、図2において、真中の図形は20本の線分を持つ多角形であり、この多角形の線分の座標値を変えることにより、周りの五つの図形に変形することができる。この三つの図形は「動物」「人形」「スター」のような概念をビジュアル的に表現している。そしてこれらの図形の情報(多角形の線分の座標値)を利用して、上述した概念を定量

化することができる。このように、多角形の線分の 座標値は概念を定量化しているので、あいまい概念 の定量化としてのメンバーシップ関数の役割に相当 する。

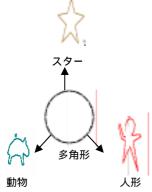


図1 図形による概念表現

図 1 に示す 20 本の線分を持つ多角形は、線分の座標つまり 40 個のパラメータ  $(p_D^1,\cdots,p_D^{40})$  があれば完全に表現され、且つこの図形の特性を表現するにはこれ以上のパラメータが要らない。すなわち、パラメータ  $(p_D^1,\cdots,p_D^{40})$ と 20 本の線分を持つ多角形は一対一の関係にある。

本報告では、平面や空間における図形の特性を完全に表現できる、互いに独立なパラメータを特性パラメータと呼び、特性パラメータと同じ数の独立な変数で構成されたユークリッド空間を特徴空間と呼ぶことにする。そして、ある意味を表す図形を特徴空間へ写像すると、一つのベクトルになる。つまりこのベクトルは元の図形の特性を完全に表現できる。

一般的に $n_s$ 個の特性パラメータを持つ図形集合の全体を $F_s\{p^1,p^2,...,p^{n_s},R^{n_s}\}$ と表す。 $R^{n_s}$ は $n_s$ 個の独立な変数  $p^1,p^2,...,p^{n_s}$ で構成されたユークリッド空間、つまり図形の特徴空間である。ある概念を表す図形は、その特徴空間 $R^{n_s}$ 中のベクトルと一対一である。明らかに、特徴空間 $R^{n_s}$ におけては解析などによる結果は、全く図形を等価的に反映することになる。従って、問題によって図形そのものを直接に研究するより、特徴空間においては議論する方が便利だと考えられる。

#### 3. 距離型図形推論法

#### 3.1 推論アルゴリズム

ここでは下式に示すような $^m$  前件部 1 後件部の $^n$  個推論ルールを考える。

$$R^{i}$$
:  $x_{1} = C^{i1}$ ,  $x_{2} = C^{i2}$ , ...,  $x_{m} = C^{im} \Rightarrow y = D^{i}$   
事実:  $x_{1} = C^{1}$ ,  $x_{2} = C^{2}$ , ...,  $x_{m} = C^{m}$   
結論:  $y = D$  (1)

ただし、 $i=1,2,\cdots,n$ .、 $j=1,2,\cdots,m$ .前件部 $C^{ij}$ 、後件部 $D^{i}$ 、事実 $C^{j}$ 、結論Dは図形集合であり、各自の特性パラメータで表現すると、次のようになる。

$$\begin{split} &C^{ij} = (p_{C^{ij}}^1, p_{C^{ij}}^2, ..., p_{C^{ij}}^{n_{C^j}}) \quad D^i = (p_{D^i}^1, p_{D^i}^2, ..., p_{D^{ij}}^{n_D}) \\ &C^j = (p_{C^j}^1, p_{C^j}^2, ..., p_{C^j}^{n_{C^j}}) \quad D = \left(p_D^1, p_D^2, ..., p_D^{n_D}\right) \\ & \text{もし、} F_{C^j} \Big\{ p^1, p^2, ..., p_{C^j}^{n_{C^j}}, \quad R^{n_{C^j}} \Big\} \text{は} \, n_{C^j} \, \text{次元の特徴空} \\ & \mathbb{B} \, R^{n_{C^j}} \quad \text{における図形集合の全体を、} \end{split}$$

 $F_Diggl\{p^1,p^1,...,p^{n_D}\ , \ R^{n_D}iggr\}$ は $n_D$ 次元の特徴空間 $R^{n_D}$ における図形集合の全体を表すとすれば、前件部図形集合 $C^{ij}$ と事実図形集合 $C^j$ および後件部図形集合 $D^i$ と結論図形集合Dは、次のようにそれぞれ特徴空間にけるベクトルである。

$$C^{j}, C^{ij} \in F_{C^{j}} \left\{ p^{1}, p^{2}, \dots, p^{n_{C^{j}}}, R^{n_{C^{j}}} \right\}$$

$$D^{i}, D \in F_{D} \left\{ p^{1}, p^{1}, \dots, p^{n_{D}}, R^{n_{D}} \right\}$$

$$i = 1, 2, \dots, n. \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

以上のように準備しておけば距離型図形推論法は三つの STEP から構成する。

STEP 1: 特徴空間  $R^{^{n}c^{j}}$  において、j 番目の事実変数の図形集合  $C^{^{j}}$  と、i 番目ルール中の j 番目の前件部変数の図形集合  $C^{^{ij}}$  との距離値  $d\left(C^{^{ij}},C^{^{j}}\right)$ を計算する。

$$d(C^{ij},C^{j}) = \left[\sum_{q=1}^{n_{C^{j}}} \left| \left( p_{C^{ij}}^{q} - p_{C^{j}}^{q} \right)^{p} \right|^{\frac{1}{p}} \right]$$
 (2)

STEP 2 :  $d(C^{ij}, C^{j})$ を用いて、(3 式により事実と各ルールの距離  $d_1 \sim d_n$ を計算する。

$$d_{k} = \frac{\prod_{i=1, i \neq k}^{n} \sum_{j=1}^{m} d(C^{ij}, C^{j})}{\sum_{s=1}^{n} \prod_{i=1, i \neq s}^{n} \sum_{j=1}^{m} d(C^{ij}, C^{j})}$$
(3)

ただし、k = 1, 2, ..., n

STEP 3 : 特徴空間における推論結果の図形集合Dを(4)式で求める。

$$D = [PH]^{T}$$
ただし、  $H = (d_1, d_2, \dots, d_n)^{T}$  (4)

$$P = \begin{pmatrix} p_{D^1}^1, & p_{D^2}^1, & \dots & , p_{D^n}^1 \\ p_{D^1}^2, & p_{D^2}^2, & \dots & , p_{D^n}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{D^1}^{n_D}, & p_{D^2}^{n_D}, & \dots & , p_{D^n}^{n_D} \end{pmatrix}$$

i = 1, 2, ..., n, T: 転置

マトリクス P における列 $(p_{D^i}^1, p_{D^i}^2, \dots, p_{D^i}^{n_b})$  は i 番目のルールの後件部  $D_i$  のベクトルを表し、 $(d_1, d_2, \dots, d_n)$  は事実と各ルール間の距離を表現する。

#### 3.2 本推論法の特徴

定理 1:本図形推論法による推論結果の図形集合 D を表わす特性パラメータが有界である。 具体的には、 $\forall q \in \{1,2,\dots,n_D\}$ に対して

$$\begin{split} p_{q \min} &:= \min \Big\{ p_{D^1}^q, p_{D^2}^q, \dots, p_{D^n}^q \Big\}, \\ p_{q \max} &:= \max \Big\{ p_{D^1}^q, p_{D^2}^q, \dots, p_{D^n}^q \Big\} \end{split}$$

とすれば、(12)式が成立する。

$$p_{q\min} \le p_D^q \le p_{q\max} \tag{12}$$

定理 2: もし、 $\exists k \in \{1,2,...,n\}$ 、 $\forall j \in \{1,2,...,m\}$ に対して  $C^j = C^{kj}$  であれば、 $\forall q \in \{1,2,...,n_D\}$ に対して等式  $P_D^q = P_{D^k}^q$  が成り立つ。すなわち、推論結果について  $D = D^k$  となり、分離規則を満たしている。

定理 3: 推論結果について、  $\exists k \in \{1,2,...,n\}$ 、  $D = D^k$  である場合、もしベクトル  $(P_{D^1} - P_{D^k})$ 、  $(P_{D^2} - P_{D^k})$ 、...、 $(P_{D^{k-1}} - P_{D^k})$ 、 $(P_{D^{k+1}} - P_{D^k})$ 、...、 $(P_{D^n} - P_{D^k})$  が線形独立であれば、 $\forall j \in \{1,2,...,m\}$  に対して与えられた事実について  $C^j = C^{kj}$  でなければならない。

定理 4: もし、後件部  $D^1 \sim D^n$  がすべて正規なファジィ集合であれば、本推論法により推論された結果 D も正規なファジィ集合となる。

定理 5: もし、後件部  $D^1 \sim D^n$  がすべて凸なファジィ集合であれば、本推論法により推論された結果 Dも凸なファジィ集合となる。

#### 4. 図形推論システムの構成及び実験

本推論法に基づいて Windows 上で動作可能な図 形推論システムを開発した。

システムの表示画面は二つのビューに分けられる。 前件部と事実の図形は左側のビューに、後件部と推 論結果の図形は右側のビューに表示される。このシ

ステムでは、ユーザが初期図形の形状を操作するこ とにより、様々な概念を表現する図形を生成するこ とができる。具体的な操作は次のように行う。円形 の場合、マウスで円周を引っ張ることで円の大きさ を変えられ、円心を引っ張ることで円の位置を移動 することができる。シングルトン、三角形、四角形、 多角形の場合、図形の辺をマウスで引っ張ることで 図形全体を移動でき、図形の頂点をマウスで引っ張 ることで図形を変形することができる。また、言語 ルールを更新したい場合は、事実図形を動かさずに、 上述した機能を用いて、前件部または後件部の図形 を移動したり変形したりすることにより行う。新た な事実を入力したい場合は、前件部と後件部の図形 を動かさずに、事実の図形を移動したり変形したり することにより行う。推論結果としての図形は、言 語ルールを更新する又は新たな事実を入力する度に、 本図形推論法に基づいて推論され、且つリアルタイ ムで表示される。

この図形推論システムを利用して、言語ルールにおける前件部と後件部の図形が与えられるものとして、事実の図形を変えるたびに、推論結果の図形がどのように変化するかを確認する実験を行った。その実験結果を図3(a)~(d)に示す。またこの図形推論に関する言語表現はそれぞれ図の右側に示している。

#### 5.まとめ

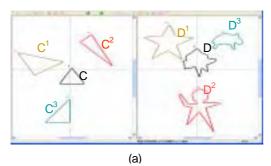
本報告では、まず特徴空間における概念表現について論じ、次に図形間の距離情報、図形と特徴空間中のベクトルとの対応関係を利用して、距離型図形推論法を提案した。また、本推論法に基づいてWindows上で動作可能な図形推論システムを開発した。この推論システムを利用して実験を行うことにより、距離型図形推論法の特徴を示した。

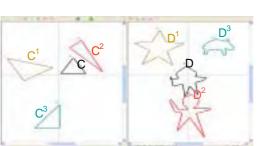
〒782-8502 高知県香美郡土佐山田町宮ノ口 185 番地 高知工科大学工学部知能機械システム工学科 王 碩玉

TEL: 0887-57-2306 FAX: 0887-57-2320

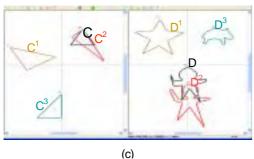
E-mail: wang.shuoyu@kochi-tech.ac.jp

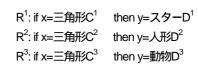
http://www.mech.kochi-tech.ac.jp/staff/wang/index.html





(b)





事実:x=三角形C

結論: y = 図形D

R<sup>1</sup>: if x=三角形C<sup>1</sup> then y=スターD1 R<sup>2</sup>: if x=三角形C<sup>2</sup> then y=人形D2 R<sup>3</sup>: if x=三角形C<sup>3</sup> then y=動物D3 事実: x= C<sup>2</sup>に近づいた三角形C

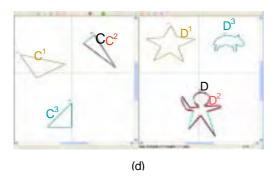
結論:

y= D<sup>2</sup>に近づいた図形D

R<sup>1</sup>: if x=三角形C<sup>1</sup> then y=スターD1 R<sup>2</sup>: if x=三角形C<sup>2</sup> then y=人形D2 R<sup>3</sup>: if x=三角形C<sup>3</sup> then y=動物D3 事実: x= C<sup>2</sup>に重ねた三角形C

結論:

v=少し人形らしい図形D



R<sup>1</sup>: if x=三角形C<sup>1</sup> then y=スターD R<sup>2</sup>: if x=三角形C<sup>2</sup> then y=人形D2 R<sup>3</sup>: if x=三角形C<sup>3</sup> then y=動物D3 事実:x=C<sup>2</sup>と同じ形をした三角形C

結論:

y =人形 $D^2$ 

図2 人形の図形になるための図形推論過程

#### 参考文献

- [1] 西田豊明、安西祐一郎 編: 特集「図による推論」、人工 知能学会誌 Vol.9, No.2(1994)
- [2]E.H.Mamdani:Applications Algorithms Fuzzy for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, Vol.121, No.12, pp.1585-1588(1974)
- [3] T.Takagi and M.Sugeno: Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control, IEEE Transaction on SMC, Vol.15, No.1, pp.116-132(1985)
- [4] 前田幹夫,村上周太:自己調整ファジィコントローラ、計 測自動制御学会論文集, Vol.24,No2, pp.191-197(1988)
- [5] 水本雅晴:ファジィ推論(2), 日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.3, pp.35-46, 1992
- [6] 王碩玉, 土谷武士, 水本雅晴: 距離型ファジィ推論法、バ イオメディカル·ファジィ·システム学会誌、 Vol. 1, No.1, pp.61-78(1999)

## ペトリネットによるMLSの準最適発火系列について

## Quasi-Optimal Firing Sequence of MLS by Petri net

松尾一輝\* 椎塚久雄\*

Kazuaki Matsuo and Hisao Siizuka \*工学院大学大学院工学研究科情報学専攻 \*Informatics, Kogakuin University Graduate School

## Abstract

In a present informationalized society, the leakage of the secret data becomes a major issue in the enterprise. The thing with a low sense to the information security of the manager who treats data is enumerated in the background where these problems occur. And it is also true that it is difficult to make it defend data from others and use easily. In this paper, the idea of MLS is introduced into the modeling tool of Petri net. It aims to construct the model that doesn't ruin the confidentiality when the system and the business system are constructed. It is important to find the structure with the weakness to damage the confidentiality in the MLS Petri net model.

#### 1. はじめに

現在,企業や組織及び個人において,電子情報 を扱ことが多く存在している.これは、パソコン の普及によるものであるが、電子情報のやり取り の方法として、フロッピーディスクやコンパクト ディスクなどのメディアに記録し, 直接的に取引 きする場合や、インターネットなどのネットワー クを用いて間接的にやり取りする場合などがあ る.これらは、従来の紙を使うやり取りに比べと ても便利で扱いやすいが, その反面, 情報の漏洩 や改竄といった危険性にさらされる事にもなる. つまり相手にアクセスされたくない部分にまで 侵入される可能性があるという事である. ここで 重要になってくるのがセキュリティの問題であ る. 最近では大手企業などの顧客データ漏洩事件 をニュースでよく耳にするが、これらの原因には 技術的なセキュリティ対策の問題よりも,機密デ ータへのアクセス権の設定が曖昧だったなど,シ ステム管理者の怠慢によって社内外からのアク セスを許してしまうような場合が殆どである. し かし, 実際完全なセキュリティはありえないとも 言われています. これらのことから, 情報セキュ リティポリシーに対する関心が高まっている.

本論文ではペトリネット (Petri net) を用いて信頼性のある業務セキュリティの構築について考察する. その際にマルチレベルセキュリティ (MLS) を適用して情報の流れを制御し、業務遂行やシステム構築における脆弱性を見つけだし、より機密性の高いネットを構築するためのネット

理論的アプローチを提案する.

## 2. ペトリネット

ペトリネットは、多くのシステムに適用可能なグラフィカルで数学的なモデル化ツールであり、並行的、非同期的、分散的、並列的、非決定的、確率的な動作を特徴とする離散事象システムを、記述・研究するツールとして、フローチャートやブロックダイヤグラム・ネットワークと同じように、システム構造の可視的な表現手段として、ペトリネットを使用することができるだけでなく、ペトリネットの中でトークン(token)を使用することにより、システムの並行的でダイナミックな事象をシミュレートすることができる.一方、数学的なツールとしては、システムの挙動を表現する状態方程式や代数方程式その他の数学モデルを立てることが可能である.

ペトリネットは図1のように記述をし、トークン(●)がネット内を動き回る事で、システムの並行的でダイナミックな事象をシミュレートすることができる.ペトリネットの推移はトランジション(┃または□)の発火(事象の実行)によって行われる.発火の規則としては、条件を現すプレース(○)の中に条件の成立を表すトークンが存在しているかどうかによる.あるプレースから伸びるアークと呼ばれる矢印の重みの分のトークンがプレース内に存在する場合のみ、そのアークの指すトランジションは発火することが出来、トランジションから伸びるアークが指すプレ

ース内にトークンをアークの重みの分だけ置く. ここで示すペトリネット図の例では図1の(a) を初期状態として、トランジションの発火により、 (b)、(c)と推移していき、最終的には(a)に 戻るという動きを繰り返す.

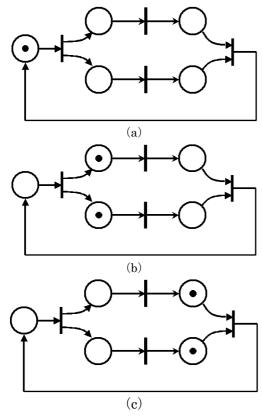


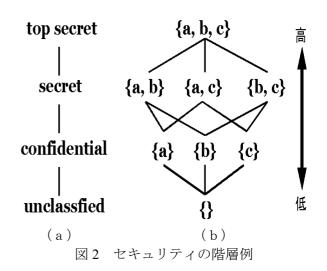
図1 ペトリネットの発火系列

## 3. マルチレベルセキュリティ (MLS)

あるシステムや事象,物事を実行する際には, 実行を行う物や人(主体・subject)と,それによって生まれる生成物(客体・object)が存在する. この主体と客体の流れを制御するために考えられたのがMLS(Multilevel Security)である.これは,主体と客体がお互いにアクセスをするのを多層的または多次元的なアクセス権によって制御するもので,アクセス制御と言い,主体や客体にそれぞれに異なるセキュリティレベルを割り振り,そのレベルの大小によって主体や客体が持つ権限を制御する.つまり「どの主体が,どの対象物をどのように操作できるか」を正確に規定する事が重要となる.

主体と客体に割り振られるセキュリティレベルには特定の順序がある. 例えば top secret, secret, confidential, unclassified といった4段階の割り当てをする. ここでは, セキュリティレ

ベルの高い順に top secret > secret > confidential > unclassified  $et{b}$  されは各レベルが線形になっていて、図  $et{b}$  にあたる.また、条件の組み合わせによってセキュリティレベルが変わる図  $et{b}$  のような考えかたもある.この例でもわかるように、レベルには必ず最上端のレベルと最下端のレベルが存在する.



主体と客体の関係を形式的に定義したものを セキュリティポリシーモデルという. このモデル の定義には幾つかあるが、本研究では情報のアク セス制御について考えるので、機密性を重視した Bell-LaPadula モデルを用いる. このモデルは多 階層セキュリティ (multilevel security) として も知られており、階層で区分された情報間におい て、「情報が下へ流れない」ことを、その基本条 件としたものである. 例えば、図3に示すように、 4 つのレベルを考える. そのレベルは、区分外 (Unclassified) から始まって、秘 (Confidential)、 極秘 (Secret)、機密 (Top Secret) まである. Bell-LaPadula モデルのアクセス制御ポリシーは 単純であり、どのユーザも、自分自身が割り振ら れたレベルと同等か、それ以下の区分の文書を読 むことができる. つまり、「機密」文書を扱うこ とができるユーザは「極秘」文書も読むことがで きるが、その逆は許されない. Bell-LaPadula モ デルの基本は、「情報が下へ流れない」ことであ り、情報は上へしか移動しないことである. 権限 をもつ人が秘密区分を変更しない限り、決して情 報が下方へ移動することはない.



図 3 Bell-LaPadula モデル

Bell-LaPadula モデルでは、これらの情報フローを2つの単純な属性で定義している.

# ○単純セキュリティ特性 (simple security property)

どの主体も高位のデータを読んではならない. これを NRU (no read up) と呼ぶ.

#### ○スター特性(\*-property)

どのサ主体も低位にデータを書き込んでは ならない. これを NWD (no write down) と呼 ぶ.

## 4. MLS のペトリネットへの適用

本研究はペトリネットにマルチレベルセキュリティ (MSL) の考えを導入するものである. 実際の業務などを進めるにあたって、どういったルールを設ければ、セキュリティレベルを保ったまま安全に業務が遂行されるのかを考える.

MSL を導入したペトリネットによりモデル化された業務の流れのことをワークフローと呼ぶ. そして, そのワークフローは, 制御フローとデータフローという2つのフローから成っている. 簡単な例として, あるデータ(客体)を修正し, その修正されたデータをさらに再修正するというワークフローをペトリネットで表すと図4のようになる. これは, 制御フローのみから成る図である.



ここで、p1, p2, p3 はそれぞれ条件であるプレースを表し、t1, t2 は事象の実行を表すとランジションで、それぞれ t1 はデータの修正、t2 はデータの再修正を行うことを表している.

ここで問題となってくるのが,データの機密性である.図4のモデルではデータを扱う対象が誰であるか定められておらず,関係ない第三者に利

用されてしまうような事も考えられる. ここで, MLS の考えをペトリネットに適用して, データへのアクセスを制御するようなモデルを考えてみる. 図 4 のモデルに MLS を適用したモデルを図 5 に示す.

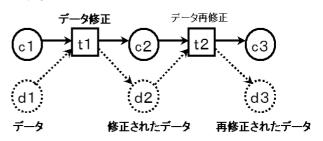


図5 MLSペトリネットモデル例

図5では、図4の制御プレース部分(実線部)に加え、データプレースとなる点線部が付加されている。制御プレースが業務の流れを制御するのに対して、データプレースは扱うデータやフローの実行によって出来る、生成物へのアクセスを制御するものである。

実際の制御は、各データにレベルを与えることで、そのデータへのアクセス制限を行うのである。そのレベル付加の条件として、Bell-LaPadula モデルを用いることにする。ここでは、簡単のためにレベルの段階を H (High), M (Middle), L (Low)の3段階とする。

まず, トランジション t1 においてデータ修正 を行う際に, データ d1 にレベル M が付加されて いた場合, Bell-LaPadula モデルの単純セキュリ ティ特性によって, 自分が割り当てられた区分の レベルと同等か、またはそれ以下のレベルの区分 のデータしか扱うことが出来ないので、ここでは、 レベルが M か H の人のみデータ d1 にアクセスす ることが出来る.これによって、アクセス権をも たないレベルがLの人からのアクセスを防ぐこ とができる. そして次に、修正されたデータの書 き出しだが、一般的に修正等で手が加えられたデ ータは、その機密性が保たれるか、さらに重要な 極秘データとして扱われる場合が多い. Bell-LaPadula モデルでは、このことをスター特 性として定義していて, どの主体も自分より低位 にデータを書き込んではいけないということか ら,ここでは修正されたデータのレベルは, M の ままか, 新たに H に書き換えられることになる. 以後, 同様にしてデータの再修正(t2)を行う際 には、修正されたデータ d2 のレベルが M であれ ばレベルが Mか Hの人のみ行うことが出来, d2 のレベルが L になっていれば、データの再修正は

レベルが H の人のみが行えることとなる. これによって, 重要な情報ほど機密性が高まるようなワークフローの構築が出来ることになる.

## 5. MLSペトリネットの考察と課題

図 6 のモデルをデータへのレベルの付加によって推移する木構造で表したものが、図 7 である. 各  $(1) \sim (7)$  のノードは上段が左からコントロールプレース c1, c2, c3 を表し、0 の場合はトークンが存在せず、1 の場合は存在します。また、下段は左からデータプレース d1, d2, d3 を表し、各レベルとして L, M, H が割り当てる。そして、Bell-La Padula モデルを適用した際に条件を満たしていれば推移可能であり、実線の矢印で表される。単純セキュリティ特性とスター特性の両方もしくは、いずれかに違反している場合は、推移不可能ということで、点線の矢印で表されている。またこの例では、図のノード (1) においてデータ d1 の初期レベル割り当てを M としている.

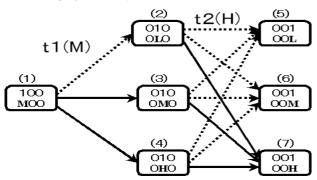


図 6. MLSペトリネットモデルの可達木構造

図 7 を見てわかるように、この場合、ノード(1) からスタートして、木の終端まで到達可能なフローは(1)  $\rightarrow$  (3)  $\rightarrow$  (7) と(1)  $\rightarrow$  (4)  $\rightarrow$  (7) の 2 通りであることがわかる.

図7の例では構造が単純なので、木構造で表さなくてもどのようにレベルを付加していけばよいか分かりますが、これが大きなシステムや複雑な業務形態の客体へのレベル割り当てを行う際には最適レベルの割り当て方が容易になる.

そして、これからの課題として、以下の点が挙 げられる.

(1)本研究はシステムや業務の遂行において、機密性を損なわないような業務形態を考える. MLS ペトリネットモデルにおいて、機密を保つためにはあってはならない構造または機密性を損ねないような構造を発見しなければならない. そのために、いくつかのペトリネットモデルを考 察しながら、Bell-LaPadula モデルに反してしま うような規則を見出していく.

(2)図6から見ても分かる通り、このモデルの場合は、終端まで到達できるフローが2通り存在している.しかし、本来最適な発火系列は1つであるのが理想であり、解が複数存在してはどのフローを適用してよいか判らなくなり、曖昧なものとなってしまう.また、最適解とは別に終端まで到達可能なフローが存在すると、他のフローを不正に利用され、逆に機密性を損ねてしまう可能性もある.こういったことから、機密性が保たれるフローが複数存在する場合でも、その中から最も条件の良いフローを導くような構造を考察する.

(3) あるモデルを木構造で表したとしても、Bell-LaPadula モデルの条件を満たさず、終端まで到達するフローが存在しない場合が考えられる.この場合、Bell-LaPadula モデルに違反した箇所が少ない部分を見つけ出すなどして、その部分の構造の条件を変えることで機密性を保つことが出来ないかを、考察する必要がある.この場合、違反箇所が少ないからといって、そのフローが他のフローよりも機密性を損ないにくいと考えることは、一概には出来ないという問題も生じてくる.

## 6. まとめ

ペトリネットに MLS を導入することで、機密性を考えた業務のモデル化を行うことが出来る. 今後は、MLS ペトリネットの構造を解析し、機密性を損なわないような、構造の発見に重点を置いて研究を進めて行く予定である. その場合、あいまい構造の発見と取り扱い法が重要な課題となろう.

#### 参考文献

[1] 椎塚久雄: "実例ペトリネットーその基礎からコンピュータツールまでー", コロナ社, 1992

[2] Konstantin Knorr: Multilevel Security and Information Flow in Petri Net Workflows http://www.ifi.unizh.ch/~knorr/

#### 連絡先:

東京都新宿区西新宿 1-24-2

工学院大学工学部情報工学科数理情報研究室

Tel: 03-3340-2971

E-mail: shiizuka@cc.kogakuin.ac.jp

## 可能性分布を含むデータを入力できる自己組織化マップについて

#### Self-Organizing Map that Can Input Possibility Distributions

馬野 元秀<sup>†</sup> 松尾 明尚<sup>‡</sup> 山脇 伸行<sup>‡</sup> Motohide UMANO Akihisa MATSUO Nobuyuki YAMAWAKI

† 大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科

Department of Mathematics and Information Sciences College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

‡近畿大学 生物理工学部 電子システム情報工学科

Department of Electronic System and Information Engineering Faculty of Biology-Oriented Science and Technology, Kinki University

**Abstract** Methods of classifying automatically data of multi attributes are studied. SOM (Self-Organizing Map) by T. Kohonen is one of such methods. This method is only applicable to numeric data but not to ambiguous data. We express ambiguous data as possibility distributions and propose the SOM that can input possibility distributions. And we compare the method with the conventional one.

#### 1. はじめに

複数の属性からなる入力データを教師なしで自動的に分類するさまざまな手法が研究されている。このような手法のひとつに T. Kohonen の自己組織化マップ SOM (Self-Organizing Map) がある [1],[2]。しかし、これは数値データに対しては適用できるが、我々がふつうに取り扱っているあいまいなデータに対しては適用できない。そこで、あいまいなデータを可能性分布 [3] として表現し、自己組織化マップに可能性分布を入力できるようにした。そして、これと従来の方法との比較を行った。

#### 2. 自己組織化マップ

T. Kohonen の自己組織化マップ SOM [1] は、さまざまな多次元のデータを予備的な知識なしで分類できるもので、図 1 のように入力層と出力 (競合) 層の 2 層から成っている。入力層は出力層のすべてのユニットと結合していて、 出力層はユニットが 2 次元平面上に格子状に配置されている。

1つのn次元の入力データ $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$ が提示されると、出力層のユニット $\mathbf{m}_i = (m_{i1}, m_{i2}, \cdots, m_{in})$ のうちで、そのデータに距離が一番近いユニット $\mathbf{m}_c$ を見つける。このとき、 $\mathbf{x}$ と $\mathbf{m}_i$ との距離を $|\mathbf{x} - \mathbf{m}_i|$ で表すと、

$$|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{m}_c| = \min_{i} |\boldsymbol{x} - \boldsymbol{m}_i| \tag{1}$$

となり、 $m_c$  は勝者ユニットと呼ばれる。このとき、 距離としてユークリッド距離

$$d = |\mathbf{x} - \mathbf{m}_i| = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (x_j - m_{ij})^2}$$
 (2)

が用いられる。

そして、出力層において勝者ユニット  $m_c$  のまわりに近傍領域  $N_c$  が定義される。その形としては正方形や六角形が用いられるが、ここでは正方形を用いる。

近傍領域内のユニットは、時刻 t における値  $m_i(t)$  と入力ベクトル x(t) を用いて

$$\boldsymbol{m}_i(t+1) = \boldsymbol{m}_i(t) + \alpha(t) \{ \boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{m}_i(t) \} \quad (3)$$

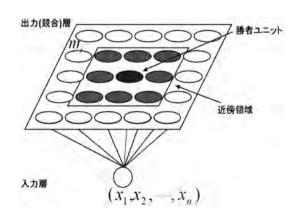


図 1: 自己組織化マップ

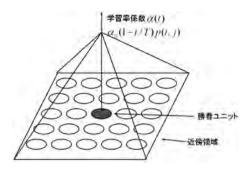


図 2: 学習率係数 (四角錐型)

に従って更新される。ここで、 $\alpha(t)$  は学習率係数で、 $0 \le \alpha(t) \le 1$  であるので、ユニット  $m_i$  は入力ベクトルの方向に  $\alpha(t)$  分だけ動くことになる。これをすべての入力データに対して繰り返し行う。さらに、 $\alpha(t)$  は学習回数が増えるにつれて減少するとともに、図 2 のように勝者ユニットが一番大きくなるような四角錐型になっており、次の式 (4) で定義される。

$$\alpha(t) = \alpha_0(1 - t/T) \ p(i,j) \tag{4}$$

ただし、 $\alpha_0$  は $\alpha(t)$  の初期値であり、 $0.2\sim0.5$  の値を選ぶのが普通であり、T は最大学習回数で、p(i,j) は四角錐型の関数で、

$$p(i,j) = \{(-|i|/d+1) \land (-|j|/d+1)\} \lor 0 \quad (5)$$

と定義される。  $\land$  は min を、 $\lor$  は max を表し、d は近傍領域の大きさを表すパラメータで、勝者ユニットの上下左右の d 個分が近傍領域に入ることを表し (図 2 の場合は d=2 となる)、(i,j) は勝者ユニットを (0,0) と考えたときの格子座標を表す。

さらに、近傍領域は最初は大きくとっておき、時間とともにその領域を狭くしていく。そして、最後には勝者ユニットのみを学習させるようにする。その結果、値がよく似た入力ベクトルに対する勝者ユニットは、出力ユニット上での距離が近くなる。

表 1 [2] を入力として実際に分類を行うと、図 3 のようなマップが作成される。このときの条件は、ユニット数を  $10 \times 10$ 、ユニットの属性の初期値を  $0 \sim 1$  の乱数、学習回数を 1000 回、学習率係数の 初期値  $\alpha_0$  を 0.6、近傍領域を表すパラメータ d を、学習回数が  $0 \sim 10$  のとき 5、学習回数が  $10 \sim 20$  のとき 4、学習回数が  $20 \sim 30$  のとき 3、学習回数が  $30 \sim 40$  のとき 2、学習回数が  $40 \sim 50$  のとき 1、学 習回数が 50 以上では 0 とする。

表 1: 動物とその属性

性	催	属性2	属性3	属性4	順性5	属性后	属性7	属性8	<b>應性</b>	属性10	性	<b>属性</b>	属性	属性14	版性15	性 16
	小さい	* <	大きい	夜行性		4本足	体毛あり	黵	たてかみ	羽毛あり	編あり	狩猟	走る	飛ぶ	泳で	草食性
111	1	0	.0	0	10	0	0	0	0	di	0	0	0	1	0	0.5
メンドリ	1	0	0	0		0	0	0	0	1.7	0	0	0	0	0	0.5
カモ	-1	0	0	0	11:	0	0	0	0	1	0.3	0	0	1	1	0.5
ガチョウ	1	0	0	0	1.	0	0	0	0	1.1	0	0	0	1=	1	0.5
フクロウ	-t	0	0	1		0	0	0	0	-1	0	1	0	1=	0	. 0
タカ	1	0	0	0	1.1	0	0	0	0	. q	0.	1.	0	1	0	0
ワシ	0	4.	0	0	100	0	0	0	0	4	0	1	0	0	0	0
キツネ	0	1.1	.0	0.5	0	T.	1	0	0.	.0.	0.	î.T.	0	0	.0	0
12	0	1.1	0	0	0	1.	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
オオカミ	0	.1	0	1	0	1.1	1	0	1	0	0	-1	1.	0	0	0
ネコ	-1	0	0	0.5	-0	-1-	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
トラ	0	.0	-1-	0.5	0	-1	1.	0	-0	0	-1		1.	.0	0	0
ライオン	.0.	0	11	0	0	1	11	0	1.	0	0.	1	1	.0	0	0
ウマ	0	0	1.2	0	0	t.	1	1	1	0	0	0	11	0	0	11
シマウマ	0	0	OF.	0	0	T	1	1	T.	0	TL	0	of the	0	0	100
ウシ	0	0	1.1	0	0	100	11		0	0	0	0	0	0	0	T.

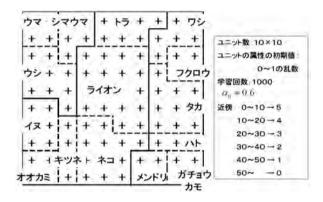


図 3: 2 次元 SOM マップ

図3は学習後の出力層を図示したもので、破線と実線で囲まれたところが各動物の領域を表している。そして、その中で各動物との距離が最も近いユニットにその動物名を書いている。

#### 3. 可能性分布を入力できる自己組織化マップ

表1では、「大きさ」について属性として「小さい」、「中くらい」、「大きい」を考えて、それぞれに対して成立すれば1、成立しなければ0としていたが、表1の「ハト」の属性「小さい」が1であるということは、「ハトは小さい」ということを表している。

この「ハトは小さい」という表現は、ハトの「大きさ」という属性の値について「小さい」という以上の情報が得られていない状況であると考えられる。そして、このときの「小さい」は1つの値ではなく、値となり得る可能性の分布として考えることができ、「ハト」は属性「大きさ」の値として可能性分布「小さい」をとると考えることができる[3]。可能性分布は値が存在している可能性のある範囲を度合付きで表す方法で、あいまいなデータに対するファジィ論的な解釈の仕方の1つであ

表 2: 動物とその属性



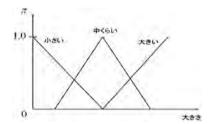


図 4: 三角型可能性分布

る。したがって、表2のように、「大きさ」という 属性を考えて、「小さい」、「中くらい」、「大きい」 をそのまま値として入力できるようになる。ここ では、簡単化のために可能性分布として図4のよ うな三角型を用いる。

#### (1) 勝者ユニットの見つけ方

従来の SOM では二つの数値の間の距離を求めていたが、可能性分布を入力できる SOM では二つの可能性分布の間の距離を考えなければならない。そこで、図 5 のように x を入力データ、 $m_i$  を出力層のユニットとし、それぞれ n 個の属性をもち、各属性の値は三角型の可能性分布となっているとする。

まず、各属性ごとの2つの可能性分析  $t(a_{ij},b_{ij},c_{ij})$ と  $t(d_j,e_j,f_j)$ の距離を考える。これは2つの可能性分析の形が同じとき、すなわち、 $a_{ij}=d_j$ ,  $b_{ij}=e_j$ ,  $c_{ij}=f_j$  のときに距離が0になればよいので、3次元座標  $(a_{ij},b_{ij},c_{ij})$ と $(d_i,e_i,f_i)$ の距離を考えればよい。ここでは代表的な距離として

$$d_{ij}^{M} = |a_{ij} - d_{j}| + |b_{ij} - e_{j}| + |c_{ij} - f_{j}|$$
 (6)

$$d_{ij}^{E} = \sqrt{(a_{ij} - d_{j})^{2} + (b_{ij} - e_{j})^{2} + (c_{ij} - f_{j})^{2}}$$
 (7)  
を考える。これらは、それぞれマンハッタン距離

とユークリッド距離と呼ばれる。 各属性の値の距離  $d_{ij}$  が求められたので、n 個の

属性全体の距離を求める。これもマンハッタン距

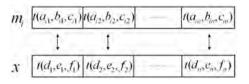


図 5: 距離の求め方

離とユークリッド距離が考えられるので、

$$d_i^M = \sum_{j=1}^n d_{ij} \tag{8}$$

$$d_i^E = \sqrt{\sum_{j=1}^n d_{ij}^2} (9)$$

を考える。この距離が一番小さいユニットが勝者 ユニット $m_c$ となる。

#### (2) ユニットの学習

勝者ユニットとその近傍のユニットの値が、入力の可能性分布の値に近くなるように学習すればよいので、可能性分布の3つのパラメータa、b、cに式(3)を用いればよい。すると、図6のように入力データに近づくことになる。

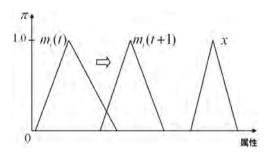


図 6: 可能性分布の学習の仕方

#### (3) 2次元 SOM マップの作成

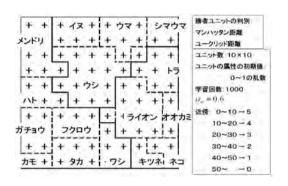
表 3 は表 1 をもとにして、入力データを可能性分布にしたものである。ただし、値の範囲を  $0\sim10$  に変更してある。また、t(0,0,0) や t(10,10,10) のように 3 つのパラメータが同じものは、それぞれ通常の値 0 と 10 を表すと考える。これを入力として実際に分類を行うと、図 7、図 8 のようなマップが作成される。図 7 は、各属性の可能性分布の距離にマンハッタン距離を用い、全体の距離にユークリッド距離を用いている。図 8 は、各属性の可能性分布の距離にユークリッド距離を用い、全体の距離にスンハッタン距離を用いている。パラメータは 2 節の通常の 8 SOM の場合と同じものを用いた。ただし、ユニットの属性の初期値は  $9\sim10$  の乱数を 3 つ発生させ、小さいものから順に a,b,c とした。

属性1 属性2 属性4 4本足 属性5 属性7 属性8 属性10 属性11 属性13 属性14 大きさ 夜行性 体毛あり 有蹄類 たてがみ 羽毛あり 走る 草食性 2本足 締あり 狩猟 t(0,0,5) t(10,10,10) t(0,0,0) t(10,10,10) t(0,0.0) t(0,0,0 t(0,0.0) t(10,10,10) t(0,0,0) t(0,0,0 t(0,0,0) t(0,0,0 t(0,0,0) メンドリ ((0,0,5) t(0,0,0) t(10,10,10) t(0,0,0) t(0,0,0) t(0.0.0) t(0,0,0) t(10,10,10) t(0,0,0) t(0,0,0) t(0.0.0) t(0.0.0) t(0,0,0) カモ t(0,0,5) ガチョウ t(0,0,5) t(10,10,10) t(0,0,0) t(0.0.0) t(10.10.10) t(0.0.0) +(0.0.0) t(0.0.0) 1(0.0.0) t(10 10 10) t(1.3 5) t(0.0.0) t(0.0.0) t(2.5.5.7.5) t(10,10,10) t(0,0,0) t(0,0.0) t(0.0.0) t(10,10,10) t(0,0,0) t(0,0,0)t(0,0,0) t(0,0,0) t(0.0.0) t(10,10,10) t(10,10,10) t(2,5,5,7,5) フクロウ t(0,0,5) t(5,10,10) t(10,10,10) t(0,0,0) t(0,0,0) t(0,0,0 t(0,0,0) t(10,10,10) t(0,0,0) t(10,10,10) t(0,0,0) t(10,10,10) t(10,10,10) t(0,0,0) t(0.0.0) t(0,0,0) t(10,10,10) t(10,10,10) t(0,0,0) t(10,10,10) t(0,0.0) t(0,0,0) t(10,10,10) t(0,0,0 t(10.10.10) t(0.0.0) タカ t(0.0.5)t(0,0,0) t(2.5.5.7.5) t(0.0.0) t(10,10,10) t(0,0,0) t(0.0.0) t(0,0,0) t(0.0.0) t(10.10.10) t(0.0.0) t(10.10.10) t(0.0.0) t(10.10.10) t(10.10.10) t(0.0.0) キツネ t(2.5,5,7.5) t(2.5,5,7.5) t(0,0,0) t(10,10,10) t(10,10,10) t(0,0,0) t(10,10,10) t(0,0,0) t(0,0,0) t(0,0,0) t(0,0,0)t(0,0,0)t(0,0,0) t(0,0,0) t(2.5,5,7.5) t(0,0,0) t(10,10,10) t(0,0,0) t(10,10,10) t(10,10,10) t(0,0,0 t(0,0,0 t(0,0,0) オオカミ t(2.5.5.7.5) t(5.10,10) t(0,0,0) t(10,10,10) t(10,10,10) t(0,0,0 t(10.10.10 t(0.0.0) t(0,0,0) t(10,10,10) t(10,10,10) t(0,0,0) t(0.0.0 t(0.0,0) t(0,0.5) t(2.5,5,7.5) t(0.0,0) t(10,10,10) t(10,10,10) t(0,0,0) t(0,0,0) t(0,0,0 t(0,0,0) t(10,10,10) t(0,0,0) t(0.0.0) t(0.0.0) t(0.0.0) t(5,10,10) t(2,5,5,7,5) t(0,0,0) t(10,10,10) t(10,10,10) t(0,0,0) t(0,0,0) t(0,0,0) t(10,10,10) t(10,10,10) t(10,10,10) t(0,0,0) t(0.0.0) t(0.0.0)

t(10,10,10) t(0,0,0)

t(0.0.0)

表 3: 動物とその属性の値(可能性分布)



t(0,0,0)

t(0,0,0)

t(0.0.0)

t(0.0.0

t(10,10,10) t(10,10,10) t(0,0,0)

t(10,10,10) t(10,10,10) t(10,10,10) t(10,10,10) t(0,0,0)

t(10,10,10) t(10,10,10) t(10,10,10) t(10,10,10) t(0,0,0)

t(10.10.10)t(10.10.10)t(10.10.10)t(0.0.0)

ライオン t(5,10,10) t(0,0.0)

シマウマ ((5,10,10) ((0,0,0)

t(5,10,10) t(0,0,0)

t(5,10,10) t(0,0.0)

図 7: 可能性分布を入力できる 2 次元 SOM マップ

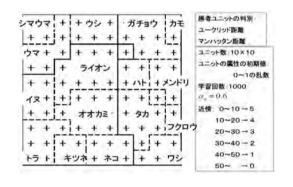


図 8: 可能性分布を入力できる 2 次元 SOM マップ

#### (4) 従来の方法との比較

出力層のユニットの属性の初期値が乱数なので、一概には言えないが、属性が大きさ以外よく似ているタカとワシは、従来のSOMより可能性分布を入力できるSOMの方がより近くに集まって分類されている。つまり、属性の値を可能性分布として表現し、まとめることによって、従来のSOMより可能性分布を入力できるSOMの方がより近くに集まって分類されていることがわかる。しかし、比較についてはさらに検討が必要である。

#### 4. おわりに

t(0,0,0)

t(0,0,0)

t(0.0.0)

t(0,0,0)

t(0,0,0)

t(10,10,10) t(0,0,0)

本研究では、あいまいなデータを可能性分布として表現し、自己組織化マップに可能性分布を入力できるようにした。そして、これと従来のSOMで得られた分類結果との比較を行った。今後は、これを種々のあいまいなデータの分類に応用していく予定である。

t(10,10,10) t(10,10,10) t(0,0,0)

t(0.0.0)

t(10,10,10) t(0,0,0)

t(10,10,10) t(0,0.0)

t(0.0.0)

t(0,0,0)

t(0,0,0)

t(0.0.0)

t(0.0.0)

t(0.0.0)

t(10,10,10)

t(10,10,10)

t(10.10.10)

## 参考文献

- [1] T. Kohonen: Self-Organizing Maps, Springer Series in Information Sciences (1995). (訳) 徳高 平蔵、岸田 悟、藤村 喜久郎: 自己組織化マップ、シュプリンガー・フェアラーク東京 (1996)
- [2] 徳高 平蔵、岸田 悟、藤村 喜久郎: 自己組織化 マップの応用 多次元情報の2次元可視化、海 文堂(1999)
- [3] L.A. Zadeh: Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility, Fuzzy Sets and Systems, Vol.1, pp.3–28 (1978). (訳) 市橋 秀友: 可能性理論の基礎としてのファジィ集合、菅野 道夫、向殿政男(監訳): ザデー・ファジィ理論、日刊工業新聞社、pp.243–271 (1992)

[問い合わせ先]

**〒**599−8531

堺市学園町 1-1

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科

馬野 元秀

TEL: 072–254–9675 FAX: 072–254–9930

E-mail: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

## 改良型遺伝的プログラミングを用いた 肝胆嚢疾患データベースからの複数の診断規則の抽出

# Extraction of Diagnostic Rules from A Database on Hepatobiliary Disorders Using An Improved Genetic Programming

原章

市村 匠

高濱 徹行

磯道 義典

Akira Hara

Takumi Ichimura Tetsuyuki Takahama

Yoshinori Isomichi

広島市立大学 情報科学部 知能情報システム工学科

Department of Intelligent Systems, Hiroshima City University

**Abstract:** In this paper, we describe the knowledge acquisition from data containing multiple rules. For this purpose, we propose a new method using an improved Genetic Programming method, Automatically Defined Groups (ADG). ADG has been proposed in order to generate effective heterogeneous agents. It can optimize both group structure of agents and each group's rule. By using this method, clustering of data is performed by the sharing of roles among agents, and each agent takes charge of rule extraction in the assigned data. As a result, all rules are extracted by multi-agent cooperation. We applied this method to the medical data, and developed a diagnostic system for hepatobiliary disorders.

#### 1. はじめに

近年,情報技術の進歩により,病院での患者の診断結果がデータベースに蓄えられている. データベース中の大量のデータから有効な診断規則を発見することは,医療の支援や科学的根拠に基づく医療の実現に向けて重要である.

これまで、大量のデータからのルールの抽出 は、できるだけ多くのデータを満足さられて うな一般的なルールの抽出に焦点があれて きた、そのルールを満たさないデータは、イイ ズや例外として切り捨てられることも多いなかし、人のを扱う医療分野では、一般の患者ののは当ななものには当ないがないなる。これできる知識も必要となる。そこで本の思者を見落とすことなど治療できる。かどで本のまのとなる。そこのようが研究では、データ中に存在する複数のルールく、そのものを理解しやすい形で抽出、ルールそのものを理解しやすい形で抽出、こから新たな知見を得ることも目指す。

本論文では、肝胆嚢疾患データベースからのルール抽出を扱う・ルール抽出手法には遺伝的プログラミング(Genetic Programming; GP)[1]を用いた・データベースから複数のルールを抽出するためには、同一の性質を持つ部分データ集合を発見するクラスタリング処理と各クロング処理とらのルール抽出を行わなければならい・本研究ではこれをマルチエージェントはアプローチにより実行する・データはエージェント群により部分データ集合に分割される・これがデータのクラスタリングに相当する・また各エージェントは自らが担当した部分データ集合が満たすルールを生成する・これが各クラスタからの

ルール抽出に相当する.エージェント群の協調により全てのルールの抽出が可能となる.この方法を実現するためには,データベースに内在するルール数や,各エージェントへのデータの割り当て方法をあらかじめ知らなければならない.この問題を解決するため,本研究では,効率的なマルチエージェント集団を生成するための手法である自動グループ構成手法(Automatically Defined Groups; ADG)[2]を利用する.

#### 2. 自動グループ構成手法 ADG

ADG は、GP を改良した手法であり、エージェント群のグループ化および各グループの行動規則の最適化を行うことができる.各エージェントは異なる行動をとることが可能であるため、高度な協調動作を実現できる.また同一の行動規則で構わない一部のエージェント群はグループ化し、そのグループに対する 1 つの行動規則を最適化することにより、探索領域を抑えである.とにより、探索を行うことが可能である.問題解決に必割分担数やどのエージェントが同じ役割分担数やどのエージェントが同じ役割っているかを容易に判断できる.有力のできる.

- 1. 問題解決に必要なグループ(役割分担)数
- 2. 各エージェントが所属するグループ
- 3. 各グループのプログラム

ADGはデータベースからのルール抽出にも応用が可能である[3][4]. 各グループは全データにおける部分データ集合に対するルール抽出を担当する. 複数のグループの協調により, データ

ベースに内在する複数のルールの抽出が可能となる.また,グループ化を行う際に,エージェントの負荷の均一化や予測精度を考慮することで,信頼性の高いルールを持つグループほど多くのエージェントが所属するようになる.本手法により,データベース中に存在する複数のルールおよびその優先度が同時に獲得できる.

ADG のアルゴリズムを以下に示す.全エージェントからなる1つの集団を GP の1個体とみなす.この1個体は複数の木を持ち,各々の木は異なるグループのためのプログラムとなる.ここでは,同じ木を参照するエージェントの集合をグループと定義する.

GP の初期集団の生成時には,各 GP 個体中のエージェント集団はランダムにグループ分けされる.図1に GP1 個体が4エージェントからなる場合の個体集団の概念図を示す.

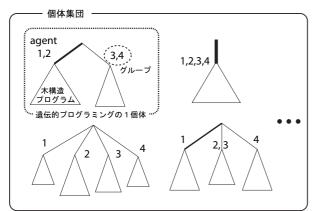


図1.ADGにおける個体集団の概念図

交叉は同じエージェントが参照する木同士で行うが,その木を参照するエージェント集合の関係に応じて,グループの分割や統合が発生するように設定する.具体的な手順は次のとおりである.まず交叉する 2 つの親個体に対し,エージェントを 1 つ選択する.各個体において,そのエージェントが参照する木が交叉に使用される.この木を各々T, T'とする.また木Tを参照するエージェント集合をA(T)とする.交叉の際,2 つの集合の関係に応じて,以下の3種類のいずれかの処理を行う.グループの分割・統合が発生する例を図 2 に示す.

**(type a)** A(T) = A(T') ならば ,グループ構造は変化せず , そのまま交叉を行う .

(type b)  $A(T) \supset A(T')$  ならば, $A(T) \cap A(T')$  であるエージェントによって参照される木だけが交叉に使用されるように,T を持つグループを分割し,その後交叉を行う.

(type c)  $A(T) \not\subset A(T')$  かつ $A(T') \not\subset A(T)$  ならば, $A(T) \cup A(T')$  であるエージェントが同一

の木を参照するようにグループの統合が発生 し,その後交叉を行う.

このような交叉を用いて世代交代を繰り返すことにより,探索が効率的に進み,適切なグループ構造が獲得できると期待される.

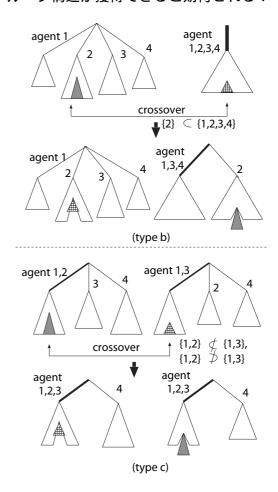


図 2 . ADG における交叉の例

## 3. 医療データへの ADG の適用

#### 3.1. 肝胆嚢疾患データ

ここでは,肝胆嚢データベースからの知識獲 得を扱う.肝胆嚢疾患は,アルコール性肝疾患, 原発性肝癌,肝硬変,胆石症の4つに分類され る .データベースには ,各患者の GOT (glutamic oxaloacetic transaminase), GPT (glutamic pyruvic transaminase)などの 9 種類の血液検査 結果と診断(分類)結果が格納されている.こ のデータの例を表 1 に示す.本研究では,この データベースから診断規則を学習し,診断結果 が未知の患者の 9 つの検査データを与えられた 時に、4つの疾患のどれに該当するか診断するシ ステムを構築する.データは,各項目とも実数 値で与えられるが,実験では0,1,2,3のいずれか に離散化して使用した. 各項目の値 x の離散化 には,医療分野で一般的に使用される表2に示 す閾値を用いた.

表1.肝胆嚢疾患のデータ例

疾患名	SEX	GOT	GPT	LDH	GGT	BUN	MCV	MCH	TBIL	CRTNN
アルコール性肝疾患	Male	34	20	197	98	14.5	106.3	34.0	0.6	0.5
原発性肝癌	Male	85	19	437	87	7.9	84.4	26.8	0.6	0.5
肝硬変	Male	65	32	408	37	18.4	101.1	31.4	0.4	1.0
胆石症	Male	15	7	266	6	16.0	100.0	34.3	0.1	1.1

表2.肝胆嚢疾患データの閾値

									CRTNN
$Th_1$	40	40	350	60	13	85	30	1.0	0.8
$Th_2$	100	100	500	100	18	95	32.5	2.0	1.2
$Th_3$	200	200	700	300	25	105	35	3.0	1.0

 $x < Th_1 \rightarrow 0$ ,  $Th_1 \le x < Th_2 \rightarrow 1$ ,  $Th_2 \le x < Th_3 \rightarrow 2$ ,  $Th_3 \le x \rightarrow 3$ .

実験には,アルコール性肝疾患 116 例,原発性肝癌 178 例,肝硬変 124 例,胆石症 118 例からなる全 536 個のデータを用意した.そのうち,322 例(上記の疾患から各々70 例,107 例,74 例,71 例)を学習データとして用い,残りの 214 例をテストデータとして用いた.

#### 3.2. 肝胆嚢疾患データへの ADG の適用方法

本研究では,4つの疾患を分類するため,各疾患のみが満たすべき論理式を求める.この論理式は, $(GGT=3) \land (BUN<2) \land (MCV=0)$ のように,ある項目とそれが取りうる値の組を AND 演算子で結合したものであり,対象とする疾患にだけ真(True)を返し,それ以外の疾患には偽(False)を返す.

肝胆嚢疾患において、検査データからどの疾患に当たるかの判断は、現在のところ明確なルールは存在せず、医師の経験によるところが大きい、そのため、ある 1 つの疾患に対する診断規則が単一のルールで記述できるとは限らないまた、使用するデータには、同一の検査結果であっても異なる疾患に分類された例もあり、矛盾するデータを多く含んでいる。このような背景を念頭に ADGを肝胆嚢診断問題に適用する.

本研究では、症例ごとに ADG を適用し、各症例のみが満たすべきルールを抽出する.ここでは胆石症を例として、個別の判定ルール抽出の詳細について述べる.ADG の個体における複数の木は、各々論理式を表している.4 つの疾患が混在する学習データ群から各データをシステムに入力する.そのデータに対し各木の論理式が成立するかどうかを計算する.図 3 のデータ 2 に示すように 1 個体が持つ複数の論理式の内で1つでも真となれば、その入力データは胆石症であるとみなされる.また、図 3 のデータ 1 のように、1 個体が持つ複数の論理式が全て偽を返せば、その入力データは胆石症ではないとみなす.単一の AND 結合木で全てのデータを判別でき

ない場合は、複数の木でデータを分担して判定することになる、最終的には、胆石症のデータに対しては、個体が持つ複数の木のいずれか 1 つが真を出力し、それ以外の疾患データには全ての木が偽を返すように最適化を行う.

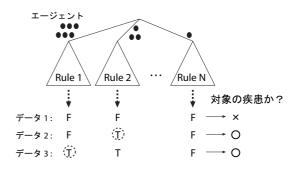


図3.複数ルールによる判定方法

また、エージェント群の協調問題解決という観点からは、各エージェントの負荷という概念が生じる.これは各グループが持つルールの採用回数および各グループに所属するエージェント数から計算される.各ルールの採用回数は、内の地間とは、大変の大変を返した場合にカウントの際は、図3のデータのように、複数の木が真を出力した場合は、図3のように、複数の木が真を出力した場合は、の中で最もエージェント数の多いグループの表で採用することとする.このとき、の本を採用することとする.このとき、の本を採用することとする.このとき、の本のサで最もエージェントの負荷は次のように計算される.

表 3. GP の終端·非終端記号

Symbol	#args	functions
and	2	arg0 arg1
eq	2	If (arg0 = arg1) return T else return F
gt	2	If (arg0 > arg1) return T else return F
lt	2	If (arg0 < arg1) return T else return F
GOT, GPT,, CRTNN	0	検査結果(離散値)
0, 1, 2, 3	0	離散値

これにより,抽出された複数のルールが使用される頻度,すなわち各ルールがその疾患の判定にどれほど一般的なものかという重要な知識が得られる.

また誤って他の疾患データに対して真を返してしまうような場合,そのルールを支持するエージェントは少ない方が良いと考える.

上記の要求を満たすため , 適応度を以下の式 (1)のように設定する .この適応度を最大化する . f = -miss target  $data - \alpha$  misrecognition

$$-\beta \frac{\sum_{Data} fault\_agent}{misrecognition} - \delta V_{w}$$
 (1)

ここで  $miss\_target\_data$  は抽出対象である胆石症のデータを取り逃してしまったデータ数である. misrecognition は,他の疾患のデータに対して真と出力して誤認識してしまったデータ数である.  $fault\_agent$  は他の疾患データに対して真を出力して誤認した際に,その答えを支持したエージェント数を表す.そのため,第 3 項は他の疾患データを誤って真と判定してしまう際にそれを支持してしまう平均エージェント数を表している. $V_w$  は全エージェントに関する負荷の分散である.また,冗長なグループの分割を抑制するため,個体の持つグループ数 G に応じて $\gamma^{G-1}$  ( $\gamma > 1$ )が適応度 f に乗算される.

進化により,胆石症に分類されるべきデータに対しては,いずれかの木が真を返し,その他のクラスに分類されるべきデータには偽を返すようになる.また,そのルールが担当の症例に反応する頻度が高いグループへのエージェントが配分は抑制される.そのため,所の配分は抑制される.そのため,所のコントの配分は抑制であり,少数のエージェント数が多い程,よく使用され,かのエージェント数があいたのに対する判定ルールであり,少数に現れる例外的データに対する判定ルールである.が分かる.

同様にして,他の3つの疾患(アルコール性 肝疾患,原発性肝癌,肝硬変)に対してもADG を適用し,各疾患に対するルールを抽出する.

ADG を用いる利点として,以下のような点が

挙げられる.

- ・単一の決定木では見落としてしまうような例外的データに対するルール抽出が可能となる。
- ・例外的ルールか典型的ルールかは所属エージェント数により容易に判断が可能となる.
- ·例外的ルールと典型的ルールが明示的に分離 されているため,ルールの理解が容易となる.

GP の記号としては ,表 3 に示す終端・非終端記号を用いた.ただし ,記号の使用には以下の制約を設ける. and 記号の引数に直接終端記号が入ることはなく ,また ,eq, gt, lt の引数 arg0 には GOT などの検査項目が ,引数 arg1 には離散値  $0 \sim 3$  が入るとする.これを満たさないような交叉 ,突然変異は行わない.

また,ADG を適用する際の個体数は500,交 叉率は0.9,突然変異率は0.95,グループ突然変 異率は0.02とした.

#### 4. 実験結果

## 4.1. 各症例からのルール抽出

胆石症に該当するデータに対してだけ,真を 出力するように ADG を適用した結果について 述べる.式(1)における各重みは, = 0.5, = 0.2, = 3.0, = 1.01 とした.

各世代における最大適応度,および平均グループ数の変化を図4,図5に示す.グループ数は抽出するルールの数に相当するため,分類に必要なルール数も探索しながら最適化を行っていることが分かる.

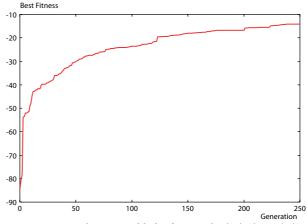


図4.胆石症ルール抽出時の最大適応度の変化

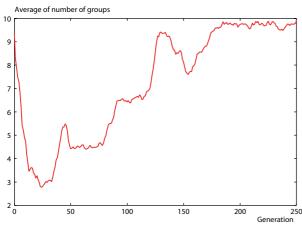


図5.個体集団の平均グループ数の変化

また,獲得された最良個体は9つのグループに分かれていた.各グループが持つルールと所属エージェント数を以下に示す.

Rule 1 (14 agents): (GOT=0) (LDH=0) (GGT<2) (BUN<2) (MCV=1) (MCH<2) (CRTNN=1) Rule 2 (11 agents): (GOT<2) (GGT>1) (BUN<2) (MCV=1) (MCH>0)

**Rule 3 (7 agents):** (GOT=0) (BUN>0) (MCV=2) (MCH<3) (TBIL<2)

**Rule 4 (6 agents):** (GOT=0) (LDH<2) (GGT<3) (BUN<3) (MCV<2) (MCH=0) (TBIL=0)

Rule 5 (4 agents): (GPT=0) (LDH<3) (GGT<2) (BUN<2) (MCV<3) (MCH=2) (TBIL=0) (CRTNN=1)

**Rule 6 (3 agents):** (GOT=0) (GGT<3) (BUN<3) (MCV<2) (MCH<2) (TBIL=0)

Rule 7 (2 agents): (GOT<2) (GPT>1) (MCV>1) Rule 8 (2 agents): (LDH=1) (GGT>1) (BUN<2) (MCV=1) (MCH>0)

**Rule 9 (1 agents):** (GOT=0) (LDH<2) (GGT<2) (BUN=0) (MCH=0) (TBIL<2)

322 個の学習データに対しては,71 個の胆石 症データ中の 69 個に対して,いずれかの木が True を出力した.また,その他の疾患に当たる 251 個のデータのうち 230 のケースで,全ての木が False を出力することに成功した.全学習 データに対する精度は 92.9%であった.

また、判定に成功した担当の 69 のデータについて、どの木の出力が採用されたかを見てみると、Rule 1 から順に、21 回、14 回、11 回、8回、4回、6回、2回、2回、1回となっている.誤認するデータを支持するエージェントの数を少なくする要求もあるため、正解に対する採用回数の比とグループ間のエージェント比は完全に一致してはいないが、所属エージェントの多いルール程、採用回数が多い傾向が見られる.よく使われるルールと共に、出現頻度の低い例外的なルールも抽出することに成功している.

同様の処理を他の3疾患(アルコール性肝疾患,原発性肝癌,肝硬変)に対しても適用した.その結果,各々の疾患の判定用に12ルール,11ルール,12ルールの抽出に成功した.各疾患用に獲得されたルールの認識率を表4に示す.表の正解数における各々の分母は,対象・非対象の全データ数を示している.対象疾患における分子は,獲得したルールのいずれかが対象のデータに真を返した数であり,非対象疾患における分子は,獲得したルールの全てが非対象のデータに対して偽を返した数である.またアルコール性肝疾患に対するルールの一部を以下に示す.

**Rule 1 (8 agents):** (GGT>1) (BUN=0) (MCV>1) (MCH>1)

**Rule 2 (8 agents):** (GOT=0) (GPT=0) (GGT>2) (MCH>0) (CRTNN>0)

**Rule 3 (8 agents):** (LDH=0) (GGT>0) (MCV>1) (TBIL=0) (CRTNN>0)

**Rule 12 (1 agents): (**GPT=3**)** (LDH=0)

表4.学習データに対する認識率

	正	解数	- 精度
	対象疾患	非対象疾患	作)又
アルコール 性疾患	63 / 70	222 / 252	88.5%
原発性肝癌	99 /107	194 / 215	91.0%
肝硬変	65 / 74	232 / 248	92.2%
胆石症	69 / 71	230 / 251	92.9%

#### 4.1. 分類精度の検証

ここでは,獲得されたルールをテストデータに 適用し,その予測精度を検証する.前節で作成 した疾患毎の判定ルールを統合し,図 6 に示す ような分類システムを構築する.

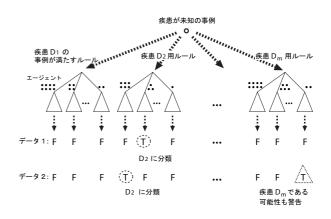


図6.全ルールを用いた分類システム

疾患が未知のデータを各々の疾患の判定ルール群に適用する.その結果,ある疾患用に用意された全てのルールが偽を返す場合は,その疾患でないことが分かる.用意したルールのうち,1つでも真を返すものがある場合は,そのルールが示す疾患となる.例えば,図6のデータ1は,疾患D2と分類される場合を示している.

ある種のデータに対しては,異なる疾患に属 する複数のルールが真を返す場合が生じる.こ の場合は,各ルールを持つグループに所属する エージェント数が重要な役割を果たす.最適化 の結果、各々のルールを持つグループに所属す るエージェント数は,そのルールに従うデータ の出現頻度の高さおよび予測精度の高さを表す と考えられるため、所属エージェントの多い方 の疾患がもっともらしい解と考えられる.ただ し,可能性は少ないながらも他方の症例の可能 性もあるとの認識が可能である。図6のデータ2 では,疾患 D2 と疾患 Dm 用のルールが共に真 を出力している、この場合は、各ルールを支持 するエージェントの多い D2 に分類される .ただ し,疾患 Dm の可能性もあることを認識するこ とができる.このようなわずかな可能性も認識 できることは,質の高い医療の実現へとつなが るものであり、本システムを利用する利点の 1 つである.

この分類システムを,学習に使用した 322 個のデータに適用し分類性能を検証した.その結果,80.4%の分類に成功した.例えば,9つの生化学検査の離散値が各々,0,0,0,1,2,1,1,0,1であるデータは,訓練データ中にアルコール性肝疾患と胆石症の2つの診断結果を持つデータである.これに対しては,アルコール性肝疾患のルール2と胆石症のルール6が共に真を返した.参照するエージェント数が多いルールほど高い信頼度を持つため,このデータはアルコール性肝疾患と判定される.しかし胆石症の可能性についても注意を促している.

また、この分類システムを未学習の 214 個のデータに適用したところ、157 例の認識に成功し、認識率は 73.4%であった.ただし、ここで認識に失敗したもののうち、30 例は正解の疾患の可能性について言及しており、かつその大部分に当たる 25 例は採用した解の他に競合するものが正解の疾患だけという精度の高いものであった.可能性の検出と言う観点から見ると、87.4%のデータをカバーできていることが分かる.使用した疾患データには、もともと誤って分類されたデータも含むため、これは高い認識率と言える.

#### 5. おわりに

本研究では,異なるルールに従うデータが混在するデータベースからの知識獲得を行うため,ADGを利用したルール抽出手法を提案した.この手法を肝胆嚢疾患データベースに対して適用し,疾患の分類のために必要な複数のルールの獲得を行うことによって,その有効性を示した.

なお,今回の実験で抽出した診断ルールは,データ群から機械的に抽出したものであり,医師の感覚からは受け入れがたい項目の組み合わせが含まれている可能性がある.医療における知識を組み込むことで,より有効性の高いルールが得られると考えられる.そのような知識を利用した ADG による最適化が今後の課題となる.

#### 謝辞

本研究は文部科学省の科研費(15700199)および広島市立大学特定研究費(3112)の助成を得て行われた.

### 参考文献

- [1] J. R. Koza: Genetic Programming -- On the Programming of Computers by Means of Natural Selection, MIT Press, 1992
- [2] 原章 ,長尾智晴:自動グループ構成手法 ADG によるマルチエージェントの行動制御 ,情報 処 理 学 会 論 文 誌 , Vol.41, No.4, pp.1063-1072, 2000
- [3] A. Hara, T. Ichimura, T. Takahama and Y. Isomichi: Discovery of Cluster Structure and The Clustering Rules from Medical Database Using ADG; Automatically Defined Groups, In T. Ichimura and K. Yoshida, editors, Knowledge-Based Intelligent Systems for Healthcare, 2004
- [4] A. Hara, T. Ichimura, T. Takahama and Y. Isomichi: Extraction of Rules by Heterogeneous Agents Using Automatically Defined Groups, In *Proc. KES2003*, Vol.2, pp.1405-1411, 2003

#### 連絡先:

原章

広島市立大学情報科学部 知能情報システム工学科

〒731-3194 広島市安佐南区大塚東 3 · 4 · 1

Phone + Fax: 082-830-1554

E-mail: ahara@its.hiroshima-cu.ac.jp

## インタラクティブ進化計算による心の計測への応用可能性

Applicability of Interactive Evolutionary Computation to Mind Measurement

高木英行

高橋智宏

青木研

九州大学大学院芸術工学研究院

久留米大学医学部

広島国際大学人間環境学部

Hideyuki TAKAGI Tomo

Tomohiro TAKAHASHI

Ken AOKI

Kyushu University

Kurume University

Hiroshima International University

**Abstract:** We experimentally show the applicability of interactive evolutionary computation (IEC) to a new application field,  $mind\ measurement$ . We had 3 schizophrenics and 5 normal students design happy and sad impression computer graphics lighting images using IEC and asked other 33 students to evaluate the CG images using Sheffe's method of paired comparison. Statistical test for the evaluation showed that the expression range of the three schizophrenics for "happy-sad" was significantly narrower than that of the normal students (p0.01). This experimental results implies that IEC has potential to contribute to psychiatry, and it also showed the possibility to expand the IEC applicability from conventional system optimization to new area, psychological measurement.

#### 1 はじめに

ここ 10 数年の間にインタラクティブ進化計算(IEC)研究が急速に拡張しており、現在では CG,音楽,工業・インテリアル・エディトーリアル・デザインのようアート応用,音響・画像信号処理,データマイニング,人工現実感,回路設計のような工学応用,その他に,地質学,教育,ゲームなど,幅広い応用分野で応用されている[3].

従来の IEC 応用がシステム設計を目的にしていたのに対し、本論文では、IEC によって設計されたシステム出力の観察を通じて心の計測を行うという、IEC 応用の新しい展開アプローチを提案する、IEC を用いて最適化したシステムには、IEC ユーザの心の物差しに基づく主観評価特性が反映されている。したがってそのシステム出力を観察することで、IEC ユーザの心の物差し、すなわち、主観評価特性をうかがい知ることができ得る。

### 2 IECによる心の計測

心の計測と言っても計測する心の側面にはいろいろあり得るが、本論文では、感情表現幅の計測に IEC を利用することを試みる.アプローチとしては、与えたテーマ(例えば「楽しい」や「悲しい」)に対する表情の CG 像を複数の被計測者に生成してもらい、作成した同テーマの CG 像に対する被計測者間の違いを主観評価実験で比較をし、心理尺度構成を行うものである.この作成結果が、CG 技能に依存するようでは出来上がった CG 像の比較を通じて心の計測ができないので、CG 技能を不要にする IEC システムが必要になる.

本論文では与えたテーマに対する表情の CG 像生成のために、3 次元 CG ライティングデザイン支援システム [1] を用いる。本システムは、3 灯のライトの 3 次元空間座標、光強度、色、光源の種類(並行光か拡散光か)のパラメータを遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて対話的に最適化する IEC システムである。被計測者には 12 種類の異なるライティングデザインが提示されるので、被

計測者はこれらが与えられたテーマにどの程度近いかを 5 段階評価をし, GA ヘフィードバックする.満足する ライティングが得られるまでこの作業を繰り返す.

得られた複数被計測者が作成したベストのライティング CG 像を,複数の評価者による Sheffé の一対比較法で主観評価実験を行い,心理尺度構成を行う.ヤードステックを求めることで有意差検定が可能である.この結果,被計測者の誰が他の被計測者に比べて,例えば「楽しい」表情を有意に生成できたという比較結果が得られる.

対になる表情テーマについてこの実験を行えば,例えば「楽しい・悲しい」という感情表現幅が他の被計測者に比べて有意に広い狭いという計測ができる.このような計測結果が得られれば,心理カウンセリングや精神医学の分野に有用なデータを提供できる可能性がある.例えば,統合失調症者と接する精神科医やセラピストは,統合失調症者が感情に関わる問題を抱えているであろうことは経験上感じていても,感情の計測法が存在しなかったがために,この経験的知見を診断に役立たせるための定量化が不可能であった.本アプローチはこのような計測を通じて有用な知見を提供できる可能性がある.

## 3 統合失調症者の感情表現幅計測

筆者らは経験上,統合失調者の「楽しい-悲しい」感情表現幅が,健常者よりも狭いのではないかという仮説を立て,この検証に提案手法を用いた実験を行う.

被計測者は,統合失調者3名と健常者5名の色覚異常がない8名である.本実験の説明に対して同意を頂け,かつ自ら同意書を取り交わす事が出来た統合失調者3名(PM,PT,PK)は,各々,外来通院の27歳,11年5ヶ月入院の41歳,4年6ヶ月入院の48歳で,いずれも,少なくとも半年以上にわたり,症状・薬物使用に対して変化は見られない.症状はPANSS[2],生活機能はLASMI[4]を使用して評価した.健常者5名(NS,NN,NK,NY,NH)は,学部4年生と修士1年生の学生である.

実験で与えたライティング課題は「楽しい」と「悲し

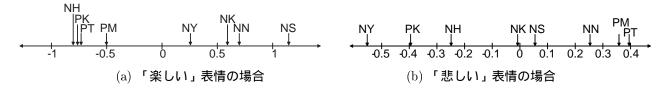


図 1: Sheffé の一対比較法で構成された心理尺度と被計測者 8 名が作成した表情の評価.被計測者記号は第 3 節を参照.

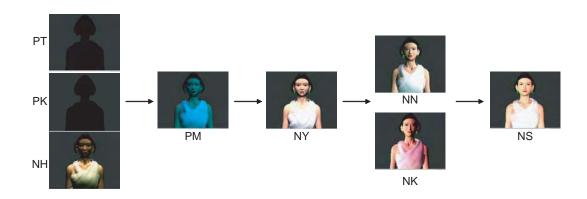


図 2: 図 1(a) に対応した「楽しい」表情の CG 像 . 危険率 1%で有意差がある「楽しい」表情の境界を矢印で示している .

い」で, 10~11 世代の IEC 探索を行った.

こうして得られた各被計測者のベスト「楽しい」表情の CG 像 8 枚から得られる 28 対  $(_8C_2)$  に対し,33 名の評価者(男 25 名,女 8 名,平均年齢 21.9 歳)が Sheffé の一対比較法(中屋の変法)で 5 段階評価を行った.同様に 8 枚の「悲しい」表情の CG 像についても主観評価実験を行った.実験はデータ採取マニュアルに基づき,実験者の管理下で行った.

## 4 実験結果と考察

得られた心理尺度構成を図1に,作成された表情のCG像と有意差がある区間を矢印で図2に示す「楽しい」と「悲しい」のヤードスティックの区間値を求めると,危険率1%と5%時に対して各々0.19と0.21であった.これらの値と図1の心理尺度上の被計測者区間を比較すると,統合失調者と健常者が表現する「楽しい」は,被計測者NHを例外として,危険率1%で有意な差があると言えるが「悲しい」場合は危険率5%でも有意な差があるとは言えない.

今回の主観評価実験結果では,統合失調者の方が生成した「楽しい」表情は,有意に健常者が生成した表情よりも楽しさ表現が少なく「悲しい」表情は同程度と見られることから,統合失調者の「楽しい―悲しい」感情表現幅は健常者よりも狭いのではないか,という筆者らの仮説を補強する実験結果が得られたと言える.

## 5 結論

心の計測という新しい IEC のアプローチを提案した. 感情表現を計測するという提案アプローチの具体的実現 手段を示し,統合失調者と健常者の感情表現幅計測という適用実験を通してその適用可能性を示した.

また,新しいIEC アプローチの提案という貢献以外に, この適用事例からは,精神医学への貢献の可能性も認め られた.すなわち筆者らの仮説が正しく,かつ,感情表 現幅が統合失調者の症状程度,薬物投与歴,あるいは環 境などの要因と相関があることが明らかになれば,将来, 診断や治癒判断の一助となる新しいデータを提供する可 能性が期待できる.

謝辞 本研究の一部は科研基盤研究 (C)(2) No.13680451の助成を得て行われた。

#### 参考文献

- [1] 青木研, 高木英行: 「対話型 GA による 3 次元 CG ライティングデザイン支援」電子情報通信学会論文誌 D-II, vol.J81-DII, no.7 pp.1601-1608 (1998).
- [2] Kay S. R., Fiszbein A, and Opler L. A.: "The Positive and Negative Syndrome Scale for schizophrenia," Schizophr Bull, vol.13, no.2, pp.261–276 (1987).
- [3] Takagi, H.: "Interactive Evolutionary Computation: Fusion of the Capacities of EC Optimization and Human Evaluation," Proceedings of the IEEE, vol.89, no.9, pp.1275–1296 (2001).
- [4] 岩崎晋也 他: 「精神障害者社会生活評価尺度の開発とその 意義」精神科診断学, vol.5, no.2, pp.221-231 (1994).

[連絡] 高木英行 (takagi@design.kyushu-u.ac.jp) 815-8540 福岡市南区塩原 4 丁目 9-1 九州大学 大学院芸術工学研究院 TEL&FAX 092-553-4555

## プログラムサイズ可変型マクロノード付き 遺伝的ネットワークプログラミング

Genetic Network Programming with Automatically Generated Variable Size Macro Nodes

中越 洋1, 平澤 宏太郎1, 古月 敬之1

Hiroshi Nakagoe<sup>1</sup>, Kotaro Hirasawa<sup>1</sup>, and Takayuki Furuzuki<sup>1</sup>

### 1早稲田大学大学院情報生産システム研究科

<sup>1</sup>Waseda University Graduate School of Information, Production and Systems

Abstract: Genetic Network Programming (GNP) has directed graph structures as genes, which is extended from other evolutionary computations such as Genetic Algorithm (GA) and Genetic Programming (GP). In this paper, a new method is introduced to improve GNP performances, where the structure of macroinstructions named Automatically Generated Macro Nodes (AGMs) is introduced to GNP for making efficient programs and reducing the time of evolution effectively. Further more, AGMs have the mechanism of varying the size. In the simulations, comparisons between GNP program only, GNP with fixed size AGMs and GNP with variable size AGMs are carried out using the tile world. Simulation results show that the proposed method is better compared with conventional GNP and GNP with fixed size AGMs.

#### 1. **はじめに**

近年,動的な環境の問題に対して生物学の進化現象を規範とする進化型計算手法を適用する研究が多くなされている.遺伝的ネットワークプログラミング(GNP)[1]はその進化型計算手法の一つであり,線形構造を持つ遺伝的アルゴリズム(GA)[2]や木構造を持つ遺伝的プログラミング(GP)[3]をグラフ構造に拡張した表現能力の高い手法である.GNPは,同様にグラフ構造を持つParallel Algorithm Discovery and Orchestration (PADO)[4]等とは異なり,その特徴からロボット制御や人工脳等,主に動的プログラムを構成するための進化型計算手法である.

さて,アプリケーションを構築する際にアルゴリズム の把握のし易さ,プログラムサイズの縮小等を理由に, サブルーチンやモジュールなどのマクロ命令を用いる ことは一般的である. 進化型手法においてもこれらの理 由に加え、プログラムの進化の高速化が望める等の理由 からサブルーチンの概念を導入する研究が多く進めら れており, GP における自動関数定義 (ADFs)[3] などが 知られている. GNP においても我々は Automatically Generated Macro Nodes (AGMs) [5] というマクロ命 令を GNP に定義し, その性能を明らかにしてきた. 本 論文では,従来の AGM の構造を拡張し,プログラムサ イズを可変とする AGM を提案する. 従来の AGM は ノード数を固定としたグラフ構造を持っており, AGM プログラムの進化には遺伝的操作だけを使用して環境 への適合度を高めてきた.本論文で提案するプログラ ムサイズ可変型 AGM には,これらの遺伝的操作に加

え,ノードの貢献度に応じて AGM 内のノード数を追加,削除するオペレーションが導入される.従って,このプログラムサイズ可変型 AGM 付き GNP では従来のアルゴリズムと比較し効率よく柔軟に動的な問題を解決できることが期待される.

本論文では、第 2章で GNP について要約し、第 3章で AGM , また本論文で提案するプログラムサイズ可変型 AGM 付き GNP について記述する.さらに第 4章では,タイルワールドと呼ばれる仮想世界におけるエージェントの制御に提案手法を適用し,その有効性を検証している.第 5章は結論である.

## 遺伝的ネットワークプログラミング (GNP)

#### 2.1 GNP **の構造**

GNP の 1 個体の構造を図 1 に示す.図 1 のように,GNP は複数のノードが有向グラフによって連結された構造を取っており,ノードの再利用を容易に行うことが可能である.また各種ノードは判定ノード,処理ノード,スタートノードに分類され,判定ノードは環境から情報を受け取りその情報を判定する関数を持つノード,処理ノードは環境に対して行動を行う関数が定義されたノード,スタートノードは GNP 個体がプログラム処理を開始するときだけ実行されるノードである.また, $d_i$  はノードでの処理遅れ時間を示しており, $d_{ij}$  はノード間の遷移遅れ時間を示している.これら遅れ時間の導入により GNP プログラムが限られた時間内に何らかの処理を実行することが保証される.

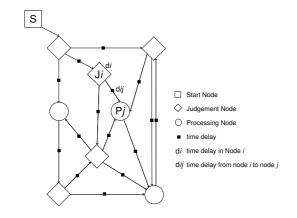


図 1 GNP 構造

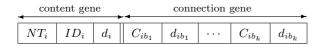


図 2 遺伝子構造 (ノード i)

図 2 に,GNP の最小単位であるノードの遺伝子構造を示す.遺伝子の内容を表現するコードにおいて, $NT_i$  はノード i のノードの種類を示すコードである.さらに, $ID_i$  はノード i が保持するノード関数の内容を示している. $d_i$  は先に述べたノード処理遅れ時間を示す.また,遺伝子の接続を表現するコードにおいては, $C_{ib_k}$  にノード i の k 番目のブランチから接続するノード番号が記されている.同様に, $d_{ib_k}$  は上記ノード間の遷移遅れ時間を示す.このブランチの数は  $NT_i$ ,もしくは  $ID_i$  に依存し,処理ノードでは k=1 となり,判定ノードでは環境からの情報を判定する数だけブランチが存在するので k>1 となる.

GNP におけるプログラムの実行例を示す.まず,スタートノードが実行された後,次の接続先であるノードiが実行される.ノードiではノード関数  $ID_i$  に従って処理,もしくは判定が実行され,遅れ時間に $d_i$  が加算される.さらに,ノードi での実行が終了すると次の接続ノードが選択され,遷移を行う.このようなノード遷移が繰り返し実行され,遅れ時間の加算値が閾値を越えた時点で GNP の 1 ステップ処理の終了となる.GNP では,このようにノード遷移を行うため,GNP は過去の判断や処理を暗黙的に保存する機構を持っている.つまり,GNP では「過去の情報や行動」を考慮し「現在の情報」によって行動することができるため,GNP はマルチエージェント環境におけるエージェントの行動系列を適切にモデリングする手法である.

#### 2.2 GNP における遺伝的操作

本論文で用いる遺伝的操作には,交叉と突然変異の 単純なオペレータを導入する.交叉オペレータとは,2 つの親個体を選択し,設定された交叉確率に従い個体 間でノードとそれに属する有向リンクを交換し,生成

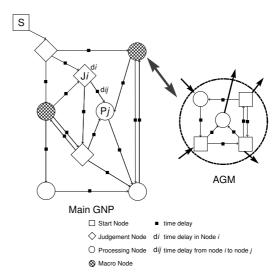


図 3 マクロノードつき GNP

された2個体を次世代に残す操作である.また,突然変異オペレータとは,図2で示した遺伝子情報を,設定された突然変異確率に従いランダムに変更することであり,1個の親個体から1個の子個体を生成する.

# 3. マクロノード付き遺伝的ネットワークプログラミング (GNP with AGMs)

#### 3.1 GNP with AGMs の構造

図3にGNP with AGMs の構造を示す.一般にサブルーチンは1入力,1出力であり,必然的にそれが持つ機能は一つである.一方,AGM は有向グラフ構造であるためメモリの節約,拡張性を理由に複数の入力,複数の出力を持つ.従って,AGM は入力の数だけマクロ命令の機能を内包する.しかし,複数の入出力を持っているからといって,サブルーチンの一意性が破壊されるわけではない.これは AGM において,ある入力が選択された際に上位層から見るとひとつのサブルーチンを選択しているに過ぎないからである.

#### 3.2 プログラムサイズ可変型 AGM のアルゴリズム

GNP のプログラムにおけるノード関数の使用頻度は、ノード関数ごとに大きく異なる傾向がある.特にノード数が少ない AGM は、その影響を大きく受けることになり、内包するノード関数によってその有効性が大きく変わる.また、AGM のプログラムサイズは、それの自由度やメモリの消費量にも大きく影響を及ぼす.そこで、ノードの使用頻度を貢献度と仮定し、AGM 内のノード数をこの貢献度に応じて増減させる新しいオペレータを導入する.

追加オペレータ 追加オペレータでは , 本体 GNP 内の ノード関数の貢献度を用いて AGM に追加するノード関数を選択する . ここでノード関数 d の活用度  $\alpha_d$  を (1) 式に示すようにノード関数 d のノード数占有率に対する

ノード関数 d の活性回数率として定義する.ここで, $X_d$  はノード関数 d の活性回数を示し,同様に T は全ノードの活性回数, $N_d$  はノード関数 d の個数, $N_{all}$  は全ノード数である.追加オペレータは(2)式に示す追加確率  $P_d^{add}$  に従って実行される.ここで, $0 < P_{max}^{add} < 1.0$  は最大閾値,a はランダム度を示す.

$$\alpha_d = \frac{X_d/T}{N_d/N_{all}} = \frac{X_dN_{all}}{N_dT} \quad (\forall d \in \mathit{ALL}\,\mathit{KINDS}) \ (1)$$

$$P_d^{add} = \frac{P_{max}^{add}}{1 + \exp\left(-a\left(\alpha_d - 1\right)\right)} \tag{2}$$

削除オペレータ 削除オペレータは  ${\rm AGM}$  内で最も不活性であったノード i を (3) 式に示す削除確率  $P_i^{del}$  に従って削除するオペレータである.ここで, $0 < P_{max}^{del} < 1.0$  は削除確率の最大閾値,b はランダム度を示し, $x_i$  は  ${\rm AGM}$  内で活性回数が最小であったノードの活性回数である.

$$P_i^{del} = P_{max}^{del} \exp\left(-bx_i\right) \tag{3}$$

#### 3.3 GNP with AGMs の進化アルゴリズム

GNP with AGMs の進化アルゴリズムは本体 GNP と AGM らの組み合わせが問題となるため,1世代に AGM と本体 GNP の最良個体を交互に選択し,それぞ れのシミュレーションを行うことで, それらの最良の組 み合わせを見つけることができるアルゴリズムを採用 した. 具体的にまず前世代の最良本体 GNP 個体を選択 し,これを固定して AGM 全個体に関して環境に対す る適応度を求めるためのシミュレーションを行う. つま り,これは前世代の本体 GNP に対する最良 AGM の探 索を意味する.次に上記シミュレーションで得られた 適応度の最も高い AGM 個体を選択し,その AGM を 固定して本体 GNP 全個体のシミュレーションを行う. その後提案する追加,削除のオペレーションを行い,遺 伝的操作を施し,次の世代へと処理を繰り返す.この ような処理を終了条件が満たされるまで続け、プログ ラムの進化を行っていく.

#### 4. シミュレーション

#### 4.1 シミュレーション環境

本論文では,シミュレーション環境にタイルワールド(図4)を用いた.この仮想世界はタイル,穴,床,障害物,エージェントから構成されており,エージェントは限られた知覚と行動能力を有している.エージェントはそれらの能力を用いてタイルを穴に落とすことを試みる.なお,これらエージェントはタイルを穴に落とす行動だけを評価されるのでなく,より速くその動作を行うことも評価される.

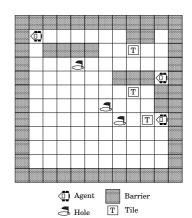


図 4 タイルワールド

表 1 ノード関数群

Node Type	Node Function	Branch
Processing Node	MF,TL,TR,DN	1
Judgement	CF,CL,CR,CB	5
Node	DNT,DNH,DTH,SNT	4

#### 4.2 適合度計算方法

エージェントの行動の評価,つまりエージェントを制御する各種 GNP の評価を行うため,適合度としてタイルを穴に落とすと 100,タイルを穴に近づけると 20,また既定の時間より早く全てのタイルを穴に落とすタスクを完了すると残存時間分が与えられるものとする.従って,タイルや穴の位置関係によりタスクの完了を示す適合度は,ほぼ 500 となる.

#### 4.3 ノード関数群

エージェントのセンサ機能,行動機能を GNP において実現するために表 1 に示すノード関数を用意した.処理ノードには,前方のセルへ移動(MF),左に90 度回転(TL),右に90 度回転(TR),何もしない(DN)の4種類のノード関数が定義される.また判定ノードには,エージェントの前方セルにどのオブジェクト(タイル,穴,障害物,床,エージェント)が存在するか(CF),同様に左方(CL),右方(CR),後方(CB)に関する四方のセルの情報を判定する,エージェントに最も近いタイルの方向(DNT),最も近い穴の方向(DNH),最も近いタイルから見た最も近い穴の方向(DTH),2番目に近いタイルの方向(SNT)を判定する,最も近いオブジェクトがエージェントから見てどの方向(前後左右)にあるのかを判定する合計8種のノード関数が定義される.

#### 4.4 シミュレーション結果と考察

シミュレーション 1 図 5 に GNP , プログラムサイズ を固定とした AGM 付き GNP とプログラムサイズ可 変型 AGM 付き GNP の性能比較の結果を示す.これ は図 4 に示したタイルワールドに加え,タイルや穴の

位置をランダムに変更した合計 10種のタイルワールド におけるエリート個体の適合度の比較である.この結 果,高い適合度や進化における速い収束という点で,明 らかにプログラムサイズ可変型 AGM 付き GNP の性 能が他の手法より優れていることを示している.この 理由に探索空間の縮小を挙げることができる. つまり, AGM 付き GNP はノード数の小さな AGM を有効に活 用することで、ノード内容や遷移の進化における探索 空間を縮小し,早く効率的な解を見つけることができ るからである.またプログラムサイズ可変型 AGM 付 き GNP における追加,削除オペレータでは全般にMF, DNT, DNH が追加され, DN が削除されていた.これは, 無駄な関数を削除して,その空いたメモリ領域を利用 し,他のセルへ唯一移動できる関数 MF と, AGM にタ イルや穴の位置情報を保存することで速い収束が見込 める関数 DNT, DNH を追加することで, このようなより 環境に適したプログラムが得られたと考えられる.

シミュレーション 2 先のシミュレーション 1 での学習 により獲得した各種 GNP を 100 個の未知タイルワー ルドに適用し得られた適合度の平均汎化値を表 2 に示 す.この結果,提案手法が従来の GNP 単体プログラム より汎化能力が優れていることを示している.しかし, プログラムサイズ可変型 AGM 付き GNP と追加,削 除を行わないプログラムサイズ固定型 AGM 付き GNP の間には大きな違いは見られなかった、これは進化の 時に特定の環境に特化したノード関数を AGM に追加 したことで過学習されてしまい, AGM 全体では一般性 を獲得することができなかったためと考えられる.た だし AGM を使用した GNP ではどちらも未知の環境 に対して比較的高い適合度を獲得したために, GNP 単 体のプログラムと比較すると標準偏差が小さくなって いる.従って,全般的に提案手法は従来手法に比べ汎 化能力が高くなっている.

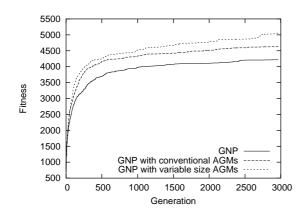


図 5 各種 GNP 手法の性能評価

表 2: 未知のタイルワールドでの平均適合度と標準偏差

	GNP	AGMs 1	AGMs 2
Mean	204.62	305.12	310.45
SD	107.21	90.73	91.51

AGMs 1: GNP with fixed size AGMs AGMs 2: GNP with variable size AGMs (Note: SD: Standard deviation)

#### 5. 結論

本論文では,生物の進化を模倣した進化型計算手法 GNPに,最適なプログラムサイズを見つけるのと同時に環境に適したノード関数を追加し不要なノード関数を削除するプログラムサイズ可変型 AGM の導入を提案した.シミュレーション結果が示すように,環境に対する適合度や汎化能力など提案手法の有効性を証明することができた.プログラムサイズ可変型 AGM は進化型計算手法の信頼性向上のための汎化能力を高めることが出来るため,今後はより複雑なシミュレーション環境を用いて提案手法の検証を行っていきたいと考えている.

#### 参考文献

- [1] 片桐 広伸,平澤 宏太郎,胡 敬炉,村田 純一: "ノード数可変型 Genetic Network Programming",電気学会論文誌, Vol. 123-C, No. 1, pp. 57-66, 2003.
- [2] J.H.Holland: Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, 1975, MIT Press, 1992.
- [3] J.R.Koza: Genetic Programming II, Automatic Discovery of Reusable Subprograms, MIT Press, Cambridge, MA, 1992.
- [4] Astro Teller and Manuela Veloso: PADO: "A new learning architecture for object recognition". In Katsushi Ikeuchi and Manuela Veloso, editors, Symbolic Visual Learning, pp. 81-116, Oxford University Press, 1996.
- [5] H.Nakagoe, Shingo Mabu, K.Hirasawa and J.Hu, "Genetic Network Programming with Automatically Generated Macro Nodes", SICE 2003, Fukui Japan, 2003.

#### 連絡先

#### 平澤 宏太郎

早稲田大学大学院情報生産システム研究科 〒 808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-7

Phone: 093-692-5261

E-mail: hirasawa@waseda.jp

## ルールの生成法と推論法を変化させる学習の拡張 —切り換えタイミングを変化させる規則の学習—

Extension of Learning by Switching Rule Generation and Reasoning Methods
—Learning of Rules for Changing Timing of Switching

馬野 元秀 藤丸 雅弘 松本 裕二 瀬田 和久 UMANO Motohide TOMARU Masahiro MATSUMOTO Yuji SETA Kazuhisa

大阪府立大学 総合科学部 数理·情報科学科

Department of Mathematics and Information Sciences, College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

**Abstract:** When we solve a problem, we firstly have no knowledge and gradually acquire some piece of knowledge by observing new data, and at last arrive at complete knowledge for solving the problem. To implement such kind of learning mechanism, we proposed a learning method of switching reasoning methods and rule generation methods. In this method, timing of switching depends on values of several parameters on correction rates. In this paper, we tune these parameters with rules to raise evaluated values of reasoning processes. We apply reinforcement learning to acquire the rules since we have no correct answer to change timing of switching.

#### 1. はじめに

人間は、ある問題を解くための知識を、データを 少しずつ得ながら作りあげて行く.このとき、始 めは与えられたデータをそのままの形で記憶し、 学習が進むとデータを基にしたルールの形で記憶 する.このような仕組みを計算機上で実現するた めに、学習データが逐次的に与えられる状況にお いてルールの生成法等を切り換えていくような学 習法を提案した[1].

このとき、切り換えのタイミングは、切り換えやルール再構成の判定に用いるパラメータに依存している。本論文では、このパラメータをルールに基づいて変化できるようにし、そのルールを強化学習の手法のひとつである Q-learning によって学習するようにした。

#### 2. 学習法の概要

本手法はデータが逐次的に与えられていく状況において、それまでに得たデータを基にして生成したルールを用いて推論を行う。そのためのルール生成法や推論法を複数用意しておき、与えられた状況に応じて推論法の切り換え、ルールの再構成、ルール生成法の切り換えを行いながら推論を

行う.

ルールにはさまざまな形式のものが存在し、それぞれの形式に応じたルールの生成法と推論法がある.ここでは、ひとつの生成法とそれに付随する複数の推論法からなるものを知識表現と呼ぶことにする.

知識表現は常にひとつだけが用いられる.いま用いられている知識表現のルール生成法によってルールを生成し、生成されたルールを用いてその知識表現のもつ推論法のひとつを使って推論結果を求める.そして、ある条件を満たすときに推論法の切り換え、ルールの再構成、知識表現(ルール生成法)の切り換えを行う.なお、分類問題を考えているので、データは複数の属性と分類クラスからなるものとする.ルール生成法と推論法はルールの形式ごとに、以下のものを用いる.

# (1) 学習データと同じ形式のルール[生成法]

- データ点をルールとする方法  $(G_1)$  今までに学習したデータをそのままルールであるとみなす.
- クラスタリングを行い、その重心をルールとする方法  $(G_2)$

各クラスごとに全属性を用いてクラスタリング

を行い、その重心となる点をルールとする.

#### [推論法]

- 距離が一番近いルールによる方法 (R<sub>1</sub>)
   推論するデータに最も近いルールのクラスを推 論結果とする。
- 距離による重みを考慮する方法  $(R_2)$ 推論するデータが与えられたときに、その点と 各ルールの点との距離を正規化した度合の合計を

各ルールの点との距離を正規化した度合の合計を 各クラスごとに求め、それが一番大きいクラスを 推論結果とする.

### (2) ファジィルールの形式 [生成法]

各属性ごとに一定数のファジィ集合を作成する 方法 (G<sub>3</sub>)

各属性ごとに一定数のファジィ集合を作成し、 各属性のファジィ集合のすべての組合せからファ ジィルールを作る.

• クラスタリングを行い、それをファジィルールにする方法 ( $G_4$ )

全属性でクラスタリングを行い,各クラスタの 重心となる点を中心としたファジィ集合を作り,そ のファジィ集合を用いたルールを作る.

#### [推論法]

- ファジィ推論 (min-max 重心法) による方法 (R<sub>3</sub>)
- ファジィ推論 (×-+ 重心法) による方法 (R₄)

## (3) 決定木による形式 [生成法]

• ID3 を用いて決定木を生成する方法 (G₅)

ID3 を用いて決定木を作成し、それに基づいてルールを作成する.連続値を取る属性に対しては、クラスタリングを行い3つのクラスタを作成し、隣り合うクラスタの重心の平均値を分割点とし、3つの離散値とみなすようにする.

#### [推論法]

決定木を用いて推論を行う方法 (R<sub>5</sub>)決定木を用いて推論を行う.

## (4) ファジィ決定木による形式 [生成法]

ファジィID3 を用いてファジィ決定木を生成する方法(G<sub>6</sub>)

ファジィID3 を用いてファジィ決定木を作成し、 それに基づいてルールを作成する[2]. 連続値をと る属性における分類の枝のラベルには、各属性ご とにクラスタリングを行って3つのクラスタを作 り、クラスタごとにファジィ集合を作成する.

#### [推論法]

ファジィ決定木を用いて推論を行う方法 (R<sub>6</sub>)
 ファジィ決定木を用いて推論を行う [2].

以上のルール生成法と推論法の組合せから知識表現を表1のように定める. 学習の開始時点では知識表現は $K_1$ を,推論法は $R_1$ を用いる.

表 1: 知識表現の種類

知識表現	生成法,推論法
$K_1$	$G_1, R_1, R_2$
$K_2$	$G_2, R_1, R_2$
$K_3$	$G_3, R_3, R_4$
$K_4$	$G_4, R_3, R_4$
$K_5$	$G_5, R_5$
$K_6$	$G_6, R_6$

## 3. 知識表現や推論法の切り換えとルールの 再構成

一般に、同じ知識表現、ルール、推論法により推論を続けていくと、もっているルールでは説明のつかないデータが入力され、知識表現や推論法が状況に適さない状態におちいってしまう。すると、正しい推論が行えず、正解率が減少してしまう。そこで、状況により適した状態にするために何らかの手段を取る必要がある。その手段として、推論法の切り換え、ルールの再構成、知識表現の切り換えの3つを考える。そのためには、切り換えやルール再構成をいつ行うか判定する方法と、切り換えを行う際に次の知識表現や推論法を選択する方法について考える必要があり、前回の発表[1]ではそれぞれ2種類ずつ考えたが、今回は次のものを用いる。

#### [判定法]

推論の累積正解率 (学習の始めからその時点までに行った全推論に対する正解率) が下がったときを切り換えやルール再構成の機会とする. 具体的には,前回の知識表現切り換え後の最大累積正解率から,現在の累積正解率の低下度合 p を求め,次のように決定する.

 $p_1 \le p < p_2$ : 推論方法の切り換え  $p_2 \le p < p_3$ : ルールの再構成  $p_3 \le p$ : 知識表現の切り換え

 $2 < p_1 < p_2 < p_3 < p_3$ .

[選択法] 切り換えを行う時点で最良と思われる推論法,知識表現を選択する.評価は次の関数を用いて行う.

$$H(c_a, r_a) = c_a + \frac{\alpha}{r_a} \tag{1}$$

ここで,  $c_a$  は学習方法 a の正解率,  $r_a$  は学習方法 a のルール数,  $\alpha$  は正解率かルール数の少なさの どちらを重視するかについての重みである.

推論法切り換えの場合は、現在の知識表現のもつすべての推論法について、知識表現切り換えの場合は、すべての知識表現について、システムに保存されているデータに対して推論を行い、式(1)が最大となるものを選択する.

# 4. パラメータ変化規則の獲得

本学習法における学習の良し悪しは、推論法や知識表現の切り換え、ルールの再構成を行う時期により大きく異なる. 切り換えや再構成の時期は、判定法におけるパラメータ  $p_1, p_2, p_3$  の値に依存する. したがって、切り換えの判定法におけるパラメータ  $p_1, p_2, p_3$  の値は学習の良し悪しに大きな影響を与えることになる. 以前の研究では、これらのパラメータ  $p_1, p_2, p_3$  は固定していた. しかし、人間はいろいろな種類のデータに対する学習を繰り返すうちに、切り換えやルール再構成のタイミングなどを経験的に学習すると考えられる.

そこで、あるデータ集合に対する推論・学習についての評価値から、パラメータ $p_1, p_2, p_3$ をどのように変化させればよいかというルールを獲得することを考える。このようなルールの獲得には、前節のようなデータ集合に対する推論・学習の場合と異なり、明確な解答(正しい切り換え時期)を提示する教師が存在しない。推論・学習過程をみて、良かったか悪かったかの評価ができるだけである。そこで、このルールの獲得には強化学習を用い、今回はその代表的手法であるQ-learningを用いて、データ集合に対する推論・学習過程の評価値を基にして、パラメータ $p_1, p_2, p_3$ を変化させる規則を作りあげていく。

## 4.1 環境設定

Q-learning を用いたパラメータを変化させる規則のための環境を次のように設定する.

# (1) 状態

状態は推論・学習過程に対する評価値と,パラメータの現在の値との組とする.

推論・学習過程に対する評価値 E は、与えられ

たデータ集合に対して行った推論・学習過程から 次式を用いて求める.

$$E = \sum_{i=1}^{5} w_i \cdot v_i \tag{2}$$

ここで、 $v_1$ :正解率、 $v_2$ :1/(平均ルール数)、 $v_3$ :1/(推論法切り換え回数+1)、 $v_4$ :1/(ルール再構成回数+1)、 $v_5$ :1/(知識表現切り換え回数+1)とする。また、 $w_i$  は各要素に対する重みで、 $\sum_i w_i = 1$ とする。状態数を抑えるために、評価値の値域  $0.0 \sim 1.0$ を 10等分したものを用いる。パラメータの現在値も同様に、状態数を抑えるために値の範囲を 10等分したものを用いる。今回はこのパラメータの値の範囲を  $0.0 \sim 0.2$  とした。

## (2) 行動

行動は各パラメータに対して現在の値をどのように変化させるかについて、{減少,少し減少,変化なし,少し増加,増加}の五つとする. それぞれの行動に対してパラメータを次のように変化させる

- 賦少:  $p_i' = p_i (p_i p_{i-1}) \times 0.4$
- 少し減少:  $p_i' = p_i (p_i p_{i-1}) \times 0.2$
- 少し増加:  $p_i' = p_i + (p_i p_{i+1}) \times 0.2$
- 增加:  $p_i' = p_i + (p_i p_{i+1}) \times 0.4$

これにより,  $p_1 < p_2 < p_3$  が保たれる. また,  $p_1$  の下限として  $p_0$  を,  $p_3$  の上限として  $p_4$  を定義した.

## (3)Q-table

パラメータ  $p_1, p_2, p_3$  それぞれ対して表 2 のような Q-table を作成する.

表 2: パラメータ変化規則の Q-table

状態			行動	
評価値 E	$p_i$ の現在値	減少		増加
0.0~0.1	$0.0 \sim 0.02$	0.2		0.7
	:	•	٠	:
	$0.18 \sim 0.2$	0.3		0.0
0.1~0.2	$0.0 \sim 0.02$	0.1		0.9
	:	:	٠.	:
:	::	:	:	:

#### (4)報酬

報酬rは、パラメータ変化後に行った推論・学習過程の評価値Eから次式により決定する.

$$r = (E - 0.5) \times 2$$

# 4.2 変化規則獲得の流れ

パラメータ変化規則の獲得は次のように行う. step1. (初期パラメータの下での学習) ランダムに発生させた初期パラメータの下で,あるデータ集合に対して前節の方法を用いて推論・学習を行い,それに対する評価値を計算する.

step2. (パラメータの更新) 各パラメータにおいて, それぞれ step1 で求めた評価値とパラメータの現在値の組から, 行動を決定し, 更新する. 行動決定の際の方策には  $\epsilon$ -greedy 法 [4] を用いる.

step3. (新たなパラメータの下での学習) 新たなパラメータの下でデータ集合に対する学習を行い, step1 と同様に評価値を計算する.

step4. (Q-table の更新) step2 において選択された行動と状態の組に対する Q 値を次式により更新する.

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha[r_{t+1} + \gamma \max_{a} Q(s_{t+i}, a) - Q(s_t, a_t)]$$

ここで, s は状態, a は行動,  $\alpha$  は学習率, r は報酬,  $\gamma$  は割引率である. Q-table の更新後, step2 から繰り返す.

# 5. 実験

本手法を用いて、R.A. Fisher のアヤメのデータ [3] に対する推論・学習を行いながら、パラメータを変化させる規則を獲得させる実験を行った.

前節の方法を用いて、アヤメのデータ集合全てに対する推論・学習過程、パラメータの更新、Q-table の更新のサイクルを 5000 回繰り返したときの 100 回ごとの評価値の平均のグラフを図 1 に示す.ここで、 $p_1$  の下限  $p_0$  と  $p_3$  の上限  $p_4$  をそれぞれ 0.005、0.2 とし、Q 値の更新式における学習率  $\alpha$  を 0.5、割引率  $\gamma$  を 0.9 とし、 $\epsilon$ -greedy 法における  $\epsilon$  は 0.1 とした.また、Q 値の初期値は 0 とし、評価値の計算における重み  $w_i$  はすべて 0.2 とした

この結果では、ランダムに発生させた初期パラメータがある程度よいものであったため、始めの評価値が少し高めになっている。ところが、パラメータをどのように変化させればよいかについての規則が獲得されていないため、パラメータを誤った方に変化させてしまい、評価値が下降している。しかし、推論・学習過程を繰り返すうちにパラメータを変化させる規則を獲得し、評価値を上昇させるとともに、ほぼ一定の範囲で推移することができている。

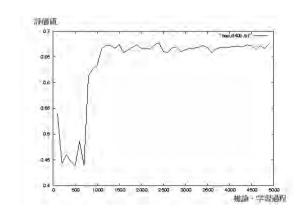


図 1: パラメータ変化の規則を獲得させる実験

# 6. おわりに

本論文では、学習データが逐次的に与えられる 状況の下で、ルールの生成法と推論法を変化する 学習法において、切り換えやルール再構成の時期 を決定付けるパラメータをどのように変化させれ ばよいかについての規則を、Q-learningによって 獲得するようにした。今後の課題としては、現在 パラメータを変化させるのはあるデータ集合全て に対する推論が終ったときとしているが、推論を 続けていく途中でも変化させることができるよう にすることなどが考えられる。

# 参考文献

- [1] 馬野 元秀, 藤丸 雅弘, 瀬田 和久, 宇野 裕之, 岡田 真:ルールの生成法と推論法を変化させる学習 法の拡張—切り換え手法の追加とその評価, 第19 回ファジィシステムシンポジウム, pp.345-348, 2003.
- [2] 馬野 元秀, 中山 学, 鳩野 逸生, 田村 坦之: ファジィID3 に基づくファジィ決定木の生成とその評価—, 第 10 回ファジィシステムシンポジウム, pp.333-336, 1994.
- [3] R.A. Fisher: The Use of Multiple Measurements in Taxoniomic Problems, *Annals of Eugenics*, Vol.7, No.2, pp.170–188, 1936.
- [4] R.S. Sutton and A.G. Barto: Reinforcement Learning: An Introduction, The MIT Press, 1998. [邦訳] 三上 貞芳, 皆川 雅章 共訳: 強化学習, 森北出版, 2000.

[問い合わせ先]

〒 599-8531 堺市学園町 1-1

大阪府立大学 総合科学部 数理·情報科学科 藤丸 雅弘

TEL: 072-254-9675

FAX: 072-254-9930

E-mail: masa@marron.cias.osakafu-u.ac.jp

# 進化型計算によるサッカーチームの戦略学習

# Strategy Learning for a Soccer Team using Evolutionary Computation

中島 智晴 有働 昌代 石渕 久生
Tomoharu Nakashima Masayo Udo Hisao Ishibuchi
大阪府立大学大学院 工学研究科
College of Engineering, Osaka Prefecture University

**Abstarct:** This paper proposes an evolutionary method for learning strategies of RoboCup soccer agents. In our strategy, the behavior of the soccer team is represented by the bit string that each agent decides their action based on. Our evolutionary computation method uses only a mutation operator. There is only a single individual in a population. The mutated individual competes with its parent for survival in an evolving population based on their ability to play soccer, and the winner team survives for the next generation. Through computer simulations, we show the effectiveness of our method.

# 1 はじめに

RoboCup はサッカーロボットによる世界選手権で、その最終目標は「2050 年までに FIFA ワールドカップのチャンピオン・チームに勝つことができる完全自律型のヒューマノイド・ロボット・チームを作ること」である。協調マルチエージェント問題を主に取り扱う RoboCupでは、ソフトコンピューティングに基づいた手法がよく適用されている [1].

サッカーエージェントの開発には、パスやドリブルなどのような低レベルの行動に対する実装と、意思決定や強調プレイなどのような高レベルの行動に対する実装が必要である。中島ら[1]は、低レベルの行動としてパスインターセプト問題を取り上げ、ファジィQ学習によりオンラインでスキルの上達を行う手法を提案している。

本論文では、高レベルの行動実装を進化型計算により 行う手法を提案する。具体的には、進化型計算により、 各エージェントがボールを持っているときの行動が決定 される。この行動は、エージェントの存在する位置や状態も考慮に入れる。数値実験の結果から、世代がすすむ につれてサッカーエージェントが効果的な行動や戦略 を獲得することを示す。

# 2 提案手法

# 2.1 進化型計算手法

提案手法では、チーム戦略はビット列で表され、エージェントはそのビット列に基づいて行動する。各ビットは、ボールを所有するエージェントが、フィールド内の

自分の位置に応じてどのような行動(パスやドリブルなど)をとるべきかを表す。本論文では、フィールドを図1のように48個に分割し、各部分空間でのエージェントの行動を決定する事にする。

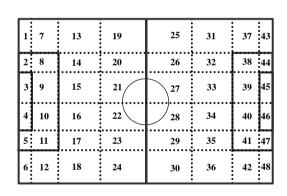


図1フィールドの分割

各領域において、敵が近傍にいる場合といない場合の行動を決定するので、1つのエージェント当りのビット列は $48\cdot2=96$ となる。図2に、1つのエージェントに対して用いられる文字列を示す。1番目のビットは、エージェントが領域1(図1参照)に存在し、かつ敵が側にいない場合の行動を表す。2番目のビットは、エージェントが領域2に存在し、かつ敵が側にいない場合の行動を表し、49番目のビットは、エージェントが領域1に存在しかつ敵が側にいる場合の行動を表す。チーム戦略は、キーパを除く10人の行動を考えるので、1つのチームに対して用いられるビット列の長さは $96\cdot10=960$ となる。

Actions when the nearest opponent player is far

図2ビット列

本研究では、エージェントがとることのできる行動の 集合として、以下の 10 種類の行動からなる集合を考え ることにする。

**行動 1:** 前にドリブル

行動 2: 敵ゴールにむかってドリブル

行動 3: 敵から最も離れた方向にドリブル

行動 4: 前方の1番近いエージェントヘパス

行動 5: 前方の2番目に近いエージェントへパス

行動 6: フィールド内にクリア

行動 7: フィールド外にクリア

行動 8: センタリング

行動 9: 一番近いエージェントへスルーパス

行動 10: シュート

進化型計算手法では、個体の評価時間が10分と長いために、個体群のサイズを1とする。各世代の個体とその突然変異の個体を直接対決させ、勝利したビット列を次世代の個体とする。この操作を繰り返し行い、より強い戦略を構築する。

#### 2.2 数值実験

本論文では、以下のようにパラメータを設定し、RoboCup Soccer Server ver.9.4.2 を用いて数値実験を行った。

突然変異確率:1/96エージェントの行動数:10 通りフィールド分割数:48 個

また、敵がエージェントの近傍にいるかどうかの判定は、最も近い敵とエージェント間の距離が ball\_kickable\_area × 1.5 以内かどうかで行うことにした。初期個体群は、有効であると思われる戦略を hand-coding で作成した。進化型計算を 1000 世代実行し、500 世代目と 1000 世代目で得られた個体を初期個体と 10 回対戦させた結果を表 1 に示す。

表1より、500世代では初期世代よりも弱くなっていることがわかる。これは、500世代ではまだ探索回数が少なく、hand-coding された初期世代のほうが有効な手段をとっていたからだと考えられる。1000世代では、初期世代よりは強くなっているが、まだ戦略として有効で

表 1 初期世代との対戦結果

	500 世代	1000 世代
勝ち数	1	4
負け数	5	2
引き分け	4	4
平均得点	0.6	0.9
平均失点	1.3	0.7

はないと考えられる部分が多くあり、より多くの時間をかけて広く探索する必要がある。ただ、世代が進むにつれて少しずつゴール前で連続プレイをするような行動が学習されている事が観察されており、世代が進むにつれて有効な強調プレイを獲得することが期待される。また、より有効な戦略をつくるためにも、パスやドリブルといった低レベルの行動を更に改良することも必要である。

# 3 おわりに

本論文では、進化型計算を用いてサッカーチームの戦略を学習する手法の提案を行った。数値実験により、提案手法によりチーム戦略が徐々に良くなっている事が確認された。

# 参考文献

[1] 中島智晴,有働昌代,石渕久生,"ファジィQ学習によるサッカーエージェントの行動獲得",日本知能情報ファジィ学会誌, Vol.15, No.6, pp.702-707, (2003).

# 問い合わせ先

中島 智晴

大阪府立大学大学院 工学研究科 〒 599-8531 大阪府堺市学園町 1-1

TEL: (072)254-9351 FAX: (072)254-9915

E-mail: nakashi@ie.osakafu-u.ac.jp

# 遺伝的アルゴリズムを用いたファジィ決定木 生成手法の改良(その2)

Improvement of Generation Method of Fuzzy Decision Tree by Genetic Algorithm(2)

馬野 元秀 喜夛 主季 堀 和憲 瀬田 和久 宇野 裕之 Motohide Umano Kazuki Kita Kazunori Hori Kazuhisa Seta Yushi Uno

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科

Department of Mathematics and Information Sciences College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

**Abstract** In a genetic algorithm for generating fuzzy decision trees, we proposed a method that the rate of correct answers, the number of nodes and the degree of duplication of attributes in all paths from the root node to leaf nodes are considered as a fitness value. In this paper, we propose a method that a number of fuzzy sets for a attribute. As a result of simulations, the number of nodes of fuzzy decision trees decrease and the better tree can be found.

# 1. はじめに

従来,ファジィ決定木の生成にはファジィID3やそれを改良した方法が用いられてきた[1].しかし,ファジィID3では決定木をルート節点から順に生成するので解候補をかなり絞ってしまう.そこで,遺伝的アルゴリズムを用いることでファジィID3より広い解候補を調べ,ファジィ決定木を生成する方法を提案した[2][3].文献[2]では,GAの選択における評価方法として正解率を,文献[3]では正解率に加えて木の大きさと根から葉節点までの属性の重複回数を考慮した.今回は,より簡単な決定木を生成するために,同じ属性に対して異なる数のファジィ集合を使うことができるように改良した.これにより,より適応度が高い決定木を生成できると思われる.そして,このシミュレーションの結果について述べる.

# 2. ファジィ決定木

通常の決定木では、ルート節点から出発して、テスト節点における属性を調べながら、属性値に応じて枝をたどり、到達した葉節点のクラスを推論結果とする.

ファジィ決定木では、枝に属性値としてファジィ

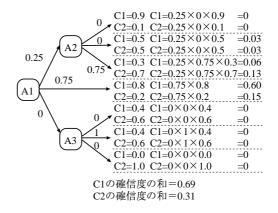


図 1: ファジィ決定木における推論の例

集合を持ち, 葉節点に複数のクラスとその確信度を 持つことが可能である.

ファジィ決定木を用いた推論では、テスト節点で データの属性値から各枝のファジィ集合の一致度 を求め、一致度とともに枝をたどっていく. 葉節点 に到達したら、パス上のすべての枝の一致度とク ラスの確信度との積を求める. そして、各クラスご とに和を求め、その和が最大のクラスを推論結果と する.

図 1 は属性 A1, A2, A3 を持つ三つのテスト節点からなるファジィ決定木に対して、データ  $\{A1=3.5,$ 

A2=7.5, A3=5} を用いて推論を行った例である. 推論結果として C1 を得たことを示している.

## 3. ファジィ決定木の生成

この手法は決定木の形を遺伝的アルゴリズム (GA) を使って決め, 葉節点における確信度はデータを使用して決める.

# (1) 初期個体の生成

ルート節点から順にランダムに属性を選んで行く、このとき、同時に属性値をいくつ持つかも決める。また、ルート節点から葉節点までの一つのパスの上に同じ属性が現れないという条件をつけた。図2はこのような初期個体の例である。ここで A1、A2、A3 は属性名であり、A1 の枝のファジィ集合が二つの場合と三つの場合がある。

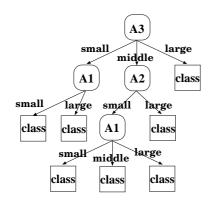


図 2: 初期個体の例

# (2) 交叉

ファジィ決定木の交叉には部分木交換交叉を用いる.図3では、親となる二つのファジィ決定木から一つずつランダムに部分木を選び(太線部)、これらを入れ換えている.このとき、ルート節点から葉節点までのパス上に同じ属性が表われる場合もあるが、交叉演算としては禁止しない(評価に含める).

#### (3) 突然変異

ファジィ決定木のすべてのテスト節点で突然変異を行うかどうかを判定する. 突然変異する場合はテスト節点の属性を他の属性に変える. 図 4の例では A3 が A1 に変異した.

# (4) 葉節点における確信度の決定

上の(1)~(3) で GA によりファジィ決定木の形を決めた. 葉節点のクラスの確信度はデータにより決定する. 図 4の右のようなクラスの確信度が決まっていない決定木について考える. クラスの確

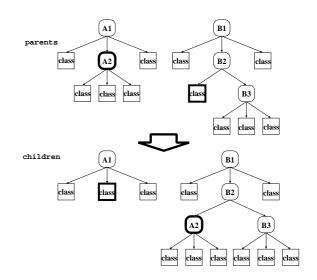


図 3: 交叉の例

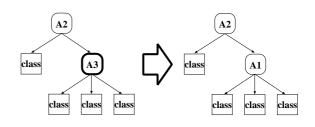


図 4: 突然変異の例

信度決定用データ {A1=5.6, A2=2.6, クラス=C2} に対する処理方法を図5に示す. ルート節点の属性 が A2 なので、属性値 2.6 の各枝のファジィ集合に 対する一致度を求める. いまは, small: 0.3, large: 0.7 となるとする. 枝 small を確信度 0.3 と共にた どると葉節点に到達する. データのクラスは C2 な ので、葉節点の C2 の確信度に 0.3 を加える (すべ ての葉節点のすべてのクラスの確信度の初期値は0 とする). 次に、枝 large を確信度 0.7 と共にたどる とテスト節点で、その属性は A1 なので属性値 5.6 とファジィ集合の一致度を求める. いまは、small: 0. middle: 0.2, large: 0.8 となるとする. すると、 枝 small をたどると葉節点になるので、パス上の 一致度の積 0.7× 0 を葉節点のクラス C2 の確信度 に加える. 同様にして, 枝 middle, 枝 large も処理 する.

そして、他のクラス決定用データもすべて同様に処理し、各葉節点で累積された確信度を正規化し、最終的なクラスの確信度とする。また、データの来なかった葉節点では、すべてのクラスの確信度を0として処理をする。

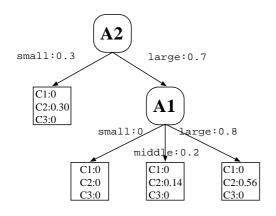


図 5: クラス決定

# (5) 評価

評価方法としては, 文献 [3] で提案した正解率と 木の大きさと重複回数を考慮したものを, 次式で求めた.

評価値= 
$$(1 - \alpha - \beta) \times$$
 正解率  
+ $\alpha \times$  木の大きさ +  $\beta \times$  重複度

ただし  $\alpha$ ,  $\beta$  は重みである. また, 木の大きさはすべての節点の数を正規化したもので, 重複回数はルート節点からすべての葉節点までのパス上で, 属性が重複している回数を正規化したものである.

# (6) ファジィ集合の決め方

今回の手法では属性に二つのファジィ集合と三つのファジィ集合を用いる。データの各属性の最小値、平均値、最大値をそれぞれa,b,cとしたとき、ファジィ集合が二つの場合はZ(u;a,c)とS(u;a,c)を使用し(図6の左)、三つの場合はZ(u;a,c)とpi(u;a,b,c)とS(u;a,c)を使用して決める(図6の右)。ここで、関数Z(u;a,c),pi(u;a,b,c),S(u;a,c)は、実数値上で定義される標準関数で2次曲線により定義されている[4].

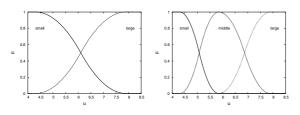


図 6: ファジィ集合

# 4. 数值実験

以上の方法を用いて,各属性にファジィ集合を二つ定義した場合(GA1)と三つ定義した場合(GA2)

と両方を定義した場合 (GA3) を比較するための数値実験を行った. データとして属性数 4, クラス数 3, データ数 150 のアヤメデータと, 属性数 10, クラス数 4, データ数 220 の油中ガス分析データ [5] と, 属性数 13, クラス数 3, データ数 178 のワインデータを使用した. クラス決定用データと評価用データは, 2-fold cross validation 法を用いて 100回の試行を行い, 最高適応度になった決定木の適応度, 正解率, 節点数, 重複回数, ファジィ集合が二個のテスト節点数と三個のテスト節点数の 100回での平均値と最高値と最低値を表 1, 表 2, 表 3 に示す.

このとき、次世代の個体選択は、ルーレット選択を用いて、評価値が一番高いものをエリート保存する。 また、パラメータは、個体数 21 (うち 1 はエリート保存用)、交叉率 0.4、突然変異率 0.05、世代数 100 とし、評価値のパラメータは  $\alpha=0.1$ 、 $\beta=0.1$  とした.

## 考察

# (1) アヤメデータを使用した場合

GA1は GA2, GA3に比べ正解率が少し低くばらつきがある. 節点数の面では GA1は他の二つに対し劣っている. 理由として, アヤメデータの属性値がクラスによってきれいに三つに分かれているのでファジィ集合が二つの場合は良い結果にならなかったと考えられる. GA2, GA3では GA3の方が平均節点数が少なくなっている.

#### (2) ワインデータを使用した場合

GA1は GA2, GA3に比べ正解率が少し低くばらつきがある.しかし,木の大きさの面では大幅に他の二つよりも良いが,全体的に見て常に良い決定木ができているとはいえない. GA2, GA3では全体的に良い決定木ができ,アヤメデータと同じくGA2に比べ GA3の方が平均節点数が減っている.

# (3)油中ガスデータを使用した場合

GA1においてはあまり良い結果が得られなかった.ファジィ集合が二つの場合,うまくデータを分割できず,節点数が少ないものが選ばれたと思われる.GA2に比べGA3の方が平均節点数が少ないが正解率も低い.GA2,GA3では正解率と節点数の面で一長一短があり、どちらが良いかは一概には言えない.両方とも文献[3]に比べ値がかなり低いのは,専門家の作ったファジィ集合を使用していないからと考えられる.

全体的な傾向として, GA1は GA2, GA3に比べ

て正解率が少し低く, ばらつきがある. これは, ファジィ集合が二つなのに対し, クラスが三つ以上あるデータを使用したので, 全体的に GA1 は評価が低いと考えられる. GA3 は GA2 に比べて, 正解率はほぼ同じで節点数を低く抑えることができている. したがって, テスト節点でファジィ集合の数を変えることで, 前手法よりも良い決定木を求められたと言える.

# 5. おわりに

本論文では、テスト節点において異なる枝のファジィ集合を用いる方法を提案し、シュミレーションを行なった. その結果、節点数が減りある程度良い決定木が求められた. しかし、まだパラメータについて充分な検討をしていないので、今後改良を加えていきたい.

# 参考文献

- [1] 堀 和憲, 馬野 元秀, 瀬田 和久, 宇野 裕之, 岡田真: 「ファジィ決定木生成法 ファジィC4.5 とその改良(その3)」, 第 18 回ファジィシステムシンポジウム, pp. 237-240 (2002)
- [2] 馬野 元秀, 吉村 正義, 鳩野 逸生, 田村 坦之: 「遺伝的アルゴリズムによるファジィ決定木の 生成」, 第12回ファジィシステムシンポジウム, pp. 823-826 (1996)
- [3] 馬野 元秀, 喜夛 主季, 堀 和憲, 瀬田 和久, 宇野 裕之, 岡田 真:「遺伝的アルゴリズムを用いた ファジィ決定木生成手法の改良」, 第19回ファ ジィシステムシンポジウム, pp. 449-452 (2003)
- [4] Zadeh, L.A.: "Fuzzy Logic and Approximate Reasoning," Synthese, Vol.30, pp. 407–428 (1975)
- [5] 河内 二三男, 松浦 敏之:「油中ガス分析診断 エキスパートシステムの開発と実用における評 価」, 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-90-40 (1992)

[問い合わせ先]

〒599-8531 堺市学園町 1-1

大阪府立大学 総合科学部 数理·情報科学科

馬野 元秀

TEL: 072–254–9675 FAX: 072–254–9930

Internet: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

表 1: アヤメデータの数値実験の結果

評価方	法	GA 1	GA 2	GA 3
	平均	0.924	0.968	0.967
適応度	最高	0.957	0.977	0.982
	最低	0.835	0.942	0.942
	平均	0.920	0.965	0.963
正解率	最高	0.967	0.973	0.980
	最低	0.800	0.940	0.940
	平均	15	13.39	12.54
節点数	最高	27	64	47
	最低	7	4	4
	平均	1.47	0	0.05
重複回数	最高	11	0	3
	最低	0	0	0
	平均	7	_	1.75
二個	最高	13	_	11
	最低	3	_	0
	平均	_	4.13	2.68
三個	最高	_	21	12
	最低	_	1	1

表 2: ワインデータの数値実験の結果

3X 2. 7 1		7 V 3		
評価方	法	GA 1	GA 2	GA 3
	平均	0.915	0.924	0.926
適応度	最高	0.964	0.971	0.975
	最低	0.762	0.860	0.879
	平均	0.904	0.932	0.925
正解率	最高	0.966	0.972	0.978
	最低	0.753	0.854	0.860
	平均	26.96	87.43	52.41
節点数	最高	51	214	115
	最低	7	10	12
	平均	0.28	0	0.02
重複回数	最高	8	0	$^2$
	最低	0	0	0
	平均	12.98	_	10.21
二個	最高	25	_	23
	最低	3	_	0
	平均	_	28.81	10.33
三個	最高	_	71	25
	最低	_	3	1

表 3: 油中ガス分析データの数値実験の結果

O. IM 1 74	- · / J V	1/ /	*/ 3/\ IIE./	ノくのく・ノバリ
評価方	法	GA 1	GA 2	GA 3
	平均	0.672	0.743	0.724
適応度	最高	0.686	0.797	0.775
	最低	0.654	0.668	0.672
	平均	0.593	0.703	0.670
正解率	最高	0.614	0.786	0.736
	最低	0.568	0.605	0.595
	平均	11.84	76.09	47.93
節点数	最高	33	250	126
	最低	1	7	4
	平均	0.02	0.15	0.05
重複回数	最高	2	7	5
	最低	0	0	0
	平均	5.42	_	8.30
二個	最高	16	_	23
	最低	0	_	0
	平均	_	25.03	10.11
三個	最高	_	83	29
	最低	_	2	1
•			•	•

# 異なる遺伝操作を行う分散型遺伝的アルゴリズム

# A Distributed Genetic Algorithm Applying Different Genetic Operations to Each Group

○中井清司 渡邉諭士<sup>†</sup> 渡邊俊彦

Kiyoshi Nakai <sup>†</sup> Satoshi Watanabe Toshihiko Watanabe

Osaka Electro<sup>†</sup> Graduate School of Engineering,

Communication University Osaka Electro-Communication University

**Abstract:** In genetic algorithm optimization, early convergence often happens through generation alternation. In order to avoid the situation individuals in GA should be sufficiently varied in whole generations(Diversity maintaining). This paper describes a distributed genetic algorithm applying different genetic operations to each group. Through numerical experiments of traveling salesman problem, the algorithm was found to be effective in terms of accuracy of the solution and efficiency of calculation.

#### 1. はじめに

スケジューリング問題などの組合せ最適化問 題や機械学習に有効なアプローチとして遺伝的 アルゴリズム(Genetic Algorithm; GA)の研究が進 められている。GA は汎用性の高い手法であるが、 その問題点として、局所解への早期収束があげ られる。早期収束は集団内の多様性が失われる ことによって生じる現象である。GA においては 形質遺伝と共に多様性の維持が重要であるため、 優れた世代交代を行う遺伝操作が必要である。 単一母集団 GA(Single Population GA; SPGA) による解法においては、近親配合の抑制や、多 様性に優れた交叉オペレータの導入が一般的で ある。また、母集団多様性の維持に優れた手法 として分散型遺伝的アルゴリズム(Distributed GA; DGA) が提案されている。本研究では各集団 で異なる遺伝操作を行う分散型遺伝的アルゴリ ズムを提案し、巡回セールスマン問題(Traveling Salesman Problem; TSP)に適用して、解の多様性 の維持と効率化について評価した結果を述べる。

#### 2. 分散型遺伝的アルゴリズム

図1のような遺伝操作で構成される GA は近似解法の一種であるが、大規模な最適化問題を扱う際には、非常に計算負荷が高くなる傾向がある。そこで並列分散処理による負荷軽減と高速化を目的とした可能とする DGA が提案されている[1]。DGA は高速化と同時に多様性に優れるという特徴を兼ね備えている。DGA では母集団を複数のサブ集団に分割し、それぞれ独立に遺伝操作を施すことで局所解の母集団への伝播を避け、より良い解を得ようとする考え方である。このような DGA は島モデルと呼ばれる。DGA においても、SPGA と同様に、世代を重ねると、次第に多様性は失われる。そこで、一定間隔で異なる集団間で移住と呼ばれる個体の交

換を行うことにより、母集団全体での多様性の 維持を図っている。

しかし、TSP のような離散最適化問題において多様性の維持と解探索能力の向上を目的とした場合、単純な集団分散では各集団で類似した個体の交換が行われるため、集団分散による効果は十分ではないと考えられる。

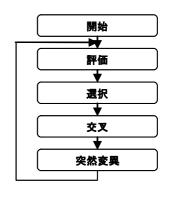


図 1 SPGA の遺伝的基本操作

# 3. 異なる遺伝操作を行う DGA

# 3.1 概要

一般的な DGA では全てのサブ集団において同じ遺伝操作を行う。本研究の DGA では個体をメイン集団とサブ集団の二つに分割し、遺伝操作を行っている。そこで各集団で異なる遺伝操作を行う方法を考える。本研究ではメイン集団は、通常と同様の遺伝操作を行い、サブ集団では総当りによる戦略を用いるものとした。図 2に示すようにメイン集団で生成されるユニークな個体の適応度に関する上位 M 個をサブ集団に移住し、サブ集団中で総当りによる遺伝操作を行う。ただし、この間、メイン集団においても通常の遺伝操作は行われているものとする。サブ集団内で総当りによる戦略を N 世代適用した後、サブ集団内の個体をメイン集団に移住する。

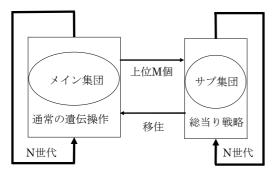


図2 異なる遺伝操作を行う DGA

#### 3.2 世代ギャップ

各集団に収束速度の異なる遺伝操作を適用することにより、多様性に優れた個体をメイン集団に生成することを目的とした。図3のようにサブ集団から移住完了直後のメイン集団内では、サブ集団で生成された個体が上位を占め、通常の遺伝操作によって生成される個体間の適応度に著しい差が生じる。つまり、各集団間で世代ギャップが発生することになる。この世代ギャップにより、多様性に優れた個体同士の交叉が可能となる。

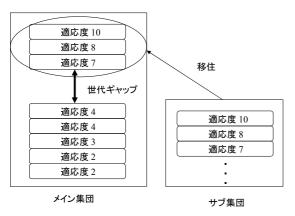


図3 移住完了時における世代ギャップ

#### 3.3 総当りによる戦略

基本的な GA では、2 個体の親から、2 個体の子が作られる。本研究の総当りによる戦略では、サブ集団では、図 4 に示すような 1 個体の親と集団内の全個体間の交叉によって子集団が生成される。この子集団を family と呼び、family の中で最高適応度の個体が次世代に残る。

以下にサブ集団で行われる総当りによる戦略

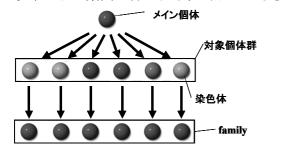


図4総当りによる戦略イメージ

のアルゴリズムを示す。ここで K をサブ集団のサイズとする。

Step 1:親 L と親 M(1~N)を交叉させる。Step 2:Step 1 で生成された子個体(N 個)中、最高適応度の個体を L'とする。

Step 3:上記の操作を親 L(1~N)に対して行う。 Step 4:L'集団(N 個)を元の集団に戻す。

## 3.4 総当りによる戦略の性能の評価

総当りによる戦略の性能を評価するため、シミュレーションを行う。性能評価として都市数が 51 である TSP のベンチマーク問題 (Eil51[3] Minimum Total Distance 426)に対し、SPGA と比較した。SPGA で用いた手法および、パラメータを表 1 に示す。また、両手法ともに母集団サイズを 400、最大世代数を 500 とし、図 5 に各世代での最良解の評価関数値を示す。

表 1 SPGA パラメータ

コーディング	パス表現
交叉法	PMX[2]
突然変異法	2-change[4]
交叉率	0.9
突然変異確率	0.05
エリート保存数	1

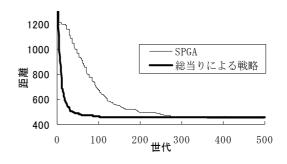


図 5 総当り戦略による最適化結果

図 5 に示すように、SPGA では世代後半においても最良解の更新が行われているが、総当りによる戦略では 100 世代付近で局所解に達している。つまり、総当りによる戦略は SPGA と比較し、極めて収束が速いことが分かる。ただし、1世代あたりの計算量は、p を母集団サイズとすると、通常ではO(p) であるのに対し、今回の手法では $O(p^2)$ となる。

10回試行での最良解の平均は総当りによる手法では、454.1、SPGAでは446.0となり、SPGAが優れている。また、総当りによる戦略は最高適応度の個体が次世代に残るため、山登り法に近い性質を有している。その結果、局所解に陥りやすく、多様性に関して、通常のGAと比較して劣っていると考えられる。しかしながら、1世代での収束効率に関しては非常に優秀である。さらに、母集団サイズが小さい場合においても解の劣化が少ないため、DGAのサブ集団内で適用することで良好な解探索が可能となる。

## 4. 数值実験

異なる遺伝操作を行う DGA を TSP に適用し、 解探索能力、多様性および、計算コストの 3 つ の評価基準により性能評価を行う。性能比較対 象としてSPGAと一般的なDGAを用いた。SPGA と DGA では解探索のメカニズムが異なるため、 同じパラメータによる評価は適切ではないと考 えられる。そこで、SPGAでは別途調節したパラ メータを用いる。DGA と提案手法は、同じパラ メータを使用した。多様性に関しては、母集団 内におけるユニーク個体の占める割合で評価す る。GA は全探索や近傍探索と比較し、高速に近 似解を求めることが可能なアルゴリズムである ため、少ない計算コストによる解探索が行われ る。本研究では異なる遺伝操作を行う DGA、一 般的な DGA、SPGA について、解探索に要した 時間をコストと定義する。また、DGA は並列分 散処理を行わず、全ての手法で同スペックのシ ングルプロセッサによって検証する。

異なる遺伝操作を行う DGA と一般的な DGA および、SPGA の性能評価を行うため、TSP(Eil101 Minimum Total Distance 629)の最適化を行う。表2 に解探索能力の性能評価に用いたパラメータを示す。

タ
Þ

パラメータ	DGA	SPGA
メイン集団サイズ	100	400
サブ集団サイズ	10	-
移住間隔(世代)	10	-
交叉確率	0.8	0.9
突然変異率	0.1	0.05
エリート保存数	2	1
最大世代数	3000	3000

両手法ともにパス表現によるコーディング、 突然変異に 2-change、交叉に PMX を用いている。 また、1 世代毎に 2-opt 法による近傍探索を各個 体に 3 回導入する。

#### 4.1 解探索能力の評価

図 6 に、提案手法 DGA と一般的な DGA の最良解の変化を示す。

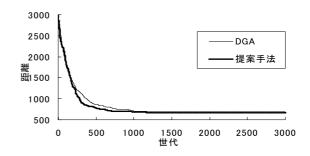


図6DGAによる最良解の推移

図6より提案手法はDGAと比較し、収束効率が向上していることがわかる。提案手法による最良解の10回平均が689.6に対し、DGAでは694.1、SPGAでは694.8となり、提案手法の解探索能力は優れていると考えられる。また、提案手法では、小規模なサブ集団にもかかわらず母集団を分散させたことによる効果が得られている。一方、一般的なDGAはSPGAと最良解、収束効率ともに大きな差は見られなかった。これは、10個体という小規模な集団による遺伝操作では解探索への影響は少ないためであると考えられる。

#### 4.2 多様性に関する評価

提案手法で求められた解の多様性を評価するため、母集団内におけるユニーク個体数の平均を比較する。SPGAでは29.1個体に対し、DGAでは34.9個体、提案手法では42.9個体となり、SPGAと比較し1.5倍程度ユニーク個体が母集団内に含まれることから、提案手法は多様性に優れた手法であるといえる。

SPGA と DGA では解探索の能力では差が見られなかったがユニーク個体数は増加している。今回のように小規模な集団の移住であってもユニーク個体が増加した要因は、メイン集団とサブ集団中の個体数に大きな差があるためであると推測される。その結果、DGA においては各集団間で異なる性質を有することが多様性の維持につながると推測される。

図7、図8はメイン集団内におけるユニーク個体の割合を解探索が頻繁に行われている1000世代までに注目した個体適応度を示している。図7に見られるようにSPGAでは350世代付近から急激に多様性を失っている。集団内にエリート個体が蔓延すると、解探索の途中であってもこのように多様性が失われてしまう。一方、提案手法ではSPGAとは異なり、図8に示すように緩やかに、ユニーク個体が減衰し、多様性を維持しながら収束している。このような個体

分布の方が多様性を維持するための理想により 近い状態であるといえる。

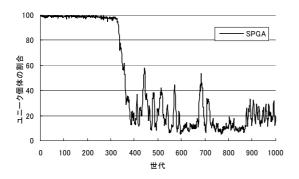


図7SPGAのユニーク個体の割合

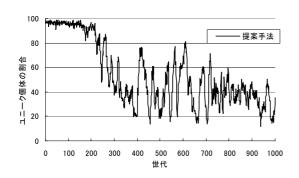


図8 提案手法のユニーク個体の割合

#### 4.3 計算コストの評価

異なる遺伝操作を行う DGA、一般的な DGA、SPGA および、近傍探索について計算コストの比較を行った。終了世代は 10 回の試行で解の更新が終了した世代の平均とし、終了世代までの時間(秒)を計算コストとする。

近傍探索は 2-opt 法を使用し、1 世代、1 個体に対し、30 数回の探索を行うものとし、集団サイズは SPGA と同様に 400 とする。図 9 に各手法の計算コストの評価結果を示す。

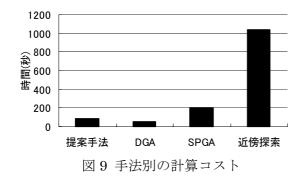


図9より、異なる遺伝操作を行うDGAでは、 一般的なDGAと比較し、探索に時間を要する。 これは総当りによる戦略の計算量の増加分が影

響しているためである。しかし、SPGA や近傍探索と比較すると、はるかに高速であり、GA による高速な解法として妥当な範囲であると考えられる。また、計算コストに関しては一般的な DGA には劣るが、解探索能力では勝るため、異なる遺伝操作を行う DGA は有効な戦略となり得ると考えられる。

# 5. おわりに

本研究では GA の解探索を効率的に行うためには、多様性の維持が不可欠であるという立場から、異なる遺伝操作を行う DGA を提案し、既存手法と比較し、評価を行った。

異なる遺伝操作を行う DGA を代表的な最適 化問題である TSP に適用し、既存手法と比較し た結果、多様性の維持に優れ、その有用性が確 認された。その反面、母集団の分散による移住 パラメータや、総当りによる戦略などの新たな 遺伝操作が加わるため、パラメータの設定がさ らに複雑化するという問題も生じる。

多様性の維持について述べてきたが、GAにおいては、形質遺伝についても考慮しなければならない。本研究で用いたPMXは、形質遺伝を考慮した手法とはいえないため、さらに大規模な最適化問題を解く場合、形質遺伝に優れた交叉オペレータを検討する必要がある。

# 参考文献

- [1]R. Tanese: Distributed Genetic Algorithms, Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, pp434-439, 1989.
- [2] D. E. Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, 1989.

#### [3]TSPLIB

http://www.iwr.uni-heidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB95/, 1995

[4]D. J. Rosenkrantz, R. E. Stearns and P. M. Lewis: An analysis of Several Heuristics for the Traveling Salesman Problem, *SIAM J. Computing*, Vol. 6, No. 3, pp. 563-581, 1977.

# 連絡先:

 $\mp 572 - 8530$ 

大阪府寝屋川市初町 18番8号

大阪電気通信大学 工学部第一部電子工学科

渡邊俊彦

電話: 072-824-1131(代表) FAX: 072-824-0014(代表) Email: t-wata@isc.osakac.ac.jp

# 遺伝的手法によるファジィルールの選択における識別境界の調整 Controlling Classification Boundaries in GA-Based Fuzzy Rule Selection

大阪府立大学 大家 広規,難波 聡,石渕 久生 H. Ooya, S. Namba and H. Ishibuchi Osaka Prefecture University

**Abstract** This paper proposes a genetic-algorithm-based method for selection a small number of fuzzy if-then rules to construct a compact fuzzy system with high classification power. The evolution of rule sets tends to overfit to training patterns. In this paper, we examine the use of an additional term for controlling classification boundaries in genetic rule selection.

#### 1 はじめに

本研究では、識別器の設計問題を、正しく識別される学習用パターンの数の最大化、識別器を構成するルール数の最小化、ルールの長さの総和の最小化という3目的最適化問題として取り扱う.このとき、目的の1つである正しく識別される学習用パターンの数に付加的な項を加えることにより、学習用データへの過剰適合が少ないファジィ識別器を構築する.

# 2 ファジィ識別システム

n 次元 M クラスのパターン識別問題を考える.この問題に対して m 個の学習用パターン  $\mathbf{x}_p,\, p=1,...,m$  が与えられているとする.本研究では,以下の形式のルールを用いてパターン識別を行う.

Rule 
$$R_q$$
: If  $x_1$  is  $A_{q1}$  and ... and  $x_n$  is  $A_{qn}$  then Class  $C_q$  with  $CF_q$ 

ここで, $R_q$  はルールのラベル, $\mathbf{x}=(x_1,\ ...,\ x_n)$  は n 次元入力パターン, $\mathbf{A}_q=(A_{q1},\ ...,\ A_{qn})$  はルールの条件部ファジィ集合, $C_q$  はルールの結論部クラス, $CF_q$  はルールの確信度である.ルールの条件部のファジィ集合として,文献 [2] と同様に,各軸の 2 分割から 5 分割までに対応した 14 種類の三角型ファジィ集合と "don't care" を用いる.図 1 に 14 種類の三角型ファジィ集合を示す.

入力パターン  $\mathbf{x}_p$  の識別は , ルール  $R_q$  の条件部  $\mathbf{A}_q$  への適合度  $\mathbf{A}_q(\mathbf{x}_p)$  とルールの重み  $CF_q$  との積が最大となる single winner ルール  $R_W$  を用いて行われる . まず , 各クラス (c=1,2,...,M) ごとに single winner ルールを以下の式により求める .

$$CF_{W_c} \cdot \mathbf{A}_{W_c}(\mathbf{x}_p) =$$

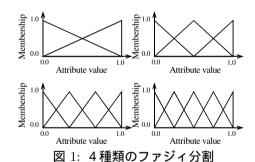
$$\max\{CF_q \cdot \mathbf{A}_q(\mathbf{x}_p) | C_q = \text{Class } c, R_q \in S\} \quad (2)$$

ここで,S はファジィ識別器を構成するルール集合, $W_c$  はクラス c を結論として持つファジィルールのなかで適合度と確信度の積が最大であるルールのラベル, $CF_{W_c}$  はそのルールの確信度,  $A_{W_c}$  はそのルールの適合度である.ルール集合 S 全体での single winner ルール  $R_W$  は以下のようになる.

$$CF_W \cdot \mathbf{A}_W(\mathbf{x}_p) =$$

$$\max\{CF_{W_c} \cdot \mathbf{A}_{W_c}(\mathbf{x}_p) | c = 1, 2, ..., M\}$$
 (3)

学習用パターンに対する識別結果として,ルール  $R_W$  の結論部クラスを出力し,出力が教師クラスと同じであればそのパターンは正しく識別されたことになる.



進化型計算によるルール選択

# 本研究では,識別器の設計問題を以下の3目的最適化問題として取り扱う.

Maximize  $f_1(S)$ , minimize  $f_2(S)$ ,

and minimize  $f_3(S)$  (4)

ここで, $f_1(S)$  はルール集合 S により正しく識別される学習用パターンの数, $f_2(S)$  は S に含まれるルールの数, $f_3(S)$  は S に含まれるルールの長さの総和である.なお,遺伝的ルール選択においては,ルール集合 S は長さ N のバイナリ記号列で表される.

$$S = s_1 s_2 \dots s_N \tag{5}$$

#### 3.1 3目的最適化アルゴリズム

本研究では, 文献 [2] と同様に 2 段階のルール選択を 行う. まず, Heuristic 手法によりファジィルールを生成 し, 次に遺伝的選択により 3 目的最適化を行った.

# Step 1)Heuristic なルール抽出

まず,長さが3までのルールを作り出す.そして以下の式により  $f_{SLAVE}$  の値を求め,クラスごとにその値が高いものから順に 300 個づつ遺伝的ルール選択における候補ルールとして取り出した.

$$s(\mathbf{A}_q \Rightarrow \text{Class } h) = \frac{1}{m} \sum_{\mathbf{x}_p \in \text{Class}} A_q(\mathbf{x}_p)$$
 (6)

 $f_{SLAVE}(R_q) =$ 

$$s(\mathbf{A}_q \Rightarrow \text{Class } C_q) - \sum_{\substack{h=1\\h \neq C_q}}^{M} s(\mathbf{A}_q \Rightarrow \text{Class } h)$$
 (7)

## Step 2)NSGA-II を用いた遺伝的多目的最適化

Step1 において得られた 300M 個の候補ルールを用いて遺伝的多目的最適化を行った. 具体的には NSGA-II[1]を用いた.この手法は,非劣性と多様性の観点から個体の評価を行い,その評価に基づき遺伝的探索と世代更新を行うものである.

#### 3.2 追加尺度の導入

本研究では, $f_1(S)$  に識別境界の調整のための項である g(S) を加える.

$$f_1(S) = NCP(S) + \cdot g(S) \tag{8}$$

ここで,NCP(S) は正しく識別される学習用データの数, は事前に設定された正の定数,g(S) は性能に対する追加評価尺度であり,以下のように定義される.まず,パターン  $\mathbf{x}_p$  の属する真のクラス  $c^*$  (教師クラス) に対する出力値の割合をそのクラスに対する確信度と呼ぶことにし,次のように定義する.

$$(\mathbf{x}_p, \text{Class } c^*) = \frac{CF_{W_c} \cdot \mathbf{A}_{W_c} (\mathbf{x}_p)}{\sum_{c=1}^{M} CF_{W_c} \cdot \mathbf{A}_{W_c} (\mathbf{x}_p)}$$
(9)

全ての学習用パターンに対する教師クラスの確信度の総和をg(S)として用いる.

$$g(S) = \sum_{p=1}^{m} (\mathbf{x}_p, \text{Class } c^*)$$
 (10)

## 4 数値実験

本研究では,提案手法の有効性を調べるために,wine データに対して 10-CV 手法を以下の条件で適用した.

候補ルールの数: 300×3 個体群の大きさ: 200 世代数: 50 交叉確率: 0.8

突然变異確率:

 $1\Rightarrow 0$  のとき 0.1  $0\Rightarrow 1$  のとき  $1/(300\times 3)$  値: 0.1

の値:

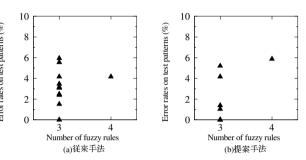


図 2: 調整項を用いない場合(左)と用いた場合(右)

数値実験の結果を図2に示す.ルール数3の場合において,誤識別確率において平均で約1%の改善が見られた.

#### 5 おわりに

本研究では,多目的遺伝的ルール選択において過剰適合を防ぐために,適応度関数に新たな評価尺度を追加することにより,識別境界を調整できることを示した.

# 参考文献

- [1] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T.: A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No.2, pp. 182-197, 2002.
- [2] Ishibuchi, H., and Yamamoto, T.: Effects of Three-Objective Genetic Rule Selection on the Generalization Ability of Fuzzy Rule-Based Systems, Proc. of 2nd International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, pp. 608-622, 2003.

#### 連絡先:大家 広規

大阪府立大学工学部経営工学科

〒 599-8531 大阪府堺市学園町 1番 1号

Phone: 072-254-9351 FAX: 072-254-9915

E-mail: ooyahiro@ie.osakafu-u.ac.jp

# 人間を誘導する案内ロボットの経路計画法

# Path planning method for guide robots that guides humans

溝渕宣誠 1)王 碩玉 1)河田 耕一 1)Yoshinobu MizobuchiShuoyu WangKoichi Kawada1):高知工科大学2):松下電器産業Kochi University of TechnologyMatsushita Electrical

河田 耕一 <sup>1)</sup> 山本 正樹 <sup>2)</sup>
Koichi Kawada Masaki Yamamoto
2):松下電器産業(株)

Matsushita Electric Insustrial Co., Ltd

Abstract: Recently, human-friendly robots are expected to support human daily life with a background of declining population of children and aging problem. The authors are reserching the system that guided by guide robots to support humans by guiding humans in hospitals and welfare facilities, etc. When a guide robot guides humans for the medical examination in hospitals and health centers, path planning is necessary to guide humans safely and efficiently that selects the best destination from each examined destinations and searches for the path to this selected destination. This paper proposes the path planning method that does the goal selection and the path searching, and the effectiveness of the this path planning method is shown.

## 1. はじめに

近年, 少子化・高齢化に伴い, 日常生活をサ ポートできる人間共存型ロボットが望まれてい る.著者らは病院や福祉施設などの屋内で人間 を誘導することで支援的役割を果たす案内ロボ ットを開発することを目的として,案内ロボッ トによる案内サービスシステムの研究を行って いる[1].これまで案内ロボットの経路計画法と しては主にどのようにして被案内者を効率的に 案内する経路を導出するかといった問題を取り 組んできたが、一方で、被案内者に対して案内 ロボットが導出した経路の有効性を伝えること も必要である.本論文では,効率的に案内する 経路を導出するための目標選択,経路探索を行 う経路計画法を提案し,さらに,その経路の有 効性を音声アナウンスにより利用者に提示する システムの構築を目指して、ゴムストリング型 連想記憶アルゴリズム[2]によるテキストテンプ レート検索手法について提案する.

# 2. 案内ロボットの経路計画法

# 2.1 経路計画のアルゴリズム

本研究では,効率的な案内を実現するために,案内サービスにおける経路計画を目標選択,経路探索,経路生成といったそれぞれの段階に分けてプランニングを行い,各段階ごとで最適な解を導出することで現実的な解を獲得することを目指した.

はじめに,前処理として案内役であるロボットにサービスを行っている目標の位置などの案内する施設の地図情報を与える.そして,案内ロボットは案内命令を受けて案内を開始する.

まず,案内ロボットは無線 LAN を介して,各目標から待ち時間や平均サービス時間,目標までの距離などの情報を収集する.これらの情報より,案内ロボットは何らかのアルゴリズムに

基づいて,現時点で最適な目標を選択する.ここまでの過程を目標選択とする.

さらに,通路に設置されたカメラからトラフィック量や通路の幅といった通路情報を獲得し,目標選択で決定された目標までの地図上の最適な経路を探索する.この過程を経路探索とする.

そして,獲得した地図上の経路をもとにして, さらに,案内ロボットに搭載されたセンサから 獲得した実環境の情報にもとづいて,案内に最 適な実経路を決定する.この過程を実経路生成 とする.

経路生成に関しては軌道計画と密接な関係が あるため,本論文では言及せず,以下,目標選 択,経路探索について説明する.

#### 2.2 地図情報の作成

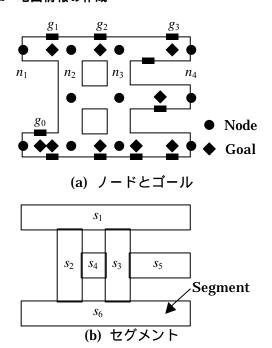


図3 地図のモデル化の例

まず,目標選択,経路探索では,予め環境の 地図情報が必要である.そこで,文献[3]を参考 して,施設の地図を図3のようにノード,ゴー ル,セグメントを用いてモデル化した.ノード は通路の分岐点や端の地点を示している.ゴー ルは案内の目標となる地点を指している.セグ メントは通路を示している.

さらに, ノードとゴールとセグメントの情報を表1のように作成した.表1に示すようにノード情報は, 例えばノードの座標, 隣接するノードなどで示す. ゴール情報は目標の名前,目標の座標, 目標でのサービスの待ち時間などで示す. セグメント情報はパスとなるノードのセット, 通路の幅などで示す. 目標選択, 経路探索を行う際には, この地図情報を利用する.

表 1 地図情報の例

#### (a) ノード情報

ノード番号	ノード座標	隣接ノード番号
$n_1$	(-5.0,30.0)	$n_2$
$n_2$	(10.0,30.0)	$n_1, n_2, n_5$

# (b) ゴール情報

ゴール番号	ゴール名	ゴール座標	待ち時間
$g_0$	受付	(0.0,0.0)	0.5
$g_1$	採血	(5.0,30.0)	1.0

# (c) セグメント情報

セグメント番号	パスとなるノード	通路幅
$s_1$	$n_1$ - $n_2$ , $n_2$ - $n_3$ , $n_3$ - $n_5$	5.0
$s_2$	$n_2$ - $n_5$ , $n_5$ - $n_9$	3.0

# 2.3 目標選択

予め与えられた目標の情報と実時間でえられ る目標の情報を用いて、最適な案内目標を選択 する.目標選択においては,待ち時間も含むト ータルのサービス時間が最小となるように選択 することが理想的である.しかし,実際にトー タルのサービスの時間を最小にすることは,あ る目標での未来の待ち時間を厳密に予測するこ とと等価の問題であり、困難である.むしろ、 簡単な予測からサービスの待ち時間が短い目標 を優先的に選ぶことがここでは現実的な手法で ある .ここで ,サービスを行っている各目標を  $g_i$ として,  $i = 0,1,2,3,\dots,n$  とする. 経路の始点とな る目標を $g_a$ として,ある時刻tにおける $g_i$ での サービスの評価関数を  $f_s^i(t)$ とすると,評価関数 を最適,つまり最小とする目標探索問題は次式 で定義できる.

minimize 
$$\{f_g^1(t), f_g^2(t), \dots, f_g^i(t), \dots, f_g^n(t)\}$$
 (1) subject to  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 

ところで,サービスの待ち時間が長い場合でも,サービスが空いている場合にはそのサービスを優先的に選択する方が効率がよい場合もある.また,サービスまでの経路の情報も考慮することも必要である.特に経路の移動距離情報に着目した場合,あるサービスが待ち時間が短い,混雑していないといった場合でも,そのサービスが他のサービスより遠くにある場合には選択すれべきではない.以上の観点から,目標探索における評価指標としては,目標 $g_i$ でのサービスの待ち時間 $U_i(t)$ ,サービスの混雑度合 $C_i(t)$ ,目標 $g_i$ までの経路の移動距離 $D_i$ とした.

具体的には,目標 $g_i$ において,時刻tにおけるサービス中およびサービス待ちの人の人数 $L_i(t)$ ,平均サービス率 $\mathbf{m}_i$ ,平均到着率 $\mathbf{1}_i$ が与えられたとする.ただし, $L_i(t) \geq 0$ , $\mathbf{m}_i > 0$ , $\mathbf{1}_i < \mathbf{m}_i$ とする.このとき,現在地から目標 $g_i$ までの平均移動時間 $dt_i$ を考慮した場合の待ち時間 $U_i(t)$ は

$$U_{i}(t) = \frac{1}{u_{i}} * (L_{i}(t) + I_{i} * dt_{i}) - dt_{i}$$
 (2)

となる.なお,現在地から目標  $g_i$  までの平均移動時間  $dt_i$  は一意で与えられるものとする.

目標 $g_i$ における人の到着をポアソン到着と仮定した場合,サービス中およびサービス待ちの人の期待人数 $\overline{L_i}$ は

$$\overline{L_i} = \frac{I_i}{m_i - I_i} \tag{3}$$

で与えられる.ここで時刻tにおけるサービスiの混雑度合を示す尺度を $C_{i}(t)$ と定義し

$$C_{i}(t) = \frac{L_{i}(t)}{\overline{L_{i}}} \tag{4}$$

で与える.

また,経路の始点となるロボットの現在地から終点となる目標  $g_i$  までの経路の移動距離  $D_i$  は地図上の現在地から  $g_i$  までの最短経路の距離 が一意的に与えられるものとする.

目標  $g_i$  の評価関数  $f_g^i(t)$  として,前述の評価指標をすべて考慮した場合,次式で示される.

$$f_g^i(t) = w_g^U * U_i(t) + w_g^C * C_i(t) + w_g^D * D_i$$
 (5) ただし, $w_g^U$ , $w_g^C$ , $w_g^D$  はそれぞれに対応している評価指標の重み係数を示している.

#### 2.4 経路探索

経路探索は,地図情報を用いて,前述の目標 選択により決定された目標を終点のゴール番号 として,現在案内役がいる始点から終点までの 最適経路探索を行う.ここで,地図上の最適経 路探索問題は,隣接するノード間の最短経路を パスとして,始点から終点までのパスの組み合 わせの最適化として与えられる.

経路探索手法としては,最良優先探索法,A\*アルゴリズム,Dijkstra 法が代表的な手法として挙げられる.最良優先探索法,A\*アルゴリズムはパスのコストが一意でない場合でも,コストの推定値を利用して,効率的な経路探索を行っている.一方,Dijkstra 法は,パスのコストが一意であるときに,始点から終点までのコストが最小となる経路を少ない計算量で与える.本研究ではパスのコストは一意に求められるので,経路探索手法として Dijkstar 法を用いた.

コストを求める評価関数の指標は,通路の距離,通路幅,トラフィック量を用いた.ある時刻tにおけるノード $n_i$ , $n_i$ 間のパスのコストは

$$f_{p}^{ij}(t) = w_{p}^{D} * D_{ij} + w_{p}^{W} * W_{ij} + w_{p}^{L} * L_{ij} + w_{p}^{T} * T_{ij}(t)$$
(6)

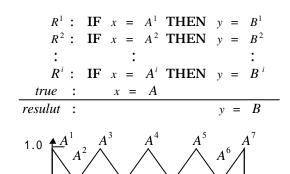
で示す.ただし, $D_{ij}$ , $W_{ij}$  はノード $n_i$ , $n_j$  間の最短距離,通路の幅を示す. $L_{ij}$  は手間へのパスからの曲がり方を示し,曲がった場合には 1,曲がらなかった場合,つまり直進の場合は 0 を与える. $T_{ij}(t)$  は時刻 t におけるノード  $n_i$  , $n_j$  間のトラフィック量を示す. $w_p^D$  , $w_p^W$  , $w_p^L$  , $w_p^L$  , $w_p^T$  はそれぞれの評価指標の重みを示している.

# 3.経路音声アナウンス

案内される被案内者にとって,案内役が案内する経路が必ずしも満足できるものとは限らない.これはいろいろと問題があると思われるが,一つの原因として案内役が選択した経路を被案内者が理解できないためだと考えられる.すなわち,根本的には案内役は案内に関する多くの情報を有しているのに対して,被案内者は限られた情報しか持っていない.そのため,被案内者が案内役から漠然と提示された経路の有効性を理解することは困難である.よって,被案内者に対して案内役が導出した経路の有効性を伝えることが必要である.

本研究では,まず目標選択で獲得した結果の 有効性を利用者にアナウンスするために,ゴム ストリング型連想記憶アルゴリズムを利用した 情報検索システム[4][5]を利用した.

まず,目標となる評価指標と比較対象となる 目標,例えばここでは地図上の最短経路の目標 の評価指標を選択する.ここで,距離型ファジィ推論[6]を用いて評価指標から入力空間に与える刺激を求める.図4に示すように評価指標を前件部として,評価指標の程度を定性的に表現するファジィ集合をいくつか配置する.例えば,評価指標が目標までの距離である場合は"近い","遠い"といったものである.この概念に対応する入力空間に与える刺激の値を与える.これにより距離型ファジィ推論により実際の評価指標の値から入力空間の刺激が求められる.



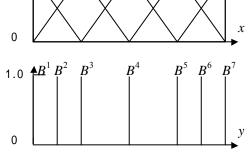


図 4 距離型ファジィ推論

次に,あらかじめ読み上げる文章のテンプレートを準備する.例えば,(比較する対象の目標)は距離が(移動距離の程度)ですが,待ち時間が(待ち時間の程度)ので,待ち時間が(待ち時間の程度)(案内する目標)にご案内します."といった具合である.入力空間の次元として先ほどの推論の後件部を与え,プロトタイプパターンとしてあるテンプレート $T_i$ を想起させるプロトタイプ $p_i$ を記憶させる.次に,先ほど推論によってもとめられた値をもとにして刺激sを作成し,刺激sとプロトタイプ $p_i$ との距離値 $d_i$ を求める.

ここで,距離値 $d_i$ の逆数をとり, $k_i$ とすると図4に示すように考えることができる. すなわち, $k_i$ をバネ定数として,このときのつりあいが安定した点が出力となる.ここで出力の成分が最も大きい値を持つ次元のテンプレートが選択される.なお, $k_{ci}$ はそれぞれのテンプレートの想起のされやすさを示している.また,図4では2次元空間で示したが,実際はテンプレートの数の次元を持つ空間となる.

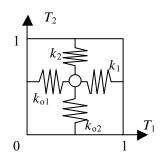


図 4 ゴムストリング型連想記憶アルゴリズム を用いたテンプレート検索の例

さらに,ここで検索されたテンプレートの中にある評価指標の程度を示す言語を獲得するために,入力空間の次元を前件部の評価指標,入力空間のプロトタイプを前件部のファジィ集合,そのファジィ集合の言語ラベルを出力空間の次元として配置し,実際の評価指標の値を刺激として,出力の成分が最も大きい値を持つ次元の言語ラベルを程度を示す言語として獲得する.そして完成したテキストを音声として出力する.

# 4. シュミレーション

以上の経路計画法,及び経路アナウンス手法を用いて経路計画シミュレーションを行った.ここでは, $g_0$  を始点として経路計画を行った.入力情報を表 2 に示す.この入力によって獲得した経路シュミレーション結果を図 5 に示す.

表 2 入力情報

ゴール番号	待ち時間	混雑度合	移動距離
$g_0$	0.0	0.0	0.0
$g_1$	3.0	0.8	45.0
$g_2$	4.0	0.6	45.0
<i>g</i> <sub>3</sub>	2.0	1.0	70.0
<b>g</b> 4	4.0	1.2	50.0
<b>g</b> 5	8.0	1.1	5.0
$g_6$	9.0	1.5	20.0
<b>g</b> 7	6.0	0.7	30.0
$g_8$	7.0	0.9	40.0

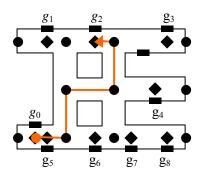


図5 シュミレーション結果

まず,目標探索により $g_2$  が選択された.比較対象となる目標が $g_5$  のとき,音声テキストとして" $g_5$  は距離がたいへん近いですが,待ち時間が長く,混雑しているので,少し遠いですが,待ち時間が少し短く,空いている $g_2$  にご案内します."が出力された.この結果は入力情報から $g_2$  と $g_5$  を比較した場合と同様であることがわかる.次に $g_2$ までの経路が Dijkstra 法によって決定された.なお,より詳細なシミュレーション結果については当日デモを行ってその特徴を説明する

## 5. まとめ

本論文では,効率的に被案内者を案内する経路を導出するための目標選択,経路探索を行う経路計画法を提案し,さらに,選択した経路の有効性を音声アナウンスにより被案内者に提示するシステムの構築を目指して,ゴムストリング型連想記憶アルゴリズムによるテキストテンプレート検索手法について提案した.

# 参考文献

- [1] 溝渕,王,河田,山本:人間との相互関係を 考慮した案内ロボットの制御 Part2 , 第7回知能メカトロニクスワークショップ 講演論文集,pp.45-50,2002
- [2] 王,河田,土谷,連想記憶アルゴリズムの一 提案,システム制御情報学会論文誌, Vol.11,No.7,pp.401-403,1998
- [3] 前田, 古金, 村上: インテリジェント車椅子 のファジィナビゲーション,バイオメディカ ル・ファジィ・システム学会誌, Vol.4, No.1, pp.11-29, 2002
- [4] 田中,王,土谷:ゴムストリング型連想記憶 アルゴリズムの情報検索への応用,第16回 ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.369-372,2000
- [5] 小島,王,土谷:聴覚系快適システムにおける音色変更アルゴリズムについて,第17回ファジィシステムシンポジウム講演論文集,pp.397-398,2001
- [6] 王, 土谷, 水本: 距離型ファジィ推論法, バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, Vol.1,No.1,pp.61-78, 1999

#### 連絡先:

王 碩玉

高知工科大学知能機械システム工学科

〒782-8502 高知県香美郡土佐山田町宮ノ口 18

Phone: 0887-57-2306 Fax: 0887-57-2320

E-mail: wang.shuoyu@kochi-tech.ac.jp

# 人間を誘導する案内ロボットの軌道計画法 part2

Trajectory planning method for guide robots that guides humans - part2 -

溝渕宣誠 ¹)王 碩玉 ¹)河田 耕一 ¹)Yoshinobu MizobuchiShuoyu WangKoichi Kawada1):高知工科大学2):松下電器産業Kochi University of TechnologyMatsushita Electrical

河田 耕一 1) 山本 正樹 2) Koichi Kawada Masaki Yamamoto 2):松下電器産業(株) Matsushita Electric Insustrial Co., Ltd

Abstract: Recently, human-friendly robots are expected to support human daily life with a background of declining population of children and aging problem. The authors are reserching the system that guided by guide robots to support humans by guiding humans in hospitals and welfare facilities, etc. Until now, the authors proposed the trajectory planning method for guide robots based on the fuzzy reasoning for the extraction of human guidance knowledge using production rules based on linguistic variables to achieve robot guidance at the same level as human guidance. This paper proposes the trajectory planning method that reason a trajectory extracting the guidance knowledge in each situations from the human guidance knowledge that more complicated to achieve the guidance lile humans, and the effectiveness of the this trajectory planning method is shown.

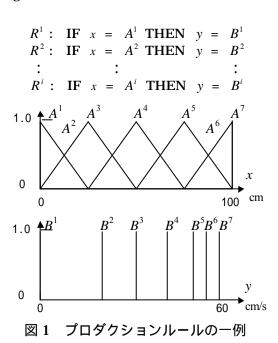
# 1. はじめに

近年, 少子化・高齢化に伴い, 日常生活をサ ポートできる人間共存型ロボットが望まれてい る.著者らは病院や福祉施設などの屋内で人間 を誘導することで支援的役割を果たす案内ロボ ットを開発することを目的として,案内ロボッ トによる案内サービスシステムの研究を行って いる[1].これまで人間と同レベルの案内役を実 現するために,案内役である人間から言語変数 を持つプロダクションルールによる案内知識を 抽出し、距離型ファジィ推論法に基づく軌道計 画法を提案した、本論文ではより人間らしい案 内を実現するために,ゴムストリング型連想記 憶アルゴリズム[2]により,より複雑な人間の案 内知識から状況毎に適切な知識を抽出し,獲得 された知識からファジィ推論を行う軌道計画法 を提案する.

# 2. 軌道計画法のアルゴリズム

本研究において,これまで提案した軌道計画では与えられたすべての知識を使用して推論を行っていた.しかし,実際の人間の行動においては,すべての知識を使用して推論は行わない.人間は目前の状況に対して,自身が持つ記憶から現在の状況を想起し,その状況に関連する知識を連想して,連想された知識を使用して推論し,行動が行われていると考えられる.そこで,本研究では与えられた状況からプロダクションルールを連想するために,ゴムストリング型連想記憶アルゴリズムを利用した.

まず,案内知識をプロダクションルールとして抽出する.一例として,誘導に関する知識を図1に示す.前件部は人との距離,後件部を軌道値とする.このようなプロダクションルールを障害物回避といった知識でも作成する.



次に,与えられた事実 A を入力空間の刺激として,前件部ファジィ集合  $A^i$  との距離を求める.前件部が三角型ファジィ集合  $A^i$  で示され,事実 A が実数値 a で与えられた場合の距離値  $d_i$  は

$$d_{i} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{j=1}^{2} \left[ \sum_{k=j}^{j+1} (a_{k}^{i} - a)^{2} + \prod_{k=j}^{j+1} |a_{k}^{i} - a| \right]^{\frac{1}{2}}$$
 (1)

となる. なお ,  $a_2^i$  は正規の三角型ファジィ集合  $A^i$  の高さの取る値 ,  $a_1^i, a_3^i$  は  $\mathbf{0}$ -レベル集合の上限と下限を示す .

ここで,距離値 $d_i$ の逆数をとり, $k_i$ とすると図 2 に示すように考えることができる. すなわち,出力空間の次元としてプロダクションルールを配置し, $k_i$ をバネ定数として,このときのつりあいが安定した点が出力となる.  $R^i$  に対す

る出力の成分 y, は

$$y_i = \frac{1}{d \cdot k_i + 1}$$
 (2)

で与えられ,この出力の成分の値が設定した閾値以上の値を持つ次元のプロダクションルールを選択する. また, $k_{ci}$  はそれぞれのプロダクションルールの想起のされやすさを示しており,ルールごとに任意の値を設定する.また,図 4では 2 次元空間で示したが,実際はプロダクションルールの数の次元を持つ空間となる.別空間についても同様にしてルールを獲得する.

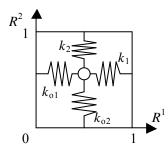


図 2 ゴムストリング型連想記憶アルゴリズム を用いたプロダクションルール検索の例

## 2.3 距離型ファジィ推論による軌道値の導出

獲得されたルールに基づいて,距離型ファジィ推論法[3]を用いて推論する.推論結果は先ほどの(1)式を用いて

$$y_{0} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[ b^{i} \prod_{j=1, j \neq i}^{n} d_{j} \right]}{\sum_{i=1}^{n} \prod_{j=1, i \neq i}^{n} d_{j}}$$
(3)

で与えられる.ただし,推論には獲得されたルールのみを使用する.

#### 3. 実験

実際の移動ロボットを用いて案内実験を行っ た.実験条件は文献[1]を参考されたい.実験は ある通路で移動ロボットを原点(0cm,0cm)から 目標(210cm, 170cm)まで移動させ, 人間をロボ ットの後方から追従させた.このときにすべて のルールで推論した場合と知識探索で獲得され たルールで推論した場合の実験結果を比較した. 図3にすべてのルールで推論した場合,図4に 獲得したルールで推論した場合の実験結果を示 す.実験結果より知識探索を行った場合では, すべての規則を使用した場合に比べ,事実によ り近い前件部のルールが推論結果により強く反 映されることがわかった.これは距離型ファジ ィ推論法では, すべてのルールで推論した場合 にはすべてのルールの影響を受けるのに対して、 状況に対して連想される知識のみを使用してい るのでより適切に推論がなされるからである.

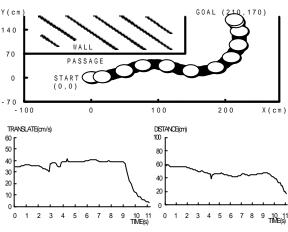


図3 実験結果(すべてのルールで推論)

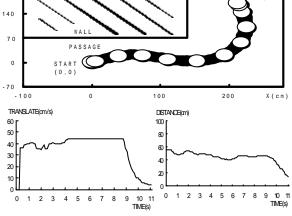


図 4 実験結果(獲得されたルールで推論)

# 4. まとめ

本論文では,より人間らしい案内を実現するために,ゴムストリング型連想記憶アルゴリズムよる知識探索を利用した距離型ファジィ推論に基づく軌道計画法を提案した.

## 参考文献

- [1] 溝渕,王,河田,山本:人間を誘導する案内 ロボットの軌道計画法,第 19 回ファジィシ ステムシンポジウム講演論文集, pp.603-606, 2003
- [2] 王,河田,土谷,連想記憶アルゴリズムの一提案,システム制御情報学会論文誌, Vol.11,No.7,pp.401-403,1998
- [3] 王, 土谷, 水本:距離型ファジィ推論法, バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, Vol.1,No.1,pp.61-78, 1999

#### 連絡先:

王 碩玉

高知工科大学知能機械システム工学科

〒782-8502 高知県香美郡土佐山田町宮ノ口 18

Phone: 0887-57-2306 Fax: 0887-57-2320

E-mail: wang.shuoyu@kochi-tech.ac.jp

# 日常動作補助用前腕部外骨格型ロボットの知的制御

Intelligent Control of a Forearm Exoskeleton Robot for Daily Motion Assist

木口量夫江崎 良Kazuo KiguchiRyo Esaki佐賀大学佐賀大学Saga UniversitySaga University

**Abstract:** We have been developing exoskeleton robots to assist the motion of physically weak persons such as elderly persons or slightly disabled persons in daily life. In this paper, we propose an intelligent control method of a forearm exoskeleton robot for daily motion assist. The robot automatically assists the forearm daily motion mainly based on the skin surface electromyogram (EMG) signals in the proposed method. Fuzzy-neuro control has been applied to realize the sophisticated real-time intelligent control. Experiment has been performed to evaluate the proposed method.

#### 1.はじめに

我々は,筋力の衰えた高齢者や軽度障害者等の 日常生活での自立やリハビリテーションを支援す るため,外骨格型ロボットによる動作補助の研究 を進めている.これまでに,人間の肘運動[1],肩 運動[2],および上肢運動[3]を補助する外骨格型 ロボット等を提案してきた、本研究では、装着者 が特別な操作を行うことなく,装着者の意思通り に外骨格型ロボットによる自動動作補助を実現さ せるため,被験者の動作意思を解釈するのに重要 な生体信号である筋電信号(EMG信号)を重要な 信号と位置づけ,外骨格型ロボットへの主な制御 入力としている. 装着者の体調等の影響を受ける EMG 信号を主な入力とし、時間遅れなくリアルタ イムで動作補助を行うことは容易ではないため、 本研究では,柔軟でかつ適応能力を有するファ ニューロ制御を用いることにより高度なリ アルタイム制御を実現させている

本稿では,飲食などの日常生活において重要な前腕動作(肘屈伸運動と前腕回内外運動の協調動作)を補助する2自由度外骨格型ロボットの知的制御法を提案する.提案手法を用いることにより同じ筋肉が異なる動作に用いられる前腕回内外運動と肘屈伸運動の協調動作が可能となる.提案手法の有効性は実験により確認した.

# 2.前腕運動補助用外骨格型ロボット

前腕運動補助用2自由度外骨格型ロボットは, Fig.1に示すように被験者の腕の外側から直接装着するようになっており,2本のリンク,ボールスクリュ・・フレーム,2つのDCモータ,手首

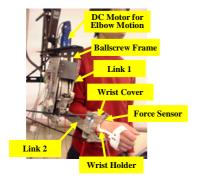


Fig. 1 The 2DOF exoskeleton robot

# 3.人の前腕運動

前腕運動は多くの筋肉が関係しているため,全部で8種類の皮膚表面 EMG 信号(円回内筋1 ch, 橈側手根屈筋1 ch,肘筋1 ch,長橈側手根伸筋1 ch,上腕二頭筋2 ch,上腕三頭筋2 chの合計8 ch)を主な入力信号として用いている.各電極の 貼り付け位置をFig.2 に示す.本研究では,下記 の式(1)で表される Root Mean Square (RMS) によ り EMG 信号を処理した値を制御器への入力とし て用いている.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \gamma_i^2}$$
 (1)

ここで, $v_i$ はiサンプリングでの生信号値,Nはセグメントでのサンプル数である.本研究では,各セグメントでのサンプル数を100とした.

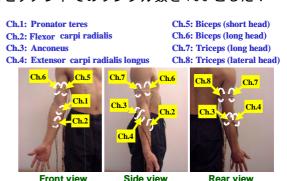


Fig. 2 Location of electrodes

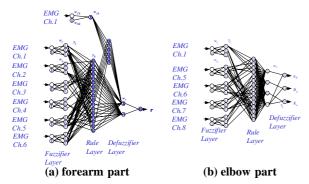


Fig.3 Fuzzy-neuro controler

#### 4.外骨格型ロボットの制御

前腕運動では,多種の筋肉が様々な運動の生成に関わっているため,EMG信号のパターンから装着者の動作をリアルタイムで判断するのは容易ではない.また,装着者の個人差に対応するための適応能力が重要であるため,本外骨格型ロボットの制御器としてファジィ・ニューロ制御器を用いている.初期ファジィ制御則の設計には,予備実験の結果や他の研究により得られている知識を用いている.

前腕部の協調動作は,円回内筋や上腕二頭筋など,前腕回内外運動と肘屈曲運動の両方に関わっているため,簡易型ファジィ制御則を用いた場合は,誤作動を起こす場合がある.そこで本稿では,前腕回外運動補助用IF-THENルールの後件部において肘屈曲時の円回内筋の影響を考慮するファジィ・ニューロ制御器(Fig.3)を提案する.装着者に対する制御器の適応時は,次式で示す適応評価関数を最小化するように誤差逆伝播法を用いた調整を行う.

$$E = \frac{1}{2}(\theta_{\scriptscriptstyle d} - \theta)^{\scriptscriptstyle 2} \tag{2}$$

,は目標角度 , は計測角度である。 ここで 本外骨格型ロボットでは,8ヶ所の皮膚表面 EMG 信号と,手首力センサーにより得られる手首 部に発生する力を制御器への入力情報とし, 肘屈 伸運動と前腕回内外運動の動作補助に必要となる トルク指令をファジィ・ニューロ制御器からの出 力としている.したがって本制御器では,各筋肉 の活動レベルが低い場合は手首部に発生する力を 重視した制御を行い、筋肉の活動レベルが高い場 合は,手首部に発生する力を無視し,EMG信号を 重視した制御を行っている.これにより,装着者 がほとんど力を入れていない場合の誤動作を無く し,装着者が力を入れた場合は,装着者の思い通 りに動作を生成することが可能となる.

#### 5.実験

提案する外骨格型ロボット制御法の有効性を評価するため,健常な被験者(22歳,男性)が前腕回内外運動と肘屈伸運動の協調動作を行う際の動作補助実験を行った.

Fig.4に,前腕回内位で肘の屈曲運動のみを行った際の動作補助を,学習無しで行った場合と学習有りで行った場合の結果をそれぞれ示す. Fig.4は前腕の回外運動と,肘の屈曲運動の両運動の主動筋である上腕二頭筋のEMG 信号を示し ている.グラフ上の角度は,前腕回内方向及び肘屈曲方向をプラス,前腕回外方向及び肘伸展方向をマイナスで示している.これらの結果から,学習無しで動作補助を行った場合は誤作動し,回外運動も生成されているが,学習する事で装着者の意思通りに動作している事が確認できる.

Fig.5に,前腕の回外運動と肘の屈曲運動を同時に行った際の動作補助を行わなかった場合と行った場合の結果をそれぞれ示す.ここでも同様に,上腕二頭筋のEMG信号を示している.ここで,外骨格型ロボットによる動作補助が有効に作用していれば,動作補助を行った場合にEMG信号が小さくなるはずである.Fig.5の結果から,同様の動作において,運動補助を行った場合はEMG信号が減少しており,筋肉の活動レベルが低くなっていることがわかる.

これらの結果より,提案する制御器が有効であることが確認できる.

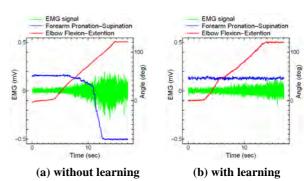


Fig.4 Experimental results (biceps - short head)

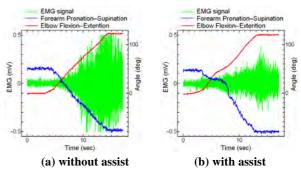


Fig.5 Experimental results (biceps - short head)

## 6.まとめ

本稿では,前腕日常動作を補助する2自由度外 骨格型ロボットの知的制御法を提案した.提案した知的制御法の有効性を実験により確認した.

## 参考文献

- [1] K.Kiguchi, S.Kariya, K.Watanabe, K.Izumi, T.Fukuda: "An Exoskeletal Robot for Human Elbow Motion Support – Sensor Fusion, Adaptation, and Control", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, vol.31, no.3, pp.353-361, 2001.
- [2] K.Kiguchi, K.Iwami, M.Yasuda, K.Watanabe, T.Fukuda: "An Exoskeletal Robot for Human Shoulder Joint Motion Assist", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.8, no.1, pp.125-135, 2003.
- [3] K.Kiguchi, T.Tanaka, K.Watanabe, T.Fukuda: "Design and Control of an Exoskeleton System for Human Upper-Limb Motion Assist", Proceedings of 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003), pp.926-931, 2003.

# オントロジーを用いたロボット感性表現

# Robot Kansei expression using Ontology

星 慎一朗

山口亨

Shinichiro Hoshi

Toru Yamaguchi

東京都立科学技術大学 大学院工学研究科 システム基礎工学専攻

Systems Engineering Science, Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan Institute of Technology

Abstract: Now a day various types of information device and system, pet robot and so on, is created and cover up human life. But still now, the system is promoted by human and is developed by human. The system can't build interaction between human. And the agent processes information all by oneself, and can't utilize relationship with human. Therefore, We focus attention on ontology technology. The agent created the ontology from observed human motion and situation, and communication with human use ontology. I show the example that a pet robot assists human and informs required information.

# 1. はじめに

現在,情報化社会と共にロボット工学もより 高度な世界へと発展を遂げている.その中で, 一般家庭で楽しむエンターテイメントロボット の実用化も現実になってきており,様々な場所 で活躍されている.しかし,そういったシステムのインタラクションは限られた入出力系テムのインタラクションは限られた入出力系しか 許容されておらず,知的共有や学習と言った面 においても,まだ実用化は難しいとされる.本 研究では,オントロジーを用いてエンターテイ メントロボットの新しい側面を見出すための研究を進め,その有効性を検証する.

# 2. オントロジーと人間の意図認識

本来オントロジーは哲学で「存在に関する体系的な理論(存在論)」という意味である.世の中のものすべてを体系的に整理して説明することを目指すのが哲学におけるオントロジーである.我々が提案するオントロジーは,エージェント間の共通の基盤となり,それぞれが自己と他者,環境との関係について情報を処理し,人間の動作の意味を「理解し」,この理解に基づいて,その時実行すべき適切な反応の形成を可能とすることを目的として構築する.

# 2.1 オントロジーの構築

使用時の注視範囲を言葉に付随する活性値で表現すると、あいまいな言葉の意味を、ほかの言葉によって形作られるファジィ集合で分散して表現することができる。この分散的知識表現を概念ファジィ集合と呼ぶ。この活性値分布はさまざまな状況に依存して変化するため、状況による意味の変化を表現することができる。以上のような特徴から、オントロジーに概念ファジィ集合を使用し、双方向連想記憶によって構築する。

# 3.2 オントロジーによる人間の意図理解

ロボットエージェントに指示を送った場合, エージェント側で道路の形状などの状況依存性 を考慮しないと,"右に曲がる"といったマクロ な指示だけではエージェントは人間の意図した 通りには動かず,人間からの細かい指示が必要 となってしまう.これでは動作指示者は効率的 にエージェントを動かすことができない.よの状況,環境によって人間の意図を自律的に判断し, 動作する必要がある.オントロジー部で人間の 動作コマンドからマクロな指示を判断,決定し それに合った動作(インスタンス)を連想する (図1)[1].

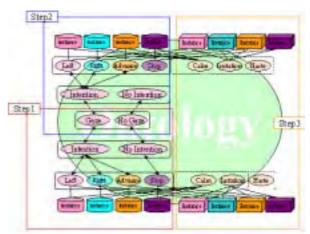


図1 オントロジー獲得の流れ

# 3. 感性の定義

感性の定義については様々な定義が考えられている.辞書上の定義では「感性」は,日本の古典文学では感情と同じ意味で使われていた.1915年初版の「大日本國語辞典」では,感性とは感受性の略だとされている[2].今日の代表的な国語辞典の「広辞苑」で感性を引くと,外界の刺激に応じて感覚・知覚を生じる感覚器官の感受性と定義されている.今日の国語辞典では,

感性を感受性としているものが多い[3].認識論的な定義では,感性は外界によって触発される受動的な心的過程で感覚的直感によって表情を得,悟性に素材を提供する基礎的な能力と考えられている.アナログ的,ファジー的,右脳的な情報処理過程が感性といえる[4].

# 4. コミュニケーション感性実験

行った実験の説明に入る. 先ほど説明したオントロジーと感性の定義に基づき, ユーザが椅子に座るとエージェントがユーザに近付き, 近付いた状態でユーザがボールを見せると, コミュニケーション開始の合図としてロボットが喜びの感性表現をするという実験である.

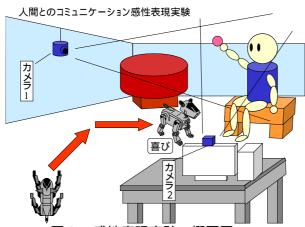


図2 感性表現実験の概要図

室内にカメラ1によって,ユーザの位置情報を把握.それによって,所定の位置に待機していたエージェントはユーザに近付き,ユーザ動作判定のためのカメラ2が有効となる.カメラ1から取れる情報の映像の様子を図3に示す.



図3 カメラ1から取得できる映像

#### 5. 感性表現を用いた警告指示実験

感性表現を用いた警告指示実験の説明に入る.この実験では実際の日常生活において,エンターテイメントロボットが危険を察知し,ユーザにわかりやすいよう感性表現を用いて,必要な情報をユーザに伝えるということをコンセプトに実験を行った.図4に実験の概要を示す.

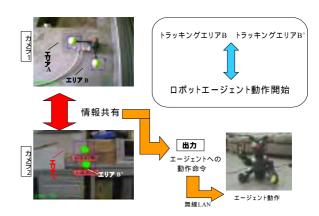


図4 感性表現を用いた警告指示実験概要図

評価実験としてメール自動配信ソフトと PC 自動表示ソフトを作成し,アンケートによる評価を行った.その結果より有効性を示すことができた.図5に結果を示す.

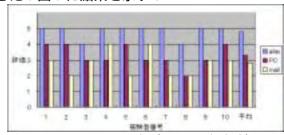


図5 アンケート調査による評価結果

# 6. おわりに

本稿で行った実験より,オントロジーと感性 表現をロボットエージェントに活用することの 有効性を検証することができた.今後,さらに よりよく使いやすいシステムの構築と明確で表 情豊かな感性表現を目指していきたい.

#### 参考文献

- [1] T.Yamaguchi, H.Murakami, D.Chen: Human Centered Support System Using Intelligent Space and Ontological Netwo-rk, Proc. Of Euro Symposium on CI (CD-ROM, 2002, 6/16-6/19)
- [2] 坂本博: 感生の哲学, 篠原昭·清水義雄·坂本博編「感性工学への招待」, 森は出版, pp.20-35(1996)
- [3] 長沢伸也: 感性工学の基礎と現状 日本ファジー学会誌 Vol.10, No4, pp.647-661
- [4] 栗山洋型編, 秋小寧一ほか:「感生||| 「感生|||| 「感生||| 「点」|| 「水小塚一 はか:「感生|| 「原生|| 「「原生|| 「原生|| 「原

### 連絡先

〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6 · 6 東京都立科学技術大学大学院 システム基礎工学専攻 山口研究室 星 慎一朗

Phone + Fax: 042-585-8641 E-mail: hoshi@fml.ec.tmit.ac.jp

# 生物型ロボットを用いたラバン理論に基づくファジィ情動推論ルールの構築

Construction of Fuzzy Emotion Inference Rule Based on Labanotation by Using Pet-type Robot

# 田辺 奈々

## 前田 陽一郎

Nana Tanabe

Yoichiro Maeda

# 福井大学

# University of Fukui

**Abstract** — In this research, we propose a method for the evaluation of emotional behaviors by using a pet-type robot without the subjectivity of a special person. In the proposed method, at first we evaluate a body motion by the robot based on Laban's Theory. Next a basic emotional degree is calculated by the fuzzy reasoning from the evaluation value of the body motion. Moreover, we evaluate the emotion value based on Russell's Circumplex Model for Emotion by using the above-mentioned basic emotional degree. In order to confirm the efficiency of the proposed method, in this research, the experiment used a pet-type robot as an object for the body motion was performed. The results of this experiment are also shown at the end of this report.

#### 1. はじめに

近年、メカトロニクス技術の発達に伴い、ロボットの開発は工場や極限作業など人間の代わりをする作業を目的としたものばかりでなく、多岐に渡って進められている。中でもエンタテイメント的要素を持ったロボットは、小型化・高性能化が進むと同時に、人間とのコミュニケーションを目的とした開発も行われ、日常的に接することを基本とした設計となっているものも増えてきている。また、このようなロボットに必要とされる感情・感性の表現については、工学的・医学的アプローチなど多方面からの研究も盛んになりつつある。

これまで哲学者や心理学者の主要な研究対象であった「こころ」や「感情・感性」は、武者らによる人間の感情を脳波の解析によって数値的に捉える試み[1]や、中田らによる表情・身体表現から感情を分類する研究[2]などの工学的アプローチによる研究に発展している。

一方、本研究室でも感情行動をロボットに実現させること を目的として、約10年前から研究を進めている[3]。本研究 では、生物型ロボットを用いて、特定の人物の主観によらな い感情行動評価の一手法を提案する。本手法ではまず、舞踏 学においてよく知られているラバン理論[5]に基づいてロボッ トの身体動作の評価を行い、そこから抽出された身体的特徴 量を用いてファジィ推論により基本的心理尺度値を求め、ラッ セルの円環モデル [6] に基づき、感情評価を行う。本手法はロ ボットの感情行動を生成する手法ではないが、これを用いる ことによりロボットの動きを観測して、客観的な感情評価を 与えることが可能となる。このロボット行動を見た感情の外 的評価手法と従来の内的な感情行動生成手法を組み合わせる ことにより、例えばロボット同士のインタラクティブな情動 コミュニケーションの実現等が可能となる。本論文で提案し た手法を用いて身体動作から感情を推定した評価実験を行っ たので、その結果についても報告する。

#### 2. ラバン理論

R.Laban[5] は身体動作の特徴を分析し、それらの記述方法として以下の3つを考案した。

- Effort-Shape Description
   動きの質や表現の意味を記述するためのもの。身体動作
  を感性的な特徴を基に分類することに有用である。
- Structural Description 身体運動を各部位ごとに楽譜のように記述することを目 的とするもの。Labanotation として知られている。
- Motif Description 身体動作の意味や概念を記述するためのもの。上位概念 の記述法であるといえる。

Laban は理論を構築するにあたって、Darwin が提唱している敵意・服従というシステムを基に、身体動作による表現には戦闘 (Fighting) と陶酔 (Indulging) の二極構造があると考え、エフォート (Effort) とシェイプ (Shape) という概念を加えて細分化を行っている。表 1 は Effort(4 種類) を、表 2 は Shape(3 種類) の分類をまとめたものである。これら 7 つの身体動作の概念は互いに独立であり、戦闘形態と陶酔形態が入り混じることもあり得る。

- 戦闘形態:能動的でメリハリがあり、活発な動きを伴う 身体動作
- 陶酔形態:優しくゆっくりとした、流れるような動きを 伴う身体動作

エフォートとは身体動作を感性的な特徴を基に分類することに対して有効であり、重さ(Weight)、時間 (Time)、空間 (Space)、流れ (Flow) の 4 要素を通じて表される [5]。シェイプとは身体動作の全体的な形状的特徴を表しており、定義の仕方としては複数あるが、本研究では定義が明確な"2 次元的シェイプ"を用いた。2 次元的シェイプとは、動作体のシルエットを仮想的に水平面 (Table Plane)・正面 (Door Plane)・側面 (Wheel Plane) に投影したときのシルエットの広がり・動きとして定義されている。正面・側面などの置き方は動作体の胴体 (骨盤) の向きを用いて決められる [2]。

表 1. Effort **の分類** 

運動要素	エフォート要素 (戦闘) (陶酔)	測定できる局面 (客観的機能)	分類できる局面 (運動感覚)
重さ (Weight)	しっかりした 優しい	抵抗	軽さ
時間 (Time)	突然の ゆっくりした	スピード	持続 (長い)
空間 (Space)	まっすぐ うねる	方向 (直線の)	持続 (しなやかな)
流れ (Flow)	束縛された 自由な	流れの制御 (停止)	流暢さ (流体)

表 2. Shape の分類

Plane of Form	Fighiting Form(戦闘)	Indulging Form(陶酔)
Table Plane	Enclosing	Spreading
Door Plane	Ascending	Descending
Wheel Plane	Retreating	Advancing

- Table Plane Shape:水平面上のシルエットの広がり 特に手を持つ動作体では手先と視線の注目先との近接度 合いが重要である
- Door Plane Shape:正面上のシルエットの広がり シルエットの領域(重心で代表してもよい)が上方へ偏 るまたはその逆
- Wheel Plane Shape:側面上のシルエットの前後の変動シルエットの領域が後退するまたは前進する

# 3. ラッセルの円環モデル

1980 年、Russell[6] は、全ての感情は「快-不快」「覚醒・眠気」の 2 次元で表される平面上に、円環状に並んでいるとする円環モデルを提唱した。さらに Russell は各感情は円環モデルにおける座標軸上のベクトルの方向と大きさとして表されるとし、各感情間のベクトルの方向の差は相関係数を表しているとした。また、Witvlite と Vrana[6] らはこのラッセルの円環モデルに代表されるような「快-不快」、「覚醒-睡眠」といった誘発性(valence)の次元と覚醒(arousal)の次元の軸を 45 °回転させ、ネガティブな感情とポジティブな感情の枠組みを持つ感情空間で表すことができると主張している。

# 4. ラバン理論に基づく情動評価手法

本研究では身体表現に関しての要素を分析することが目的である。また、ここでいう動作体とは実験において身体動作を行う対象のことで、本研究における実験では生物型ロボットを用いた。

まず、CCD カメラ等で動作体が行う身体動作の計測を行う。この際、画像より抽出する要素はラバン理論の概念を基に客観的に評価されたものであり、評定者などある特定の人物の主観による評価が入らないようにする。ラバン理論を用いた理由は、ダンス等の舞踏理論から考案された身体動作解析手法であるため、生物型のロボットの全体的な行動をマクロに捉えて評価するのに適していると考えたためである。そして Effort-Shape によるラバン動作解析により得られる値を"身体的特徴量"とする。

次にこの身体的特徴量をファジィルールによって一般化し、「快-不快」、「覚醒-眠気」の2つの異なる尺度を持つ値として算出する。これまでの研究では身体的特徴から感情との関連性を求める際、複数の被験者に評価をさせ、その総合的な値を用いて有意性を求めていた。しかしながら本研究ではオペレータの主観による評価により、ファジィルールを用いてこの心理尺度を求める手法を提案する。ルールを作成する際には当然主観が入るが、複数の被験者にアンケートを実施するなどの方法を用いて一般化することも考えられる。このファジィ推論により得られる値をここでは"基本心理尺度値"と呼ぶこととする。最後にこの2軸の基本心理尺度値をラッセルの円環モデルに当てはめることにより、代表的な基本感情である喜・怒・哀・楽に基づく感情値を求める。本手法の概略処理手順を図1に示す。



図1. 本手法の処理手順

多関節ロボット等の複雑な動作を、身体的特徴量として抽出することは一般に容易ではない。さらに、さまざまな感情や情動といった概念を表現すると、非常に複雑になると考えられる。そこで本手法では入力としてのロボットの動作解析と、出力としての感情の表現において、それぞれラバン理論とラッセルの円環モデルを用いることにより複雑さの次元を落とし、動作体の感情推論を行うためのファジィルールの作成が容易となるように工夫した。本手法の場合、3入力2出力のファジィルールを記述すれば、動作から感情へのマッピングが可能となる。

#### 4.1 ラバン理論に基づく身体的特徴量の抽出

ラバン理論を用いるにあたって、動きの質や表現の意味を表している Effort-Shape Description の概念を基に画像の動作解析を行った。尚、今回は、動作体の頭、両手(両前足)の3点の重心位置を各頂点とした三角形を基にした。以下の表

3 に身体的特徴量として今回計測することを前提とした値を まとめた。

表 3. 身体的特徴量の値

Time Effort	重心位置の移動速度:Lv (三角形の重心の単位時間当たりの移動量)	
Table-Plane Shape	領域面積:Ls (三角形の領域面積)	
Door-Plane Shape	重心高さ:Lp (三角形の重心の高さ)	

Time Effort は、ロボットの動作スピードを測定し、評価には単位時間当たりの身体動作の移動距離をもって評価値とした。さらに Table-Plane Shape とは x - y 平面を指し、Door-Plane Shape とは縦軸を z 軸とした場合の x - z 平面を示すものとする。今回の実験では動作体の前方からの身体動作の物理的特徴量の測定を規定しているため、これら 2 つのシェイプを組み合わせ、身体動作における動きの領域面積と重心の高さを物理的特徴量として用いた。以上 3 点を身体的特徴量とし、ファジィルールに入力する際の入力値とした。

次にファジィルールによってラッセルの円環モデルにおける「快-不快」、「覚醒-眠気」の2つの異なる尺度値(基本心理尺度値)として算出する。最後にこの2軸の基本心理尺度値をラッセルの円環モデルに当てはめることにより、代表的な基本感情である喜・怒・哀・楽に基づく感情値を出力する。

#### 4.2 ファジィ情動推論ルール

ここでは、前述の Effort-Shape Description の 3 つの身体 的特徴量を用いて基本心理尺度値の決定を行う。図 2 は今回使用したファジィ情動推論ルールである。これらのメンバーシップ関数における横軸の数値については後述の実験方法のところで示す。各メンバーシップ関数は (a) 重心位置の移動速度: Lv、(b) 領域面積: Ls、(c) 重心高さ: Lp をそれぞれ表している。後件部シングルトンは、ラッセルの円環モデルで使用する 2 次元の軸に基づく基本心理尺度値 Rx, Ry を示している。ここで基本心理尺度値 Rx は、ラッセルの円環モデルにおける「快-不快」を表す x 軸の数値を、Ry は「覚醒・眠気」を表す y 軸の数値を表している。ファジィルールマップは (f) のルール 1 が Ls, Lp から Rx を決定するルールを、(g) のルール 2 が Ls, Lv から Ry を決定するルールをそれぞれ表している。

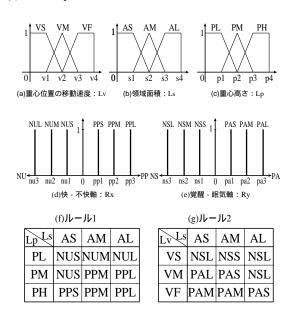


図 2. ファジィ情動推論ルール

#### 4.3 基本心理尺度による感情評価

ここでは、Witvliet と Vrana らにより提唱された説を基に、ラッセルの円環モデル [6] の 2 次元上の各象限ごとに、「喜怒哀楽」の基本感情を当てはめたものを感情評価の出力対象とした。ファジィ推論によって得られた基本心理尺度値 [「快-不快」、「覚醒-眠気」の出力値を <math>(a,b) とする ] をラッセルの円環モデル (図3 参照) に当てはめ、式 (1) により感情の強さを求め、それを感情値として出力する。

$$E_i = \sqrt{a^2 + b^2} \mid \sin(\pi - 2\theta) \mid \tag{1}$$

$$\theta = \arctan \frac{b}{a} \tag{2}$$

 $\begin{array}{lll} 0 & \theta < \frac{1}{2}\pi \ : & i = J(joy) \\ \frac{1}{2}\pi & \theta < \pi \ : & i = A(anger) \\ \pi & \theta < \frac{3}{2}\pi \ : & i = S(sadness) \\ \frac{3}{2}\pi & \theta & 2\pi \ : & i = R(reluxzation) \end{array}$ 

Rx:「快-不快」軸の値  $(-1 \le Rx \le 1)$ Ry:「覚醒-眠気」軸の値  $(-1 \le Ry \le 1)$ 

:点(Rx,Ry)と原点を結んだ直線と快方向との成す角度

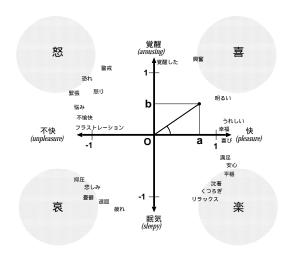


図 3. ラッセルの円環モデルによる感情値の算出

# 5. 感情評価実験

本研究では、本手法の有効性を検証するため、実際に実機 ロボットを用いて感情値を求める実験を行った。本章では実験 手順およびその詳細、さらに実験結果と考察について述べる。

#### 5.1 実験方法

本実験ではファジィ推論を行う際の入力値として、生物型ロボット (AIBO ERS-210A) の一連の動作を外部 CCD カメラから画像処理によって得た値を用いた。動作体である AIBO の頭および左と右の前足の 3 点にそれぞれ黄・オレンジ・青の 3 色のカラーマーカーを取り付け、色抽出作業を行うことによって各色の重心座標を求めた。さらに求めた 3 点の重心座標を三角形の頂点と見なし、得られた三角形の重心の移動速度 (Velocity)・領域面積 (Area)・重心高さ (Position) の 3 つを求め、それを身体的特徴量の入力値とした。また、ファジィ推論によって得られた基本心理尺度値をラッセルの円環モデルに当てはめることにより感情値を得た。図 4 は CCD カメラによって得られた画像、図 5 はカラーマーカーを色抽出することによって得られた画像である。



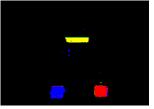
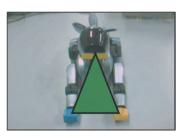


図 4. 動作体

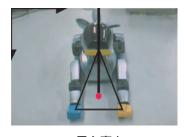
図 5. 色抽出画像



(a) 重心位置の移動速度



(b) 領域面積



(c) 重心高さ

図 6. 実験で計測した身体的特徴量

実験では、AIBO に解析のための動作例として、さまざまな種類のダンスをさせた。まず動作体がダンスを開始すると同時に  ${
m CCD}$  カメラによって画像を取り込み、 ${
m Linux}$  内のプログラムにて画像処理を行い、 ${
m 3}$  色の色抽出を行う。この抽出された各色の重心座標を求め、それを三角形の頂点とみなし、初回に計測した値を基準値とする。その後、一定時間毎にマーカーの座標をサンプリングし、身体的特徴量である三角形の重心位置の移動速度: ${
m Lv}$ 、領域面積: ${
m Ls}$ 、重心高さ: ${
m Lp}$  を求める (図  ${
m 6}$  参照)。

この過程によって求められた3つの身体的特徴量を入力として、ファジィ推論を行うことにより2つの基本心理尺度値Rx,Ryを求める。本実験で用いたファジィ推論の前件部メンバーシップ関数と後件部シングルトンのパラメータを表4に示す。この基本心理尺度値は、そのままラッセルの円環モデルにおける感情値を求める式(1)に代入できる値となっており、ここで4つの基本感情に対する感情値を求めることができる。

#### 5.2 実験結果および考察

今回の実験では、毎秒30フレームで画像の取得を行った。 紙面の都合上、4つの基本感情のうち怒(Anger)・哀(Sadness)

#### 表 4. 実験で用いたパラメータ

#### (a) 前件部メンバーシップ関数

重心位置の移動速度:Lv	領域面積:Ls	重心高さ:Lp
v1 = 5.0	s1 = 1000.0	p1 = 80.0
v2 = 10.0	s2 = 2000.0	p2 = 120.0
v3 = 15.0	s3 = 3000.0	p3 = 170.0
v4 = 100.0	s4 = 5000.0	p4 = 300.0

#### (b) 後件部シングルトン

「快-不快」軸:Rx	「覚醒-眠気」軸:Ry	
pp1 = 100  nu1 = -100	pa1 = 100  ns1 = -100	
pp2 = 200  nu2 = -200	pa2 = 200  ns2 = -200	
pp3 = 300  nu3 = -300	pa3 = 300  ns3 = -300	

の場合のみ図 7 に実験結果を示す。それぞれ図の右に記載した数値は、本実験で得られた身体的特徴量 Lv、Ls、Lp および基本心理尺度値 Rx, Ry と感情値 Ei を示している。

また、実験を行った結果推定された感情値は、数人の被験者に動作体のダンスを見せて得た結果とそれほど大きな開きはみられなかった。しかし、今回用いた動作体が AIBO であったために、犬型という形状によって被験者の印象には多少システムの意図したものとは違った回答が得らることもあった。また、色抽出の際に誤差が入るために、身体動作の計測結果が変動的になることも多々あった。

本実験では身体動作を CCD カメラによって取得する際、色抽出時においてノイズが頻繁に混入してしまったため、安定したデータを得ることができなかった。これは動作体である AIBO の姿勢が変化することにより、照明の反射などでカラーマーカー以外のロボット本体の部分をときどき検出したり、色抽出プログラムが不完全であったために、カラーマーカーの色が角度によって部分的に正しく認識できなかったために起こったものと思われる。今後はこのような不安定な要素を除くために、色抽出時にラベリングなどの処理を行うことによる改善案などが考えられる。

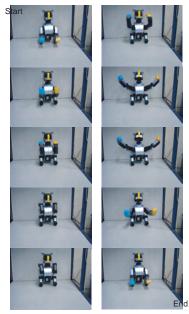
# 6. 結言

本研究では、ラバン理論の概念を用いた身体動作の分析結果より得られた身体的特徴量を入力値とし、ファジィ情動推論を用いて得られた出力値である基本心理尺度値より、ラッセルの円環モデルを用いて身体動作を喜・怒・哀・楽に基づく分類と、その感情値を求める手法を提案した。さらに本提案手法の有効性を確かめるため、生物型ロボットの一連の複雑な動作(ダンス)をCCDカメラによって取り込み、感情値を求める実験を行った。その結果、複数のダンスにより得られたさまざまな身体的特徴量から基本心理尺度値を求め、ある程度適切な感情値を得ることができた。

今後の課題としては、身体的特徴量より得られるファジィ 入力値の種類を増やすことや、ラッセルの円環モデルにおけ る喜怒哀楽以外の感情についても評価する手法を検討するこ となどがあげられる。

#### 参考文献

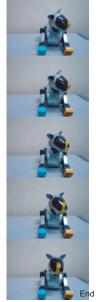
- [1] 武者 利光: "「こころ」を測る," 日経サイエンス, Vol.26, No.4, pp.20-29 (1996)
- [2] 中田 亨,森 武俊,佐藤 知正: "ロボットの身体動作表現 と生成される印象とのラバン特徴量を介した定量的相関 分析," 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.2, pp.252-259 (2001)
- [3] Y.Maeda: "Emotional Generation Model for Autonomous Mobile Robot," *KANSEI Engineering International*, Vol.1, No.1, pp.59-66 (1999)



Anger

Lv: 1.9 Ls: 1893.5 Lp: 149.0 Rx: -168.0 Ry: 236.1 Ei: 273.8





Sadness

Lv: 7.7 Ls: 1879.0 Lp: 124.7 Rx: -277.4 Ry: -198.7 Ei: 299.3

図 7. 実験結果

- [4] 前田 陽一郎:"ファジィルールを用いた基本心理ベクトルに基づく自律移動ロボットの感情生成実験,"日本ファジィ学会誌, Vol.12, No.6, pp.816-825 (2000)
- [5] R.Laban, 神沢 和夫 (訳): "身体運動の習得," 白水社, (1985)
- [6] 濱 治世, 鈴木 直人, 濱 保久: "感情心理学への招待 感情・情緒へのアプローチ ," 新心理学ライブラリ 17, pp.47-50 (2001)

# 連絡先:

〒 910-8507 福井市文京 3-9-1 福井大学 工学部 知能システム工学科 前田 陽一郎

Phone & Fax: 0776-27-8050 (直通) E-mail: maeda@ir.his.fukui-u.ac.jp

# 大規模カオスを用いたインタラクティブサウンド 生成システム

Interactive Sound Generating System by Using Network of Chaotic Elements

山本 昌幸

前田 陽一郎

Masayuki Yamamoto

Yoichiro Maeda

## 福井大学

University of Fukui

Abstract — Chaotic sound is researched in the field of artificial life as one of the interactive art generation system. It is able to realize artificial sounds used a computer with the diversity and complexity exceeding the estimation of a human operator. The purpose of the research for the chaotic sound is to find the effective method to create complicated and variable sounds by using A-life methodorogies. In this research, we propose the method of creating sounds by using network of chaotic elements controlled both a chaotic behavior and a whole synchronism. In this system, the musical interval is decided by Global Coupled Map (GCM) and the time interval by Coupled Map Lattice (CML). We constructed the Interactive Chaotic Amusement System (ICAS) by applying this method. We also report the computer simulation to confirm the efficiency of this method.

#### 1. はじめに

近年、人工生命研究において盛んに行われているインタラクティブアートは、多様性と作者である人間の予想を越える複雑さをもつグラフィックスやサウンドを実現することが目的である。ペットロボットに代表されるように工学が人間の暮らしにおける快適性や利便性だけでなく、娯楽性を追及するための手段としても利用されるようになってきた昨今において今後の発展が期待される。その代表的なものとしては、フラクタル幾何学理論を用いて描くフラクタル図形や、マンデルブロ集合を用いて生成するマンデルブロ音楽、また生物の行動を音に変換して音楽的に面白い音を作り出すシステムなど、様々なものが挙げられる[1][2]。

筆者らは現在、カオスを利用して生成したサウンド とグラフィックスを組み合わせることによって、様々な 視覚的・聴覚的効果を人間に与えることができる ICAS (Interactive Chaotic Amusement System )と呼ばれる インタラクティブ感性システムを開発するための研究 を進めている[3]。本研究ではその基本システムとして、 複数のカオス要素を結合することで個々の要素のカオ ス性と全体の同期性の制御が可能な大規模カオスをサ ウンドの生成に用いる。これによって生成されるサウ ンドのそれぞれの旋律や時間的変化をカオス的にした り、同期性をもたせたりすることを可能にし、聴覚的 に複雑かつ多様性をもつ音の生成を行なう。同時にそ れをグラフィックスに変換して視覚的にも音の変化を より効果的にするシステムを構築する。また作成した ICAS シミュレータを用いて、実際にカオティックサウ ンド生成実験を行ったのでこれについても報告する。

# 2. 大規模カオスについて

大規模カオスは金子 [4][5] によって提唱されたもので、これは差分方程式のようにカオス的な振る舞いを示す要素 (カオス要素) をネットワークのように多数結合させたものであり、大規模結合写像とも呼ばれる。これを用いることによって、その写像全体の挙動をより

複雑かつ多種多様にすることが可能である。

大規模カオスには、カオス要素の結合構造によりいくつかの類型が存在し、それぞれ結合写像格子 (CML)、大域結合写像 (GCM) と呼ばれる。

#### 2·1 大域結合写像 (GCM)

大域結合写像 (Globaly Coupled Map: GCM) は、カオス要素を多数並べ、各要素をそれぞれ大域的に相互作用を行わせることによって状態を遷移させていくモデルである。以下に GCM の式を示す。

$$x_i(t+1) = [1-e]f(x_i(t)) + \frac{e}{N} \sum_{j=1}^{N} f(x_j(t))$$
 (1)

図2にGCMの取り得る状態を表した相図を示す。

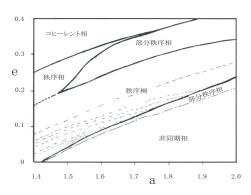


図 1 GCM の相図 (文献 [6] より引用)

# 2·2 結合写像格子 (CML)

結合写像格子 (Coupled Map Lattice: CML) は、カオス要素を多数並べ、自己と隣接する要素と相互作用を行わせることによって状態を遷移させていくモデルである。GCM とは個々のカオス要素の影響が局所的であるという点で異なる。CML の式を以下に示す。

$$y_j(t+1) = [1 - e]f(y_j(t)) + \frac{e}{2}[f(y_{j-1}(t)) + f(y_{j+1}(t))]$$
 (2)

ここで  $y_j(t)$  は離散時間 t における要素 j の状態であり、パラメータ e は隣接した要素との結合の強さを表す。 f(y) はカオス的挙動を示す非線形関数である。 図 2 に CML の取り得る状態を表した相図を示す。

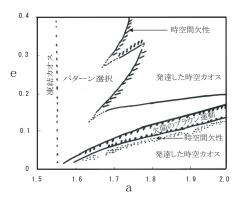


図 2 CML の相図 (文献 [4] より引用)

## 3. ICASの提案

本研究では、音を発現するカオスエレメントを大規模カオスによって複数結合し、大規模カオスのパラメータを調整することによって全体として様々な音を発現させ、それを制御可能にするとともに、視覚的効果により音の変化を表現するインタラクティブ感性システム (ICAS) を提案する。

#### 3·1 GCM による音高制御

「音の変化」を決定する重要な要素の一つとして、発現される音高の時系列における前後の関係、または同時に発生する他旋律との調和などが考えられる。そこで本研究では、まず始めに個々のカオス要素が大域的に影響を及ぼし合う GCM を用い、同時に出力される音をn 個のカオス要素を結合させることによって、システムから発現されるn 個の旋律の音高遷移を制御することを考える。この場合、同時発音数はn 音でそれぞれがカオス的挙動により旋律を生成する要素となるが、GCM で結合することによって各音どうしは全体として同期的または非同期的な挙動を示し、協調的に旋律が生成される。

まず、各エレメントにカオス要素として以下のよう なロジスティック写像を与える。

$$f_i(x_i(t)) = 1 - ax_i^2(t)$$
 (3)

ここで  $f_i(x_i(t)), a, x_i(t)[i=1,2,3,\cdots n]$  はそれぞれ時刻 t における i 番目のエレメントが持つロジスティック写像の出力、個々のカオス的振る舞いの強弱を表すパラメータ、大域結合により計算されたそのエレメント

の過去の出力値である。また n はエレメントの総数である。本研究では n=4 とした。

次に、各エレメントに与えたロジスティック写像を式 (1) の GCM で大域的に結合させる。ここでパラメータ e は全体との結合力を示す。式 (2) から得られた出力値  $x_i(t+1)$  によって、各エレメントの発現する音の高さにゆらぎを与える。この 2 式のパラメータ a と e を調整することによって、個々のカオス性または全体の同期性を任意に制御することができる。

図 4.1 に本研究のシミュレーションで行なった n=4 の場合の音高制御のイメージを示す。

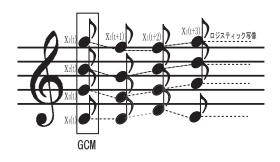


図 3 GCM による音高制御

各カオスエレメントは大域結合の計算によって値を 出力し、エレメントはその出力値が属する範囲に割り 当てられた音を発現する。以上の処理を繰り返すこと によって、各エレメントから連続的に音が発現される。

#### 3·2 CML による音長制御

音楽性を高めるのもう一つの重要な要素として、発 現されるそれぞれの音の長さの時系列における前後の 関係が考えられる。全体的にオーケストラのようにグ ローバルな統制を取る必要のある音高要素と異なり、音 長要素の場合、時系列において近隣する音同士のみを 同期させるほうが効果的と考え、今回は、隣接する要 素が相互作用を及ぼし合う CML を用いた。ここでは m 個のロジスティック写像を時系列方向に並べ、m 個 ごとの音長データがロジスティック写像により決定さ れる。隣接する要素が相互作用を及ぼし合う CML を 用い、隣同士のカオス要素を結合させることによって、 システムから発現される n 個の旋律の音長遷移を制御 することを考える。それぞれの要素はカオス的挙動に より音長推移を生成する要素となるが、隣接する要素 どうしはお互いに同期的あるいは非同期的な挙動を示 し、協調的に音の長さが決定される。

まず、各エレメントにカオス要素として以下のよう

なロジスティック写像を与える。

$$f_j(y_j(t)) = 1 - ay_j^2(t)$$
 (4)

ここでロジスティック写像の数は m で本研究では m=16 とした。1 小節 m 音単位と考えると一回に計算されて出力された値は旋律の1 音目から m 音目までに対応しており、j 番目のロジスティック写像  $f_j(y_j(t))$  の次の  $f_j(y_j(t+1))$  の結果は j+m 音目の音の長さに対応している。

次に、各エレメントに与えたロジスティック写像を式 (1) の CML で局所的に結合させる。式 (2) から得られた出力値  $y_j(t+1)$  によって、各エレメントの発現する音の長さにゆらぎを与える。この 2 式のパラメータ a と e を調整することによって、個々のカオス性または全体の同期性を任意に制御することができる。

図 4 に本研究のシミュレーションで行った m=16 の場合の音長制御のイメージを示す。



図 4 CML を用いた音長制御

音長の割り当て方法は、式 (2) における出力値  $y_j(t+1)$  が取り得る範囲をロジスティック写像の初期値設定により -1  $y_j(t+1)$  1に設定し、この範囲をさらに 0.1 間隔で 20 の範囲に等分する。次に等分した 20 の範囲のそれぞれに、0.08 秒から 0.08 秒間隔で 1.28 秒までの時間を順に割り当てる。

各 CML は大域結合の計算によって値を出力し、エレメントはその出力値が属する範囲に割り当てられた音の長さで発現する。例えばエレメントの出力値が-1  $y_i(t+1)$  -0.9 ならば 20 音の中で一番長い音の長さ 1.28 秒間、0.9  $y_i(t+1)$  1 ならば 20 音の中で一番短い音の長さ 0.08 秒間発現する。以上の処理を繰り返すことによって、各エレメントから連続的に音の長さが決定される。

## 4. シミュレーション

今回提案した手法の有効性を検証するために、Macromedia 社が開発したグラフィックソフトである Flash を用いて ICAS の基本システムとなるカオティックサウンドシステムを作成し、パラメータ a、e の値を変えてシミュレーションを行なった。また、カオスエレメントが発現する音は、シーケンサーソフト"おたま 98"を用いて各々単音のウェーブファイル (.wav) を作成し、連続発音が可能なように波形編集を施してから Flash 上に取り込んで使用した。また本システムはカオスエレメントの出力値をすべてファイル出力することが可能であり、本シミュレーションではその出力値をグラフ

上にプロットしてカオスエレメントが発現する旋律要素の変化を調べた。以下、その結果について報告する。

#### 4·1 ICAS シミュレータ

図 5 に ICAS のシステム外観を示す。シミュレータの右下の三角 (play) ボタンを押すとシステムが始動して音が鳴り始める。E1~E16 は 16 個単位の旋律要素を表しており、その上の色の異なる 4 つのバーが各カオスエレメントが発現する音の高さに比例して逐次上下する。バーの高さは 4 つのカオスエレメントが発する音の数と等しく 20 段階に分かれており、縦方向に並ぶ 4 つのバーは同時に発現する音の高さに対応している。これによって、各カオスエレメントが発現した音の変化を視覚的に把握することができる。

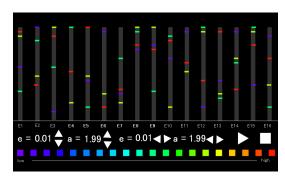


図 5 ICAS シミュレータの外観

# 4.2 シミュレーション結果

図  $6\sim 9$  はシミュレーション結果の一例を示しており、各図において縦軸は各カオスエレメントが発現する 4 つの音の高さを、横軸はシミュレーションの経過時間を表している。シミュレーションの結果、音高制御に GCM、音長制御に CML を使うことによってそれぞれのパラメータ a、e を変化させることでシステムの音高推移及び音長推移が同期的な挙動や非同期的な挙動、同期状態と非同期状態が混在するような挙動など、様々な挙動を示すことがわかった。

#### 4.3 考察

図 6 より、e の値が 0 あるいはほとんど 0 に等しく a の値が 2.0 あるいはほとんど 2.0 に等しい場合、各カオスエレメントの音の変化はばらばらになり、16 個の旋律要素の音の高さの変化と時間間隔にはなんら共通はないことがわかる。また、4 つの旋律を比べてみまり要素が支配的で同期が全くとられていないためである。しかし、ここで a、e の値を徐々に高めていくと、図 7、図 8 のように、いくつかのカオスエレメントが発現する音の高さが揃って上下するようになり、旋律も互いに比例して上下するようになる。そしていずれ図 8 のように各カオスエレメントの値は収束するカオスエレメントの数が増えていく、つまり各エレメントの数が増えていく、つまり各エレメントの数が増えていく、つまり各エレメントの数が増えていく、つまり各エレメントの数が増えていく、つまり各エレメントの数が増えていく、つまり名エレメントの数が増えていく、つまり名と考え

#### ることができる。

以上からパラメータ e を調整することによって、様々な音の発現が可能であることがわかった。音楽という観点でみると、図 7 のような同期挙動と非同期挙動が混在するあたりは比較的旋律に近く感じられ、人間にとって心地よく感じる領域が存在することが確認された。今後は、このような音楽的な要因と大規模カオスの同期性との関連についても明らかにしていきたい。

#### 5. おわりに

本研究では、大規模カオスである GCM、CML を用いたカオティックサウンドの生成手法を提案した。さらにインタラクティブ感性システム ICAS シミュレータを構築し、実際に著者がオペレータとなってさまざまな様相をもつ音を作成した。カオス的な音を発現するエレメントを大規模カオスによって大域的に結合し、GCM、CML のパラメータを調整することによって全体として複雑かつ多様性を持った音を発現させることができた。

今後の課題としては、人間にとって心地よい音として、より複雑かつ音楽的な音を発現させるためのシステム改良が必要であると考える。例えば、今回は各エレメントにカオス要素としてロジスティック写像を与えたが、より複雑な挙動を示すカオス要素への変更や、効果的な視覚効果の開発なども必要である。さらに音程、音長だけでなく音の時間間隔(テンポ、リズム)、音の種類(音色、楽器)、音の合成(和音)などの要素も大規模カオスで制御し、将来的にはオーケストラサウンドの自動生成などの大規模なサウンド生成支援システムの構築を目指していく予定である。

#### 参考文献

- [1] 平野 砂峰旅, "大域結合カオスのコンピューター ミュージックへの応用", 音楽情報科学研究会, MUS-14-7 (1996)
- [2] 長嶋 洋一, "マルチメディア作品におけるカオス 理論の応用", 京都芸術短期大学紀要 [瓜生], Vol.18, pp.30-40 (1995)
- [3] 山本 昌幸, "インタラクティブカオティックサウンド生成ツールの開発", 日本知能情報ファジィ学会 第8回曖昧な気持ちに挑むワークショップ, CD-ROM (2003)
- [4] 金子 邦彦, 複雑系のカオス的シナリオ, 朝倉書店 (2001)
- [5] 金子 邦彦, "カオス,CML, 複雑系, 科学", Vol.62, No.7, pp.427-435 (1992)
- [6] 合原 和幸, カオス-カオス理論の基礎と応用-. サイ エンス社 (1990)
- [7] 下條 隆嗣, カオス力学入門, 近代科学社 (1992)

#### <連絡先>

〒 910-8507 福井市文京 3-9-1 福井大学 工学部 知能システム工学科

前田 陽一郎

Tel & Fax: 0776-27-8050

E-mail: maeda@ir.his.fukui-u.ac.jp

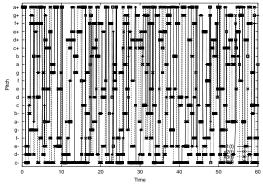


図 6. シミュレーション結果 (1) GCM:(a,e)=(2.0,0)/CML:(a,e)=(2.0,0)

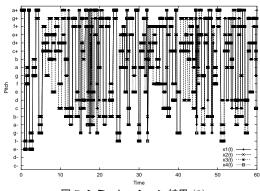


図 7. シミュレーション結果 (2) GCM:(a,e)=(1.8,0.3)/CML:(a,e)=(1.85,0.1)

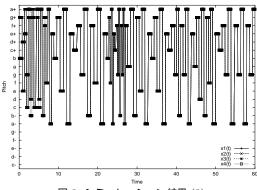


図 8. シミュレーション結果 (3) GCM:(a,e)=(1.5,0.4)/CML:(a,e)=(1.5,0.4)

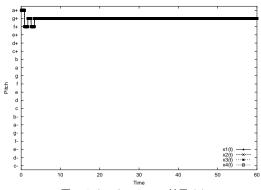


図 9. シミュレーション結果 (4) GCM:(a,e)=(0.3,0.5)/CML:(a,e)=(0.3,0.5)

# 砂時計型ニューラルネットを用いた ロボットの感情を伴う動作の学習及び自律生成

Motion Training and Automatic Generation with Emotional Behavior using Sandglass Neural Networks

今井 康人\* 矢野 良和\*\*

道木 慎二\*

大熊 繁\*

Yasuhito Imai Yos

Yoshikazu Yano Shinji Doki

Shigeru Okuma

\*名古屋大学大学院工学研究科

\*\*名古屋大学大学院経済学研究科

Graduate School of Engineering, Nagoya University

Graduate School of Economics, Nagoya University

Abstract: The research focuses on a technique to learn the basic motions and an emergence of new motions with emotions for entertainment robots. The proposed system consists of hierarchical SNNs(Sandglass-type Neural Networks) and EFAN(Emotional Factors Attached Network) which transforms learned basic motions into emotional motions. Each SNN extracts position features from joint angles of robots and motion features from time-series position features. The trained SNNs can reconstruct learned motions corresponding to the motion feature. Emotions are assumed to be expressed by some emotional factors such as speed, boldness, facial expression and so on. As learning EFAN using the parameters of emotional factors and motion features, EFAN generates emotional additions applied to basic motions. The proposed system generates basic motions and emotional motions with feature parameters. Additionally, we analyze the relationship between emotional factors and emotion which users sense practically.

keyword: Sandglass Neural Network, Emotional factors, Motion generation, Motion training, Entertainment robot

# 1 はじめに

近年、ヒューマノイドロボットやペットロボットなどの人間共存型ロボットが注目を浴びている。ロボットが人間とうまく共存していくためには、ロボットが人間の感情を認識及び自分の感情を表現し、人間と円滑なコミュニケーションをとる能力を持つことなどが重要である。既存の人間共存型ロボットは多彩な動作が可能で、感情に応じた動作を出力する。それらは、あらかじめ設計者が用意した感情表現動作パターンの中から状況に合わせて選択することで感情表現を行っている。様々な感情表現を行うには、必要な動作パターン全てを設計する必要がある。これに対して次世代ロボットには、用意された動作パターンから選択するだけではなく、自分の意志や感情に応じて基本動作を基に自ら感情表現動作を生成することが望まれる。

ロボットの動作生成という点に関して、多谷 [1] らがヒューマノイドロボットの動作生成において多変量な操作量から低次元の操作量を獲得する研究を行った。ヒューマノイドロボットの各関節角を基底とする関節角空間で砂時計型ニューラルネットを用いた非線形主成分分析を行うことで、ロボットの各関節への制御入力を同時に指示できる低次元特徴量を得た。そしてヒューマノイドロボットの動作をこの特徴量空間で描く軌跡ととらえ、動作の再現を行った。しかし、軌跡の時系列情報に関しては具体的に考察されていない。また既存動作のパターンの獲得にとどまっており、特徴量の特性を活かした新規動作の生成についても議論されていない。

本研究では、ロボットの各関節への制御入力に対する特徴量だけでなく、動作の時系列情報に対しても低次元特徴量を獲得する。そして特徴量を意図的に操作することで多彩な動作生成を実現するシステムを提案する。また感情表現についても、感情表現要素付加ネットワーク EFAN(Emotional Factors Attached Network)という新しいネットワークを導入し、自律的に感情表現を生成する枠組みの構築を目指す。

また、提案システムで生成された感情表現に対して質問紙法を 用い、得られた結果に統計的解析手法を適用することで、感情表 現要素と実際に人間が感じる感情との関連性についても調べる。

# 2 提案システム

# 2.1 砂時計型ニューラルネット

図 1 に示す砂時計型ニューラルネット (Sandglass-type Neural Network, 以後 SNN) は、入出力層のユニット数 N が等しく、かつ真中の層 (図 1 では第 3 層) のユニット数 M が入出力層ユニットよりも少なくなっている階層型ニューラルネットである。

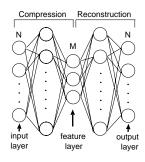


図 1: 砂時計型ニューラルネット

SNN は与えられたデータ集合に対して恒等写像関数を近似するように、誤差逆伝搬法により学習する。つまり、学習の際に与える教師データは入力データと同じものを用いる。N 次元入力データはそれよりも少ない次元 M(N>M) を持つ特徴層 (第 3 層) において縮約され、出力層で再び N 次元データに復元される。つまり SNN は反復計算に基づく誤差の評価のみで、多次元入力データ空間から低次元特徴空間への縮約関数と、低次元特徴空間から多次元入力データ空間への復元関数を同時に獲得できる。学習後の SNN は前半部、後半部をそれぞれ独立に利用可能であり、特徴抽出と復元を用途に応じて使い分けることができる。

また、SNN の特徴層ユニット数が 1 の状態から学習を開始し、徐々にユニット数を増やしていく場合は非線形主成分分析 (Non-Linear Principal Component Analysis, 以後 NLPCA) を実現することが示されている。SNN は不良設定問題 (低次元の操作量から一意に多次元操作量へ変換できない問題) を意識せずに一意に解を出力できる点においても利用価値がある。

## 2.2 提案システムの構成

提案システムは図 2 のように 2 つの SNN と新たに導入した感情表現要素付加ネットワーク (Emotional Factors Attached Network, EFAN) から成る。 2 つの SNN は、それぞれ位置特徴ネットワーク、動作特徴ネットワークと呼ぶ。各ネットワークの機能などについては、次節以降で説明する。

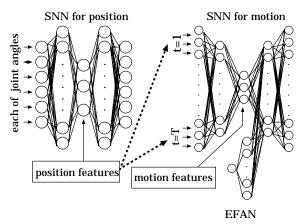


図 2: 提案システムの概形

# 2.3 提案システムによる動作の学習及び生成

#### 2.3.1 位置特徴ネットワーク

位置特徴ネットワークでは、ある時刻における各関節の角度情報に対する恒等写像を学習することで動作の基本となる特徴量を低次元で獲得する。この低次元特徴量を位置特徴量と呼ぶ。学習済みの位置特徴ネットワークの特徴層に位置特徴量を入力することで、各関節の角度情報を再現することができる。位置特徴ネットワークは実際にモータを駆動する指令値と概念的な位置情報の関連付けを行う。特徴層のニューロンが多いほど、より精度良く各関節角度を再現することが可能である。

ランダムに様々なアクションを起こし、それらを位置特徴ネットワークで学習することで、姿勢に対する概念情報をロボットの内部に形成する役割を実現すると考える。人間は非常に多自由度の筋肉を操作して手先を制御するが、普段それらを特に意識することなく手先を動かすことができる。これは、生まれた時から生活の中で数多く姿勢のエラー値を学習することで、姿勢と筋肉の操作量を無意識のうちに対応づけているからである。こういった機能は人間の脳では運動野や運動連合野が果たしている。位置特徴ネットワークは、そのような機能をモデル化していると捉えることができる。

#### 2.3.2 動作特徴ネットワーク

位置特徴量を時系列に並べたもので1つの動作を表現する。この動作を動作特徴ネットワークで学習することで、時系列位置特徴量に対する低次元特徴量を獲得する。この特徴量を動作特徴量と呼ぶ。得られた低次元の動作特徴量のみを用いて学習した時系列動作を再現できる。

人間は「手を振る」という時系列動作を行う場合、それぞれの瞬間における姿勢を意識することなく動作を実現できる。つまり、時間という概念を意識せずに時系列動作が生成できる。これは、人間はあくまで「手を振る」動作はそれ自体で1つの意味を持ち、シンボル化されたものとして内部に持っているからである。人間は、脳において大脳基底核と呼ばれる部位がこの機能を果たしており、動作特徴ネットワークがこれをモデル化していると考えることができる。

#### 2.3.3 動作の生成

位置特徴量及び動作特徴量は、学習させたデータと1対1で対応づけられる。つまり位置特徴量は各姿勢に対して、動作特徴量は各動作に対して特徴量が得られる。この特徴量を変化させて各ネットワークに入力した場合、対応している姿勢または動作とは

異なったものが出力される。これは SNN の汎化能力によるもので、内挿表現と捉えることができる。例えば「手を振る」という動作に対する動作特徴量を変化させて動作特徴ネットワークの特徴層へ入力した場合、「手を振る」に似た別の動作が生成される。

また SNN による NLPCA の特性上、得られる特徴量は各主成分に対応しているので、第1主成分などの主要成分ほどそのデータを表現する上で有用な情報を保持しているといえる。ここで、主要成分が表現しているものとしては各動作で共通性の高い変化の仕方などである。例えば各動作がそれぞれ「ある関節を曲げる」という変化を持っていたならば、第1主成分などの主要成分としてその情報が表現されているといえる。よって、主要成分を変化させた場合は対応しているデータと大きく異なるものが出力され、それほど主要でない成分を変化させた場合は対応しているデータに類似したものが出力されると考えることができる。

以上のように、NLPCA の特性を生かした内挿表現によって多彩な動作が生成可能である。得られた特徴量と生成される動作の関係についても解析が可能である。また、ランダムな動作特徴量によって生成される動作は、全く未知の動作を生成する可能性がある。

# 2.3.4 位置特徴ネットワークと動作特徴ネットワークの 独立性

提案システムは、位置特徴ネットワークと動作特徴ネットワークという2つのネットワークを組合わせることで構成される。2つのネットワークは、位置特徴量を介してそれぞれ独立に学習することができる。そのため位置特徴ネットワークを適切に学習し直すだけで、形状や関節数が異なるロボットに学習済みの動作特徴ネットワークを利用することが可能となる。また、ある関節が故障して動かなくなったような場合にも同じようにして対応できる。一方で新しい動作を学習させる場合、位置表現が既に可能な状態であれば、動作特徴ネットワークの再学習のみでよい。このように、提案システムは様々な応用性を有している。

## 2.4 ロボットの動作による感情表現

#### 2.4.1 感情表現要素の導入

動作と感情の関連性については、現在様々な研究がされている ものの、いまだ万能な感情モデルは発表されていない。本稿では、 基本動作を変化させる様々な形容表現と感情とを関係づけること でモデル化を行った。

基本動作を基にして怒りや悲しみの感情を表現する場合、その表現方法はいくつも考えられ、それぞれの感情に対して決定的に与えられるものではない。そこで、動作によって感情を表現する際の仲介情報の定義が必要になると考える。基本動作を変化させる要素には、動作の「大きさ」や「速さ」など様々なものが挙げられる。よって、そういった基本動作を変化させる要素を、動作で感情を表現する際の重要な因子であるという意味で"感情表現要素"と定義する。

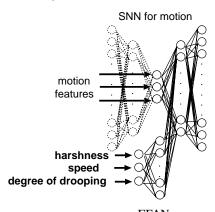
また、1 つの感情表現要素のみでは感情が表現できない。感情は、複数の感情表現要素を組み合わせることで表現されると考える。例えば「大きさ」だけでは「喜び」は表現できないし、「速さ」だけで「怒り」は表現できない。様々な感情表現要素を組み合わせることで初めて、感情の持つ複雑さや曖昧さを表現することができるとする。

今回はロボットとして SONY の AIBO(ERS-7) を用い、感情表現要素として、動作の「荒々しさ」、「速度」、「頭のうなだれ具合」の3つを考える。感情表現要素がない場合、つまり感情を伴わない動作が"基本動作"であり、「手を振る」や「あいさつ」など手のみを用いた行動とする。また、今回は3つの感情表現要素によって、「悲しみ」の感情を表現することを考える。

# 2.4.2 感情表現要素付加ネットワーク EFAN

EFANは、図3のように動作特徴ネットワークに接続したニューラルネットワークである。EFANの入力ユニット数は3であり、それぞれ「荒々しさ」、「速度」、「頭のうなだれ具合」の感情表

現要素に対応している。提案システムに学習させた基本動作は動作特徴量を用いて生成することができる。この時、EFAN が接続している動作特徴ネットワークには基本動作の情報が存在する。よって図3のように、この基本動作の情報に対してEFAN から感情表現要素を付加し、基本動作を変化させることで感情表現を生成する。



EFAN (Emotional Factor Attached Network)

図 3: EFAN での感情表現要素の付加

#### 2.4.3 EFAN での感情表現要素の付加

基本動作「手を振る」の動作特徴量を動作特徴ネットワークの特徴層に入力し、EFANで感情表現要素の入力がなかった場合(すべての入力が0であった場合)、感情を伴わない基本動作が再現される。基本動作「手を振る」の動作特徴量を動作特徴ネットワークの特徴層に入力し、EFANで感情表現要素の入力があった場合は、基本動作「手を振る」が感情表現要素の付加により変化し、例えば「頭をうなだれながら小さくゆっくり手を振る」などの動作が生成される。つまり感情を伴わない基本動作に感情表現要素が付加され、感情を伴う動作が生成される。

また、感情には程度というものがある。同じ「喜び」の感情を考えた場合でも、「少し」や「かなり」などのように「喜び」の度合いが表現できることが望ましい。EFANでは感情表現要素の入力値の大きさによって、その感情表現要素の度合いを変化させることができる。単に「大きい」「小さい」というクリスプな表現ではなく、EFANの入力値を連続的に変化させることでそれに応じて「少し大きい」などの表現を生成する。感情表現要素の度合いを連続的に変化させることで、表現する感情の度合いを調節する。また、複数の感情表現要素の入力が同時にあった場合は、すべての要素が有効に機能する。つまり「頭をうなだれながら大きく速く」などの表現が可能となる。

# 3 実験及び結果

本実験での AIBO の可動関節は頭 3 自由度、脚 3 自由度の計 6 自由度とした。また、ある時刻における関節角度データを 1 フレーム分として、各動作 30 フレームの時系列とした。

## 3.1 基本動作の学習及び生成

基本動作として「手を振る」「あいさつ」「キック」「なんでやねん」の4種類の時系列関節角度データを用意した。位置特徴ネットワークの各層ユニット数は、入力層及び出力層は6(駆動関節の数)、第2層及び第4層は50とした。NLPCAを実現させるために特徴層については学習開始時は1とした。動作特徴ネットワークの各層ユニット数は、入力層及び出力層は位置特徴ネットワークの特徴層ユニット数に依存する。具体的には、「位置特徴ネットワークの特徴層ユニット数×フレーム数30」となる。第2層と第4層は60とした。特徴層については位置特徴ネットワークと同様、学習開始時は1とした。

位置特徴ネットワークの学習に用いる入力データは、4種類の基本動作の時系列関節角度データ(動作数4×フレーム数30:計

120 個) とした。動作特徴ネットワークの学習に用いる入力データは、位置特徴ネットワークの学習で得られた位置特徴量を時系列に並べてひとつの動作としたもの(計4個)である。

それぞれ位置特徴ネットワークで姿勢を学習し、位置特徴量を得た。位置特徴量を時系列に並べて1つの動作として動作特徴ネットワークで学習させ、それぞれの動作に対する動作特徴量を得た。また、動作特徴量を動作特徴ネットワークの特徴層へ入力することで、それぞれの基本動作の時系列関節角度を再現することができた。なお、獲得された位置特徴量次元は4、動作特徴量次元は3である。

# 3.2 感情表現の生成

基本動作の3次元動作特徴量と合わせて、EFANでそれぞれ3つの感情表現要素「荒々しさ」「速度」「頭のうなだれ具合」を入力する。これと対応する教師データ(頭をうなだれながら小さく手を振るなどの感情表現)を位置特徴ネットワークに与え、誤差逆伝搬法を用いてEFANを学習する。重みはEFAN部分のみ変更し、学習済みの動作特徴ネットワークの重みは固定する。

具体的に、EFAN の学習に用いたデータ (感情表現要素の入力値と生成される感情表現) について説明する。「頭のうなだれ具合」は EFAN 入力が 1.0 の時大きくうなだれる。「荒々しさ」は、入力が 1.0 の時に小さい動作、1.0 の時に大きい動作を生成する。「速度」については、入力 0.0 で普通の速さ (動作全体で 6 秒前後)、入力 1.0 で速い動作 (動作全体で 3 秒前後)、入力 1.0 で遅い動作 (動作全体で 10 秒前後) が生成される。また、EFAN の学習には基本動作「手を振る」に対する感情表現のみを用い、その他の 3 つの基本動作に対する感情表現は教師データとして与えない。

以上のようにして EFAN を学習して、基本動作「手を振る」に 対する感情表現を生成した結果を図 4 に示す。

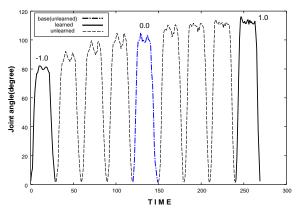


図 4: 「手を振る」荒々しさと EFAN 入力値の関係 (手を上げる方向の関節)

図 4 は手を上げる方向の関節の時系列関節角度を示している。図中の数字は EFAN での入力値である。実際に EFAN の学習に用いた教師データは実線で示してある。一点鎖線で示されているのが EFAN からの入力が 0 の場合、すなわち感情を伴わない基本動作であり、EFAN の学習には用いない。点線で示されているのは、EFAN の学習に用いなかった感情表現要素の入力値 (例えば 0.5 など)を EFAN で入力した場合に生成された動作である。これを見てわかるように、実線で示されているデータを学習させるのみで、入力値の連続的変化に対してもうまく汎化できていることがわかる。他の関節に関しても、同様に汎化能力が得られていることを確認した。

以上より、動作特徴量と合わせて EFAN で感情表現要素を入力することで、基本動作を変化させて感情表現を生成することが可能となった。感情表現要素の程度を EFAN の入力値の大きさによって細かく調節し、感情表現を多彩に生成することもできるようになった。

また、EFAN での未学習動作「キック」「なんでやねん」「あい

さつ」に対して感情表現要素を付加した場合も、EFANで学習させた感情表現が生成できることを実験により確認した。このことは、今回対象とした'悲しみ'の感情を表現するための柔軟な動作生成機構を EFAN が実現することができたといえる。

#### 3.3 EFAN で生成した感情表現に対する評価

AIBO が自律的に「悲しみ」の感情表現を行うためには、感情表現要素を基に EFAN で生成した「悲しみ」の表現と人間が受ける「悲しみ」との関係を調べる必要がある。そこで、どの感情表現要素が、人間が AIBO の動作から受ける「悲しみ」の印象度合いに影響を及ぼすか分析した。また「悲しみ」への影響を及ぼす度合いについても分析した。

順位づけを行うために、本研究では一対比較法 [2] を用いた。一対比較法は、比較対象の内容や性格がそれぞれ異なり、同一の視点では評価しにくい場合に順位づけを行う方法である。具体的には、対象の中から 2 つだけを取り出して比較を繰り返すことを行う。一対比較法の中でもシェッフェの方法 [2] は比較の結果を点数で表すので、比較対象間の優劣度合いを判定することができる。シェッフェの一対比較法は、組合せの効果や順序効果についても検討可能であり、比較的少人数の被験者で実験が可能である。

本研究ではシェッフェの一対比較法 (中屋の変法) を用いた。比較対象は、表 1 に示した AIBO による動作 8 種類 (基本動作「手を振る」に対して 3 つの感情表現要素「荒々しさ」「速度」「頭のうなだれ具合」を様々に付加して生成した感情表現) とした。

表 1: 比較対象に用いた AIBO の 8 種類の行動

$A_i$	大きさ	速度	頭のうなだれ具合
$A_1$	大きい	速い	有り
$A_2$	大きい	遅い	有り
$A_3$	小さい	速い	有り
$A_4$	小さい	遅い	有り
$A_5$	大きい	速い	無し
$A_6$	大きい	遅い	無し
$A_7$	小さい	速い	無し
$A_8$	小さい	遅い	無し

8 種類の動作からそれぞれ 2 つずつ動作を取り出して、 $28(_8C_2)$  通りの動作の組にする。この動作の組を順に被験者に見せ、それぞれの組について 2 つの動作のうちどちらの動作がより「悲しみ」を伴っているか、7 段階で評価してもらう。被験者は 20 代の男子大学生 5 名とし、各動作は AIBO の正面約 1 メートル手前から見てもらった。

こうして得られた被験者の評価結果に対して分散分析を行った。 有意水準 5%で F 検定を行い、「主効果」と「主効果×個人」が 有意であることが示された。このことから、感情表現要素の違い が「悲しみ」の感情表現に影響を与えること、また「悲しみ」の 感じ方は個人差があることがいえる。

主効果が明らかになったので、次にどの動作とどの動作の間に有意差があるのかを検定した。検定には、多重比較の際よく用いられる Tukey のスチューデント化された範囲 q を用い、有意水準 5% で信頼区間を求めた。その結果、 $A_1-A_5$ 、 $A_1-A_7$ 、 $A_2-A_4$ 、 $A_5-A_7$ 、 $A_6-A_8$ 、の組には有意差が認められなかった。その他の組に関しては有意差があることが確認された。

各動作を「悲しみ」の感情表現の度合いについて順位づけした 結果を図5に示す。大きく丸で囲ってある範囲内は、有意差が認 められないので順位がつけられない動作である。図中の数字が大 きいほど、より「悲しみ」の感情を表現できるといえる。また基 準は0.0 の位置であり、それより小さい数字のものは、「悲しみ」 の感情表現ができているとはいえない。

この結果から、「頭をうなだれながら遅く手を振る」動作が最

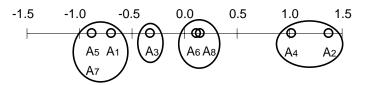


図 5: 順位づけされた結果

も「悲しみ」の感情を伴っているといえる。つまり「頭のうなだれ具合」及び「速度」の感情表現要素は「悲しみ」の感情表現において重要な役割を果しているといえる。また「大きさ」を変化させることは「悲しみ」の感情表現には影響を与えないこともわかった。「速い」行動は「悲しみ」の感情を表現することができないこともわかった。

以上より、導入した感情表現要素がほぼ妥当なものであったことがいえる。また、導入した3つの感情表現要素の中でどの要素がどの程度「悲しみ」の感情表現に有効に働くのかが示された。

# 4 まとめ

NLPCA を実現する SNN を用いたロボットの動作学習及び生成システムを提案した。提案システムは、姿勢に対する位置特徴量を獲得する位置特徴ネットワークと、時系列動作に対して動作特徴量を獲得する動作特徴ネットワーク、動作特徴ネットワークに接続し感情表現要素を付加する EFAN から構成される。

提案システムを用いてロボットの時系列動作から低次元動作特 徴量を自動で抽出し、その特徴量を用いて時系列動作の再現がで きた。特徴量を変化させる内挿表現により、様々な動作が生成で きることを確認し、特徴量成分と生成される行動の関連性につい て解析できる可能性を示した。

ロボットが動作で感情表現する際の動作特徴を感情表現要素と定義し、3つの感情表現要素「荒々しさ」「速度」「頭のうなだれ具合」を導入した。基本動作に3つの感情表現要素をEFANから付加することで、「悲しみ」の感情を動作で表現した。動作特徴量と感情表現要素の組み合わせで多彩な動作が実現できるようになった。未学習動作に対してもEFANから感情表現要素を付加することで「頭をうなだれる」感情表現を自律的に生成することができた。また、感情表現要素と「悲しみ」の感情の関連性について解析も行った。

今後は提案システムの応用性を生かして、より多彩で柔軟なロボットの動作生成の実現を目指す。また感情表現に関しては、人間とのインタラクションも考慮に入れたシステムの構築を行っていく予定である。

# 参考文献

- [1] K.Tatani and Y.Nakamura, "Dimensionality Reduction and Reproduction with Hierarchical NLPCA Neural Networks -Extracting Common Space of Multiple Humanoid Motion Patterns-", in Proc. of 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation, September 2003, pages 1927-1932
- [2] 日科技連官能検査委員会編: "官能検査ハンドブック", 日科技連出版社,1973

#### 連絡先:

〒 464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院 工学研究科 電子情報学専攻 今井 康人

電話:052-789-2776 FAX:052-789-3140 Email:imai@okuma.nuee.nagoya-u.ac.jp

# カオス並列進化による人間協調 ロボットシステムと発想支援システム

# Application to Human Support Robot System and Thinking Support System Using Chaotic Parallel Evolution

黒崎 竜治 Ryuji Kurosaki 山王 章

Akira Sannoh

斎藤 岳央 Takeo Saito 山口 亨

Toru Yamaguchi

Abstract: In this paper, we propose two applications, using chaotic parallel evolution. First, we propose human centered robot system to support human. As an application example, we construct human support robot system, traveling along. Next, we propose thinking support system generating 3-D face picture. It is constructed by interactive chaotic parallel evolution.

#### 1. はじめに

近年工学技術の急速な発展に伴い、人間を支 援するシステムの必要性が高まっている。そう いった流れの中で、より効率的に人間を支援す るための知的なシステムの研究開発が重要な課 題となっている。そこで本稿では、人間支援シ ステムにおけるカオス並列進化を用いた二種類 のアプリケーションを提案する。

一つ目のアプリケーションとして対話型カオ ス並列進化発想支援システムを提案する。これ は、記憶されたパターンの中から、入力パター ンにより記憶されていない様々な出力パターン を創出する発想機能をもつ。この性質を利用し て新たな思考支援の手法とする。

二つ目として、人間の行動をサポートする人 間協調ロボットシステムを提案する。これもカ オス進化を用いることにより、ロボットが環境 に適した行動を自立的に発想し、効率的に知識 を獲得する機能を持たせることを可能にした。

# 2. 発想支援システム

#### 2.1 対話型カオス進化と並列化

対話型コンピューティングでは生成されたそ れぞれの個体に対して人間が評価をしなくては ならないため、個体数が多すぎると人間にかか る負担が大きくなりすべての個体を順位付けし ていく作業も、正確さに欠けるという問題点が ある。これらの理由から、少数の個体から想起 が可能なカオス連想記憶システムが適している。

カオス連想記憶システムは、連想記憶システ ムの記憶の想起過程にカオス的想起を応用した システムであり、その手法として、カオス的最 急降下法(CSD法)を用いている。

提案の手法では、内部に遺伝子の集団を持つ 複数のエージェントを用いる。ビット数が増え るごとに指数的に解空間が大きくなる組み合わ せ問題は、可能な限り細かく分解して、各部分

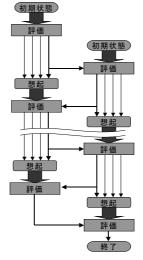


図1並列化

での最適解を求め、それ を組み合わせて全体の 最適解とする手法が効 率的である。エージェン トは評価の際に、他のエ ージェントから最も評 価の高い遺伝子を受け 取り、自分の持つ遺伝子 と結合する(図1)。この ことによって、別のエー ジェントが持つ遺伝子 が、評価に影響してくる 場合に、局所解に陥るの を防ぐことができる。

#### 2.2 3 D 顔画像発想支援システム

本研究では画像生成における発想支援を実現 する目的で、カオス並列進化を3D 顔画像の生成 に応用する。カオス的記憶探索は、記憶させて いないが意味的に有効であるパターンを想起す ることが可能である。そこでこの性質を3D 顔画 像の生成に利用すれば、ユーザがイメージに合 うかどうか判断するだけで適切な顔候補が生成 できる。並列化については、顔認識に特に重要 と思われる特徴部分(目・眉・口)とそれ以外 の部分、および表情に3分割して、なるべく要素 間で依存しているグループをひとつのエージェ ントがまとめて処理をおこなうように設計した。

カオス進化による画像の想起過程を見ると、 最初、様々なパターンの可能性を試し、次第に 方向性が定まってくると、選択した画像に近い ものが増えてくる(図2)。しかし、すべてそうな るわけではなく、選択した画像より距離的に遠 いものも生成され、ローカルミニマムに収束す るのを防いでいる。

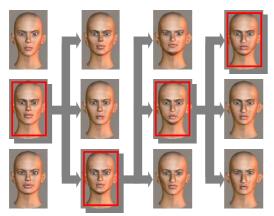


図2 カオス進化による画像の想起例

# 3. 人間協調ロボットシステム

### 3.1 ロボットにおけるカオス進化と並列化

ロボットの知識獲得は自律的に環境に適応していくように知識を発想・学習し獲得する必要があるため、進化的手法が有効である。その中でランダム性に基づく発想では意味のなさない知識も発想され効率的ではないので、ここでもカオス的想起によるカオス進化を用いた。

カオス並列進化の流れを図 3 に示す。ここでは各ロボットを人工生命の個体とみなし、ロボットごとに様々な諸条件を与え並列にカオス的想起を行い、新たな知能をもつロボットを作り出す。そこで環境情報により知能を発現した各ロボットに対し評価を行い、その評価に伴いロボットの淘汰をする。最終的に各条件下に置かれて進化したロボットの知能を統合することで効率的に様々な条件に適応した知能を持つロボットを獲得する。

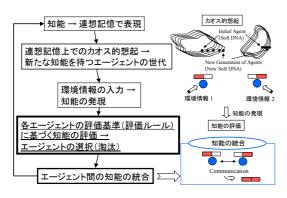


図3 ロボットシステムのカオス並列進化

また今回の並列化の手法は、ロボットの処理 速度よりも獲得までの試行回数の軽減を目的と しているので、役割分担レベルでの並列化を用 いる。

# 3.2 2台並走ロボット

歩行補助のための人間と協調して並走するた

めのロボットの動作知識の獲得を行う。カメラから得られた人間とロボットの位置情報等の環境情報からロボットは知識を発現する。そこで評価基準に従い評価をし、理想的な動作となるまで繰り返す。まず並走時の環境(右周り、左回り各3パターン)ごとにロボットを分けてシミュレーションを行う。そしてそこから得られた結果をシステムに組み込み実機実験を行う。

適切な知識が得られるまでの発想回数を表1に表す。処理時間は逐次型のシステムにおいては40回となるのに対し、本研究で用いたカオス並列進化では最も発想回数のかかった12回に依存する。よって提案の手法では約3.3倍の高速化が実現できた。

命令	大右	右	小右	大左	左	小左
発 想	10	3	5	12	4	6
回数						

表1 命令ごとの発想回数

シミュレーションの結果から得られた知識を 提案のシステムに適用して実機実験を行った。 その軌跡を図4に示す。

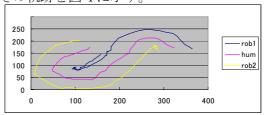


図4 並走時の人間とロボットの軌跡

#### 4. おわりに

本研究のカオス並列進化を用いた適応例の中で、3D顔画像発想支援システムでは個人の感性に適合した顔画像を生成できたといえ、またロボットにおいてはその知識獲得までの発想回数が3.3 倍の高速化が実現でき、提案の手法の有効性を示すことができたといえる。

# 参考文献

- [1] 萩原将文・山口亨共著: ニューラルネットワークとファジィ信号処理, コロナ社, 1998
- [2] 山口亨:カオスと連想記憶,日本ファジィ学会誌, Vol.7, No.3, pp.500-511, 1995

#### 連絡先:

黒崎 竜治

東京都立科学技術大学大学院工学研究科 システム基礎工学専攻 知能情報処理研究室所属

〒191-0052 東京都日野市旭が丘6-6

Phone + Fax: 042-585-8644

E-mail: kurosaki@fml.ec.tmit.ac.jp

# 主観観測モデル理論に基づいたロボットインターフェイス構築

Robot interface based on the theory for subjective observation model

西岡 龍太 白濱 成希
Ryuta Nishioka Naruki Shirahama
北九州工業高等専門学校
Kitakyushu National College of Technology

**Abstract:** We introduce basic concept of a robot interface based on the theory for subjective observation model and show how to construct the system using robot. We discuss a dialogue between two simulated persons who know only emotional words. At first, we define our artificial emotion model and show image code dictionary of mixed emotions which are regarded as emotions in usual life, introduced by R. Plutchik. Secondly, we also show how to design an emotional dialogue system based

and show image code dictionary of mixed emotions which are regarded as emotions in usual life, introduced by R. Plutchik. Secondly, we also show how to design an emotional dialogue system based on the theory for Subjective Observation Model, which have high applicability to several kinds of fields. Finally, we define the robots behavior dimension based with reference to the Plutchik's theory.

# 1. はじめに

マンマシンインターフェイスの分野において「感情」的な要素の重要視されるようになってきている。特にペットロボット等の分野において、感情的なリアクションを持つ製品が増えてきている。しかしながら単純なものが多く、感情の持つ曖昧性や主観性といった性質を取り入れているものは少ない。本論文でわれわれは、主観観測モデル理論をこの分野に応用することに関して考察を行う。

# 2. 感情に関するデータベース

感情心理学の分野から、感情についてベクトル空間内で表現しやすいモデルとして、Plutchik の感情についての立体の理論モデル[1][2]の知見に基づいたモデルとする。感情に関するイメージコードデータベース[3]を作成した。

# 3. 主観観測モデル理論

主観観測モデル理論の特徴は,モデルとして 用意されたベクトル空間内(ここでは感情を表現 する単語空間)の各ベクトルに対し、特別に設け た観測用 2 次元平面で観測するというものであ る。つまり n 次元の世界のオブジェクトに対し、 一度 2 次元世界に写像してはじめて観測・認識 できるという考え方をもとにしている。

主観観測モデル理論については,これまでの論文[4]等に詳しくかかれており,ここでは紙面の都合上簡潔に説明する.写像関数 $\phi$ をイメージコード辞書から任意に選ばれたベクトル対( $\zeta$ ,  $\eta$ ) (主観観測ベクトル対)

$$\zeta = \zeta_1 \mathbf{e}_1 + \zeta_2 \mathbf{e}_2 + \dots + \zeta_n \mathbf{e}_n,$$
  
$$\boldsymbol{\eta} = \eta_1 \mathbf{e}_1 + \eta_2 \mathbf{e}_2 + \dots + \eta_n \mathbf{e}_n,$$
 (1)

とする.写像されたベクトル間の関係を内関で 定義することで

$$\phi(\mathbf{A}) \cdot \phi(\mathbf{e}_i) = \{ (\boldsymbol{\zeta} \cdot \mathbf{A}) \mathbf{o}_1 + (\boldsymbol{\eta} \cdot \mathbf{A}) \mathbf{o}_2 \} \cdot \{ (\boldsymbol{\zeta} \cdot \mathbf{e}_i) \mathbf{o}_1 + (\boldsymbol{\eta} \cdot \mathbf{e}_i) \mathbf{o}_2 \}$$
(2)

$$= (\boldsymbol{\zeta} \cdot \boldsymbol{A}) \boldsymbol{\zeta}_i + (\boldsymbol{\eta} \cdot \boldsymbol{A}) \boldsymbol{\eta}_i, \qquad (3)$$

$$= \left(\sum_{j=1}^{n} \zeta_{j} a_{j}\right) \zeta_{i} + \left(\sum_{j=1}^{n} \eta_{j} a_{j}\right) \eta_{i}. \quad (4)$$

のように記述される.これをベクトル対からなる写像関数によって得られた観測結果とする.つまり任意のベクトル A に対し,ベクトル対( $\zeta$ , $\eta$ )によって観測された結果 Aがえられる.

$$a_i' = \left(\sum_{j=1}^n \zeta_j a_j\right) \zeta_i + \left(\sum_{j=1}^n \eta_j a_j\right) \eta_i, \tag{5}$$

$$\mathbf{A}' = a_1' \mathbf{e}_1 + a_2' \mathbf{e}_2 + \dots + a_n' \mathbf{e}_n. \tag{6}$$

# 4. ER1

今回実験には EvolutionRobotics 社が開発したパーソナルロボットプラットフォームキット ER1[5]を用いる。ER1 は、Windows ノートパソコンと連動することで、画像認識・インターネット接続・音声認識 /合成などの機能を利用することが出来る。



図1 実験に用いたロボットキット ER1

# 5. ロボットの基本行動次元

ロボットに感情を表現させるためにロボットの行動について Plutchik 理論に基づいて基本行動次元を定めた。人間との対応が取れない部分については、代替する概念を割り当てた。以下に「合一」「拒絶」「破壊」「保護」「生殖」「喪失」「定位付け」「探索」という人間の8つの行動次元についてロボットへの対応を定めた。

「合一」 外界から自己の中にものを取り込んで同一化する行動型。ロボットの場合、外界から自己の中に取り込むことができるものは、電力、カメラから得られる画像情報、マイクから得られる音声情報、近接センサーから得られる情報、ネットワークから得られる情報である。ロボットはこれらの情報をもとに、同一化する.(例:主観の形成)

「拒絶」 一度取り入れた有害なものを除去する 行動型。センサーやネットワークから取り入れ られた情報の中で、自己の行動を妨げるような 情報を除去する。

「破壊」 欲求の満足を阻止された時に生じる行動型.ロボットの内部で物理的に必要なもの(電源等)や、「情報」として必要なものが不足しているとき、ロボットはそれを補うための行動を起こそうとする。それを阻止されたとき、ロボットは「怒り」のしぐさを表現する。

「保護」 苦痛や破壊、あるいはその脅威のもとで生じる行動型。ロボットにとって苦痛や破壊 , 脅威を与えるようなものが近くに存在する場合、ロボットはそれから離れることで自分自身を保護する。

「生殖」 性行動と関係する行動型。ロボットは 生殖機能を持たないため、目的を達成するため に協力的な人間や他のロボットに対してよい評 価を得る行動次元とする

「喪失」 接触や合一によってすでに獲得した快適な対象を失うときに生じる行動型。ロボットは「悲しみ」のしぐさを表現する。

「定位付け」 新しい奇妙な対象に遭遇した時に 生じる行動型。ロボットは「驚き」のしぐさを 表現する。また、可能な範囲で対象に関する知 識を蓄えていく。

「探索」 環境を探索するランダムな行動をする 行動型。好奇心旺盛なロボットは、可能な範囲 で環境をランダムに探索する。 人間の場合、8つの基本行動次元「合一/拒絶」「破壊/保護」「生殖/喪失」「定位付け/探索」がそれぞれ「喜び/悲しみ」「怒り/恐れ」「受容/嫌悪」「驚き/期待」に相当する。それぞれ対にして4次元の感情空間を設定する。

ロボットの感情表現は、単語「感情語」に関してはこれまでの研究[3][4]で作成したものを用い、テキストデータ/ディスプレイ/音声等で表現する。その他、ディスプレイに顔の表情を表現させる。また補助的にローラーによる移動、アーム等でも感情を表現し、上記のイメージコードデータベースと対応させていく。

# 6. おわりに

心理学における Plutchik 理論の行動次元と対応させる形で Robot の感情を定義した。今後感情データベースを作成し、主観を考慮して感情表現を行うロボットインターフェイスを構築する。

# 参考文献

- [1] Plutchik, Robert., Emotion:theory, research & experience. Vol.4.(the measurement of emotions), SanDiego: Academic, 1989.
- [2] Plutchik, Robert., The multifactor analytic theory of emotion, Journal of psychology, pp.153-171, 1960.
- [3] Naruki SHIRAHAMA Torao YANARU and Kazunori MIYAMOTO, An Approach to Construct an Emotional Dialogue System Based on Subjective Observation Biomedical Fuzzy and Human Sciences, Vol.5, No.1, pp.39-48, 1999.
- [4] Shirahama, N., Yanaru, T., Yoshida, K. and Nagamatsu, M., An Emotion Processing System Based on Fuzzy Inference and Subjective Observations, Soft Computing in Human-Related Sciences, CRC Press, chapter 9, pp293-334, 1999.
- [5] 「作る!パーソナルロボットキット」バンダ イロボット研究所 http://www.toprunner.co.jp/shop/robot/er1 /030318\_01.html

#### 連絡先:

白濱 成希

北九州工業高等専門学校電子制御工学科 〒802-0985 福岡県北九州市 小倉南区山手 1-16-21

Phone: 093-964-7340 Fax: 093-964-7288

E-mail: naruki@kct.ac.jp

# 時系列テキストマイニング法の効果

Effect of Sequential Text Mining Method

櫻井 茂明

植野 研

Shigeaki SAKURAI

Ken UENO

#### (株) 東芝 研究開発センター

Corporate Research & Development Center, Toshiba Corporation

Abstract: We have proposed the method that discovers sequential patterns from textual data with time information and attributes. The method generates clusters by gathering textual data with the same attribute values and generates sequential data by sorting in order of time. Also, the method extracts frequent sequential patterns from sequential data. In this paper, we apply the method to daily business reports written by salespersons and extracts sequential patterns. We verify whether the patterns are important by investigating reports relevant to the patterns.

# 1 はじめに

コンピュータ環境及びネットワーク環境の進展に伴って、営業日報、Web ログ、生体情報等の時間情報を持ったデータが簡便に収集できるようになり、時系列的な性質を持ったデータに対するマイニング法が研究されるようになっている。提案されている多くの方法は、センサーデータを対象とした数値的な時系列を扱う方法[3] [10] であり、テキスト的な時系列を扱う方法はそれ程研究がなされていない。論文 [5] [9] においては、テキストデータも利用しているものの、テキスト自体の時間的流れに着目しているわけではなく、時間情報を十分に活用しているとはいえない。

一方、テキストデータを分析する技術として、テキストマイニングに関する研究 [2] [4] [6] も活発に行われている。しなしながら、ある時間までに収集したテキストデータを対象とした分析を行っているため、時間的な推移を考慮した分析を行うことはできない。

このような背景の下、我々のグループでは、テキストに付随する時間情報を有効に活用して分析を行う方法として、時間情報を持ったテキストデータの中から時系列パターンを発見する方法を提案した [7] [8]。しかしながら、従来の実験システムでは、発見した時系列パターンの絞込み方法、関連するテキストの抽出方法等の機能に不足があったため、発見したパターンの効果を検証することが難しかった。また、必ずしも有用なパターンを発見できない危険性も内在していた。そこで、本論文では、これら問題点を改良した実験システムを構築するとともに、SFAシステムから得られる営業日報データを対象とする実験結果を報告し、改良システムの効果を検証する。

# 2 時系列パターン

### 2.1 問題設定

時間情報を持ったテキストデータといっても種々の 形式が考えられる。本論文では、そのうち、ひとつの 時間情報、複数の属性情報、ひとつのテキスト情報か らなるデータを時間情報を持ったテキストデータとし て扱うことにする。すなわち、図1に示すような営業 日報が時間情報を持ったテキストデータの一例となる。

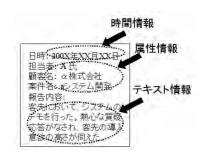


図 1: 時間情報を持ったテキストデータ

このようなテキストデータを大量に収集し、その時間情報に従って並べることにより、図2に示すようなテキストデータの系列を生成する。このとき、各テキストデータはテキストデータの内容を一般化した複数のイベントにより特徴付けられており、テキストデータの系列はイベント集合の系列として表現される。

時系列テキストデータが与えられた場合に、次に起こるイベントを予測したり、目的とするイベントへと導くのに必要なイベントを提案したりすることができれば、人間の意思決定を支援できると考えられる。このような予測や提案を行うには、図3に示すような特

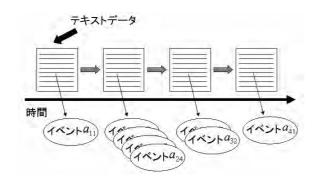


図 2: テキストデータの系列

徴的な部分系列 (時系列パターン) を利用する必要がある。そこで、大量に与えられたテキストデータから時系列パターンを発見する問題を以下において考えることにする。図3の例では、イベント $a_{21}$ 、 $a_{22}$ が同時に発生し、その前後にイベント $a_{11}$ 、 $a_{41}$ が発生する時系列パターンを示している。

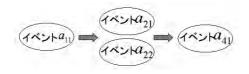


図 3: 発見される時系列パターン

#### 2.2 発見法

提案する時系列テキストマイニング法では、図4に 示すフローに従って、時間情報を持った時系列データ から時系列パターンを抽出する。すなわち、与えられ たテキストデータに対して形態素解析を実施する一方、 キー概念辞書を利用することにより、テキストに対応 するキー概念をイベントとして抽出する。ここで、キー 概念辞書は3階層構成の木構造で記述された一種のシ ソーラスであり、実際にテキストに記述される表現を 正規表現で記述した表層表現、同一の意味を持つ表層 表現をまとめたキー概念、関連するキー概念をまとめ た概念クラスを用いて記述されている。次に、テキス トに付随する属性情報を利用してテキストをグループ 化し、時間情報を用いてテキストを並べかえ、テキス トに付随するイベントの集合を要素とする時系列デー タを生成する。このようにして生成した時系列データ に対して、GSP (Generalized Sequential Patterns) [1] に課されていた要素の並びに関する制限を緩和したア

ルゴリズムを利用することにより、時系列パターンを 生成する。ただし、GSP は頻出する系列パターンを発 見するアルゴリズムであり、長さが 1 の頻出する系列 パターンの発見から開始して、系列の長さが (i+1) と なる系列パターンの発見の際に、系列の長さが i の系列 パターンを基にして候補となる系列パターンを逐次的 に発見していく方法である。

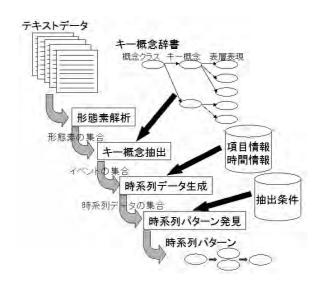


図 4: 時系列パターン発見の流れ

# 2.3 時系列パターン発見システムの改良

#### 2.3.1 時系列パターンの絞込み

従来の実験システムでは、支持度を超えるすべての 時系列パターンを出力していた。本時系列パターンは、 系列を構成する要素の部分集合の組合せを反映した時 系列パターンになっている。このため、多数の関連する 時系列パターンが別個に出力されることになり、見か け上多数の時系列パターンが出力される。例えば、長さ が2の時系列パターンとして、(ab)(cd) といった時系 列パターンが支持度以上になる場合を考える。ただし、 () で括られたイベントの集合が系列のひとつの要素を 構成しているとする。このとき、(ab) の部分集合であ る a、b、(ab) 及び (cd) の部分集合である c、d、(cd) を 組み合わせた時系列パターン、(a)(c)、(a)(d)、(a)(cd), (ab)(c), (ab)(d), (b)(c)、(b)(d)、(b)(cd) も支持度以上 の時系列パターンとなる。このため、9つの時系列パ ターンが出力されることになる。このように、関連す る時系列パターンが多数出力されるため、従来のシス テムでは特徴的な時系列パターンを発見することが難

しくなっている。そこで、抽出された時系列パターンに対して、支持度以上の他の系列に含まれているかどうかの判定を出力時に実施し、含意されている時系列パターンは出力しないようにする。この処理を導入することにより、大幅な時系列パターンの絞込みを行うことが期待できる。

上記の処理を追加したとしても、支持度を小さくし た場合には、依然として多数の時系列パターンが出力 される可能性がある。支持度を大きくすることにより、 出力される時系列パターンを少なくできるものの、支 持度の高さと特徴的な時系列パターンの間には完全な 相関関係が存在しないため、特徴的な時系列パターン を見落とす危険性がある。この問題を解決するには、特 徴的な時系列パターンを抽出する指標をうまく定義す る必要がある。しかしながら、このような指標の定義 は、タスクに依存する部分も大きく一般化することは 難しくなっている。一方、タスクが設定されるとする ならば、どういったイベントのつながりに興味がある かをある程度指定することができる。このため、指定 したイベントのつながりを含む時系列パターンが特徴 的な時系列パターンになる可能性は高いと考えられる。 従って、予め指定したイベントのつながりに基づいて 時系列パターンを絞り込むことにより、支持度が低い 場合にも、特徴的な時系列パターンを容易に発見する ことが期待できる。

#### 2.3.2 関連テキストの抽出

従来の実験システムでは、支持度以上の時系列パター ンを発見するものの、本時系列パターンが実際にどう いったテキストの集合から抽出されたものかを調べる ことは難しかった。一方、時系列パターンを発見する前 段階で実施しているテキストマイニングは、登録した 正規表現に一致するキー概念を抽出してイベントとみ なしているため、テキストに記述されている文書表現 によっては、妥当なイベントを抽出していない可能性 がある。発見された時系列パターンの妥当性を検証す るには、本時系列パターンに関連するテキストに立ち 返って、その妥当性を検証する必要がある。このため、 従来の実験システムでは、この妥当性を十分に検証す ることが難しかった。そこで、時系列データのどの要素 に時系列パターンの要素が含まれているか、その位置 を記憶する処理を追加するとともに、当該時系列デー タの要素を構成するイベントを抽出する基になったテ キストデータの位置を記憶する処理を追加することに より、時系列パターンに関連するテキストを容易に参 照できるようにする。

#### 2.3.3 メモリ獲得

従来の実験システムでは、候補となる時系列パター ンをすべて生成した後で、時系列パターンが支持度を 超えるかどうかの判定を行い、支持度を超える時系列 パターンを抽出するといった処理を実施していた。本 実装の場合、予め候補となる時系列パターンを格納す るメモリを獲得しておく必要があり、多数の組合せを 考慮する本システムでは、メモリを獲得できなくなる 現象が発生していた。一方、前節で導入した関連テキス トの抽出機能を実現するには、時系列パターンに関連 するテキストの情報を記憶する必要があり、一層のメ モリが必要になると予想される。このため、従来のメ モリ獲得方式を踏襲していたのでは、従来システムに 比べて、メモリを獲得できなくなる現象が頻繁に発生 すると考えられる。そこで、候補となる時系列パター ンを予めすべて生成する代わりに、候補とする時系列 パターンをひとつ生成しては、支持度を超えるかどう かの判定を行い、支持度を超える時系列パターンだけ を記憶するように実装の変更を行う。本実装の変更に より、抽出されない時系列パターンに対してはメモリ を獲得する必要がなくなるため、メモリを獲得できな くなる現象を抑えることが期待できる。

# 3 実験

## 3.1 実験データ

顧客満足度の向上が重要視されるに従って、営業員の業務を統合的に支援する SFA (Sales Force Automation)システムの必要性が高まっている。今回改良した時系列テキストマイニング法を利用することにより、SFAシステムに蓄積されている営業日報を分析することが可能と考えられ、受注・失注にいたるパターンを発見したり、発見されたパターンに従った行動の提案を行ったりすることが期待できる。そこで、改良する時系列テキストマイニング法を SFA データの分析に適用し、その効果を検証する。

(株) 東芝社内の5つの営業部門に導入されている SFA システムから入手した 27,731 件の営業日報を実験デー タとして利用する。各データは、顧客名、担当者氏名、 所属、活動日、案件名、ソリューション名、活動内容 といった項目から構成されており、活動日が時間情報、活動内容がテキスト情報、その他の項目が属性情報に対応している。このような SFA データに対して、顧客名、案件名を指定して、テキストデータを生成する。本データの場合、6,434 件の時系列テキストデータを生成することができる。ここで、表 1 に時系列データに関連する情報を示す。表 1 においては、系列数、要素数、日報数が、それぞれ、時系列データの件数、時系列データを構成する要素の件数、SFA データに含まれる日報の件数を示している。また、表における各値は、概念クラス数が 3、キー概念数が 61、表層表現数が 835 となるキー概念辞書に基づいて生成された時系列データである。本辞書は、製品の評価に関連した表現をイベントとして抽出することができる。

表 1: 時系列データ関連情報

部門名	系列数	要素数	日報数
Section A	3,984	17,056	19,737
Section B	416	818	849
Section C	1,302	3,612	4,116
Section D	398	1,812	2,011
Section E	334	951	1,018

# 3.2 実験方法

各部門の SFA データから生成した時系列データに対 して、時系列パターンを発見するシステムを利用して 時系列パターンの発見を試みる。このとき、時系列パ ターンの発見に利用する支持度を5%、2%、1%と変化 させて時系列パターンを発見し、発見される時系列パ ターンの数、発見に要する時間、発見された時系列パ ターンに関連するテキストの数を比較する。また、従 来の時系列パターン発見システムと比較した効果を検 証するため、時系列パターンの絞込みを行わない場合 (以下 NE)、含意する時系列パターンに関する絞込みだ けを行う場合 (以下 IE)、含意する系列に関する絞込み に加えて指定した時系列パターンを利用した絞込みを 実施する場合(以下 AE)に基づいた実験を行い、結果 を比較する。ただし、絞込みに利用する条件となる時 系列パターンとしては、概念クラスが「不評」となる イベントの後に、キー概念が「内定・受注」となるイベ ントが現れる23個の時系列パターンを利用する。この ような絞込みを行うことにより、SFA データの分析者 にとっては興味深いと考えられる評判の悪かった案件を盛り返して内定・受注に至った時系列パターンに絞った抽出を行うことができる。一方、発見された時系列パターンの妥当性を検証するため、AEの場合には発見された時系列パターンに関連するテキストも併せて出力する。

## 3.3 実験結果

前節に説明した実験に基づいて得られた実験結果を以下に示す。表 2 は、NE の場合において、支持度を 5%、2%、1%と変えた場合に得られる時系列パターンの件数を表しており、縦軸が部門名、横軸が支持度の大きさを示している。ただし、「—」と記述されている部分に関しては、時系列パターンの件数が多くなり過ぎたため、メモリを獲得できなくなり、最長の系列パターンまで得られなかったことを示している。

表 2: 時系列パターン (件数)

部門名	5%	2%	1%
Section A	463	21,397	_
Section B	9	170	2,312
Section C	132	3,619	78,951
Section D	2,433	_	_
Section E	53	2,014	117,387

また、図 5、図 6 は NE を基準とした場合の時系列パターンの削減率を示しており、図 5 が AE の場合の削減率、図 6 が IE の場合の削減率を示している。各図においては、縦軸が割合、横軸が対象とするデータセット及び支持度を示している。また、各データセットにおける計算可能な範囲で、時系列パターンを最も多く出力する場合を代表的な結果として示しているが、他の支持度の場合においても同様の効果が得られている。

次に、図7は概念クラスが「不評」であるキー概念が出現する日報とキー概念「内定・受注」が出現する日報の件数を基準として、AEの場合における関連する日報の数を割った値を示している。時系列マイニングエンジンを利用しなかった場合、「不評」 「内定・受注」に関連する知見を得ようとするならば、当該キー概念を含む日報を閲覧する必要がある。従って、本値は時系列マイニングエンジンを利用することによって閲覧しなければならない日報を削減できる割合を示している。図7においては、縦軸が割合、横軸が対象とするデータセット及びその支持度を示している。また、

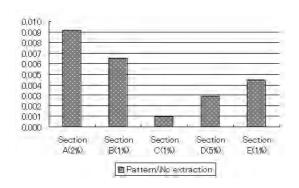


図 5: 時系列パターンの削減率 (AE/NE)

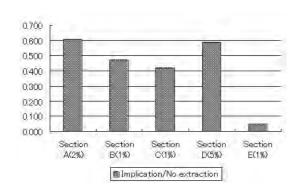


図 6: 時系列パターンの削減率 (IE/NE)

計算可能な範囲で時系列パターンを最も多く出力する 場合を代表的な結果として示している。

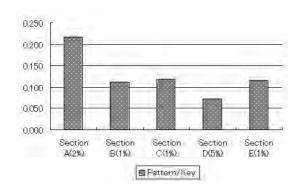


図 7: 閲覧テキストの削減率

最後に、表3に AE の場合における時系列パターンの発見時間を示す。表3の値は、EQUIUM $^{TM}6010$  (CPU:  $1000 \mathrm{MHz}$ , Memory:  $500 \mathrm{MB}$ ) で計算した場合の秒単位の時間であり、縦軸が部門名、横軸が支持度の大きさを示している。

表 3: 時系列パターン発見時間(秒)

部門名	5%	2%	1%
Section A	9,999.528	11,109.494	_
Section B	2.143	2.353	4.676
Section C	88.657	102.637	697.142
Section D	104.189	_	_
Section E	5.628	6.529	1,048.597

#### 3.4 考察

#### 時系列パターンの削減:

図 5、図 6 から分かるように、含意される系列を削除したり、指定した条件に一致する時系列パターンに 絞り込んだりすることにより、大幅に発見される時系 列パターンを削減することができる。AE の場合には、NE の 1%以下にまで時系列パターンを絞り込むことができ、利用者による時系列パターンのチェックを容易にしている。また、発見された時系列パターンを見切れないために、従来システムでは高い支持度を設定しなければならかった場合にも、より小さな支持度を設定することができるため、従来システムでは発見が難しかった有用な時系列パターンを発見することもできる。

#### 閲覧日報:

図7から分かるように、時系列パターン発見システムを利用することにより、単純にテキストマイニングを実施して、注目するキー概念を含む日報を閲覧するよりも閲覧する日報の数を大幅に削減することができる。また、時系列的に関連する日報をその時間順を追って閲覧することもできる。このため、単純なテキストマイニングでは見落としかねない時間の変遷を考慮した知見をより簡便に日報から読み取ることができる。

一方、従来システムでは、時系列パターンを発見するだけであったが、改良したシステムでは時系列パターンに関連する日報を容易に辿ることができる。このため、発見された時系列パターンの妥当性を本来の日報に立ち返って容易に検証することができる。

#### 発見パターンの妥当性:

Section B データセット、支持度 1%、系列の長さが 2、AE の場合においては、8 個の時系列パターンが発見されており、関連する日報として 33 件の日報が抽出されている。本日報データを精査することにより抽出した時系列パターンの妥当性を検討してみる。その結果、本日報の集合には、以下に示すような有用と思われる

一連の日報を含んでおり、発見された時系列パターン はある程度妥当なものであったと考えられる。

- 1. 対応の不手際により他社に切り替わりそうになった案件を取り戻すために、従来以上の厳しいチェックを行って受注にこぎつけた。
- 2. 価格が高いとの客先の反応に対して、関係部門と 調整して値引きを行い受注にこぎつけた。
- 3. トラブル対応期間終了後に、バックアップ範囲を 客先とすり合わせて明確化することにより、バッ クアップ範囲を限定した上で受注にこぎつけた。

#### 時系列パターンの未抽出:

表2に示すように、対象とするデータセットによるば らつきはあるものの、支持度を小さくすることにより、 発見されるパターンの数は急速に増加しており、Section B データセットや Section D データセットではすべての 時系列パターンを発見できない現象が依然として発生 している。Section B データセットの場合、データセッ トに含まれるテキスト数が多く、多数のキー概念が出 力されており、発見される時系列パターンが多くなって 本現象が発生したと考えられる。一方、Section D デー タセットの場合、データセットから生成される時系列 データが少ない割には、時系列データを構成するキー 概念数が多く、要素を構成するキー概念数が多くなって いる。このため、多数の時系列パターンがキー概念の 組合せにより生成され、本現象が発生したと考えられ る。今後、時系列パターンの生成方法の見直しを行って 一層のメモリ削減方法を検討する必要がある。

# 4 まとめと今後の課題

本論文では、従来から開発している時間情報を持ったテキストデータから時系列パターンを発見する時系列パターン発見システムの改良方法を提案した。また、本機能を実装した時系列パターン発見システムを社内の営業部門から入手した SFA データに適用して、その有効性を検証した。その結果、より小さい支持度での時系列パターンの発見へとつながる時系列パターンの削減、閲覧する日報の大幅な削減を実現するとともに、発見された時系列パターンの妥当性をある程度確認することができた。しかしながら、時系列パターンの記憶方法の問題から時系列パターンを発見できない問題は依然として残されているばかりか、時系列パターン

間の期間の制約の掛け方に関しても検討の余地が残されており、今後も改良を進めていく予定である。

# 参考文献

- R. Agrawal and R. Srikant: "Mining Sequential Patterns", Proc. of the 11th Int. Conf. Data Engineering, pp.3-14, 1995
- [2] 市村 由美, 他: 「日報分析システムと分析用知識記 述支援ツールの開発」, 信学論, Vol.J86-D-II, No.2, pp.310-323, 2003
- [3] 倉橋 節也, 寺野 隆雄: 「学習分類子システムを 用いたプロセス時系列からのデータマイニング」, SIG-KBS-A201, pp.1-6, 2002
- [4] K. Lagus, et al.: "Websom for Textual Data Mining", J. of Artificial Intelligence Review, Vol.13, No.5/6, pp.335-364, 1999
- [5] V. Lavrenko, et al.: "Mining of Concurrent Text and Time-Series", Proc. of the KDD-2000 Workshop on Text Mining, 2000
- [6] 櫻井 茂明, 他: 「テキストマイニングシステム向け の構造抽出ルールの自動学習」, 電学論 C, Vol.122, No.6, pp.1009-1015, 2002
- [7] 櫻井 茂明, 植野 研: 「テキストデータからの時系列パターンの発見」, 第 21 回ファジィワークショップ, No.4-2, pp.1-4, 2003
- [8] 植野 研, 櫻井 茂明: 「時系列共起アルゴリズムによる営業知識獲得-実データによる実験結果報告-」, 信学技報, AI2003-63-75, pp.61-66, 2004
- [9] R. Swan and D. Jensen: "TimeMines: Constructing Timelines with Statistical Models of Word Usage", Proc. of the KDD-2000 Workshop on Text Mining, 2000
- [10] 山田 悠, 他: 「時系列決定木による分類学習」, 第 17回人工知能学会全国大会論文集, 1F5-06, 2003

#### 連絡先:

#### 櫻井 茂明

〒 212-8582 神奈川県川崎市幸区小向東芝町 1, (株) 東芝 研究開発センター 知識メディアラボラトリー

 $\hbox{E-mail: shigeaki.sakurai@toshiba.co.jp}\\$ 

# メタキーワードを考慮した拡張ベクトル空間モデルの提案 Proposal of Modified Vector Space Model based on Meta Keywords

石橋 融

高間 康史

Toru Ishibashi Takama Yasufumi 東京都立科学技術大学

Tokyo Metropolitan Institute of Technology

Abstract: Information retrieval based on Vector Space Model (VSM) only uses typical index words contained in documents. For that reason, when we apply it to a specific field such as medicine, it can crowd the documents in Vector Space, which makes it difficult to retrieve and cluster them. Therefore, to separate the crowded documents, we propose Modified Vector Space Model (MVSM) based on meta keywords such as adjectives and adverbs. By applying MVSM to Medline (medical literature database), we intend to prove that it can separate documents crowded in Vector Space.

#### 1 はじめに

近年データ収集技術の大幅な進歩と記憶装置 の大幅な低価格化により、情報収集はたやすい作 業になり山のように巨大なデータベースが存在 するようになった。データマイニングとはこれら の膨大なデータベースから既存の知識とは異な る新しい知識、規則性を発見し有効利用するとい うプロセスである。大量のデータが身近に利用で きるようになり様々なマイニングの手法が開発 されている。これらはベクトル空間モデル (VSM) に基づくものが多いが、従来のベクト ル空間モデルを医学などの特定分野のデータベ ースに適用する場合、文書群がベクトル空間に密 集してしまい、文書間の類似性を判別することが 困難になってしまうという問題が発生する。そこ で本研究では密集した文書群を分割するために、 メタキーワード (修飾語)を用いてベクトル空間 モデルを拡張する手法を提案する。データマイニ ングにおける共通データとして医療データがよ く用いられることや、近年医学において注目され ている「Statistical Evidence に基づいた EBM (Evidence-Based Medicine)」が文献検 索およびデータ収集と密接に関係あることから、 アメリカ医学国立図書館の有名なオンライン生 物医学データベース Medline に提案手法を適用 し、有効性を示す。

### 2 ベクトル空間モデル

#### 2.1 従来モデル

文書  $D_j$  に現れる索引語  $t_i$  の重み  $w_{ij}$  は TFIDF 値を用いる。TFIDF 値の計算方法は表 1 に示す。文書  $D_j$  のベクトルは各索引語を次元に 割り当てた多次元空間におけるベクトルとして 表現でき、 $N_w$ を文書集合における全ての異なる 索引語数とすると、 $\vec{D}_j = (w_{1j}, w_{2j}, ..., w_{Nwj})^t$  と表すことができる。一方質問 q も索引語  $t_i$  を含まなければ 0、含めば 1 という値にしてベクトルと

して表現できる( $\vec{q}=(q_1,q_2,...,q_{Nw})^t$ )。こうして与えられた質問qと文書 $D_j$ のベクトル表現より、両者の類似度 $sim(q,D_j)$ は、ベクトルの方向を文書の特徴と考えることにより、二つのベクトルが成す角度 $\theta$ に基づき定義される。すなわち、 $\cos\theta$  が 1 に近いほど類似度が高いため、 $sim(q,D_i)$ は式(1)で定義される。

$$sim(q,D_{j}) = \frac{q_{1}w_{1j} + ... + q_{Nw}w_{Nwj}}{\sqrt{q_{1}^{2} + ... + q_{Nw}^{2}} \times \sqrt{w_{1j}^{2} + ... + w_{Nwj}^{2}}}$$

$$(1)$$

この式を用い質問と文書、あるいは文書間の類似度を計算する。

表 1 TFIDF 値の計算方法

TFIDF	$TFIDF = TF \times IDF$
$TF_{ij} = \frac{m_{ij}}{M_j}$	$egin{aligned} m{m}_{ij} \cdots m{t}_i  \mathcal{O}  D_j  \Phi \mathcal{O} \ & egin{aligned} m{H}_j  \cdots  D_j  \Phi \mathcal{O}  m{E} \ & m{E}  m{\&}   m{\&}                   $
$IDF(t_i) = \log \frac{N_D}{DF(t_i)}$	$N_D \cdots$ 文書総数 $DF(t_i) \cdots t_i$ の出現 文書数

#### 2.2 提案手法

前節で述べたように従来のベクトル空間モデルを医療などの特定分野のデータベースに適用する場合、文書がベクトル空間内で密集してしまい検索やクラスタリングの際問題となる。これは特定かつ少数の索引語の重みが多数の文書中で大きくなってしまうためである。そこで索引語の概念を限定するメタキーワード(修飾語)を用いて密集した文書群を分割できるようにベクトル空間モデルを拡張する。基本索引語としてはMedlineのシソーラスであるMeSH(Medical Subject Headings)を使用し、文書中でこれらを

$$sim(q, D_{j}) = \frac{q_{1}w_{1j}F_{1} + ... + q_{Nw}w_{Nwj}F_{Nw}}{\sqrt{q_{1}^{2} + ... + q_{Nw}^{2}} \times \sqrt{w_{1j}^{2} + ... + w_{Nwj}^{2}}}$$

$$F_{i} = \begin{cases} 1 \cdots \mid ME_{ij} \mid = \mid ME_{iq} \mid = 0 \\ \mid ME_{ij} \cap ME_{iq} \mid \cdots otherwise \end{cases} \tag{2}$$

# 3 結果、考察

サンプルデータとして C 型肝炎に関する文献 100 枚を用意し、従来手法と提案手法を適用して、文書間の類似度を計算した。図 1 は従来手法、図 2 は提案手法による結果を文書間の類似度が視覚的にわかるようにキーワードマップで表示したものである。従来手法では一つの文書と残りの文書全てが関連を持っているが、提案手法では、文書が細かいクラスタに分かれていることがわかる。

また表 2 は文書  $D_j$ 、 $D_k$ 中の一文である。  $t_i$ =immunity とすると、 $ME_{ij}$ ={Simultaneously ,virus-specific}、 $ME_{ik}$ ={cellular}となる。この 場合  $F_i$ は、共通するメタキーワードがないので 0となり区別される。文書間の類似度を見ても従来手法では 0.283669、提案手法では 0.024236となり文書間の類似性が低くなったことがわかる。

次に細かく分かれたクラスタを一つ選択し、その中の文書の内容が類似しているかどうか医学の専門家に評価してもらったところ、分割に有効なメタキーワードの存在が確認されたが、メタキーワードによらず重要な基本索引語を、区別して

表 2 文書 $D_i$ 、 $D_k$ 中の一文

文書 $D_i$	Simultaneously, virus-specific
J J	immunity is induced by antigen.
文書 $D_k$	HCV subverts cellular immunity by IL-10.

#### 図1 従来手法による結果

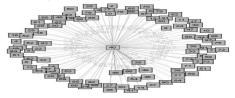


図2 提案手法による結果



扱ってしまう場合もあることがわかった。これは索引語の *DF* 値に注目し、特定の少数の文書に出現する (*DF* 値が低い) 索引語に対してはメタキーワードを考慮しない、という基準を設定することによって解決できると考える。

また今回の実験ではメタキーワードとして形容詞、副詞のみを使用したが、文の構造によっては名詞もメタキーワードになることが考えられる。例えば、~に関係しているという意味のinvolved in が文中にあれば、意味的には in の後ろにくる名詞と主語になる名詞の関係が重要であるため、特定の動詞や前置詞(of や at、with など)の直後に位置する名詞もメタキーワードにする必要があると考える。また形容詞、副詞は主に前位修飾語として用いられているため、今回は後位修飾語については考慮しなかった。後位修飾語としては、動詞の形容詞的用法がよく用いられているのでそれらもメタキーワードとして考慮する事なども検討する必要がある。

#### 4 終わりに

特定分野のデータベースにベクトル空間モデル適用する場合に密集してしまう文書群を分割するため、メタキーワードに基づきベクトル空間モデルを拡張した。今後はメタキーワードの抽出方法を検討し、提案手法により分割されてできるクラスタの文書間が内容的により近く評価されるように改善する必要がある。

#### 参考文献

[1]トアンナム・チャン、沼尾 正行「生物医学 文献データベースを利用する医療データマイニ ング」 人工知能学会研究会資料

SIG-KBS-A201-06 (5/23) P29~P34

# 連絡先

高間 康史 東京都立科学技術大学 電子システム工学科

〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6 E-mail: ytakama@cc.tmit.ac.jp TEL/FAX: 042-585-8629

# 評価表現による商品評価ページのマッピング Projecting products' review pages by evaluating expressions

村田 忠彦 垣東 伸明
Tadahiko Murata Nobuaki Kakito
関西大学総合情報学部
Faculty of Informatics, Kansai University

**Abstract:** Recently a flood of web pages are available on the net. Among them there are products' review pages that have useful and informative contents about specific products. On the other hand, there are thousands of pages including few and less informative contents. In this paper, we propose a method to project product's review pages onto two-dimensional space by counting the number of keywords which are used for evaluating the product. We apply our method to review pages for mobile phone, and show the effectiveness of the proposed method by experimentation with human subjects.

#### 1. はじめに

WWW は多くの人が低コストで情報を発信で きる場であり,膨大な情報が分散して存在して いる.その中には,ある特定の商品を評価して いる Web ページも多く, 閲覧者の商品購入の意 思決定を助けるものもある、このような意思決 定の際に重要となるのが, 閲覧者とは異なる立 場の意見を含む主観的な情報である.主観的情 報は,物事に対する事実や定義が記述されてい る客観的情報を補足するものとして,商品購入 支援の場面などで活用されている[1,2].立石ら は,Web 上から評価表現を含む文章を抽出し, 一文ずつ提示することで主観的意見の効率的収 集を試みている[1].また,高間らは,Webペー ジにおける主観的評価を形容詞句,副詞句を特 徴量として用いる推定手法を提案しており,名 詞句中心の特徴量を用いるよりも有効であるこ とを示している[2].

立石らの研究[1]は、商品名と評価表現を含む 一文を抽出することを目的としており、その一 文を含む Web ページ自体が、ほかにどの程度意 見を持っているのかを考慮していない、そのた め、収集された一文しか見るに値しない Web ページの意見も収集してしまう可能性がある、そ こで本研究では、一文を対象とするのではなる、 商品評価を行っている Web ページ全体を対象と して、形容詞、名詞による評価表現の判定から 対象ページの特性を判定する手法を提案する、 また、マッピング結果の妥当性を検討するため、 大学生による定性的評価を行い、提案手法の有 効性を示す、

# 2. 商品評価ページマッピング手法

立石らの研究[1]では商品名,評価表現を含む一文を Web 上から収集している.一方,本研究では,図1のように,商品名を含む Web ページから茶筌[3]により抽出した単語を評価表現辞書に登録された単語と比較して,商品に対する良

い評価表現の数(以下, Good),悪い評価表現の数(以下, Bad)のカウントを行う.その後,横軸を Good 数,縦軸を Bad 数とした図2のような平面にマッピングする.図2から,Good,Badともに多いページは,商品の良い部分も悪い部分も評価できているリッチなページであり,Goodが多いページは主に商品紹介を行うポジティブなページと考えられる.このような2次元への写像により,適切な商品評価を行うWebページ検索の支援が可能になると考えられる.

本研究で実装したのは図1の点線内の部分である.評価表現のカウントについては,図1の「肯定・否定反転処理」部分で,抽出された評価表現の6文節以内に「ない」などの表現があれば,GoodとBadを反転させている.このような処理でGood,Badのカウント数を確定させ,商品評価を行うWebページ群のマッピングを行う.

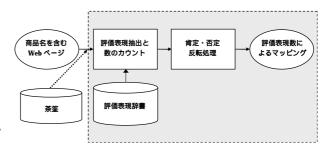


図1 処理の流れ

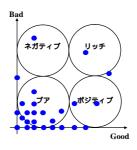


図 2 マッピング例と Web ページの特性

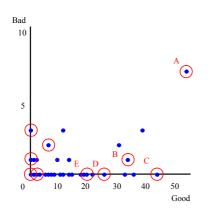


図3 SO505iS に対して得られたマッピング結果

# 3. 提案手法によるマッピングの有効性

#### 3.1 マッピングの手順

本研究では、NTT ドコモから発売されている 携帯電話 6 機種に関する Web ページを収集し、 各機種毎にマッピングを行った.収集する Web ページは、Google (http://www.google.co.jp/) で各 商品の型番(例:SO505iS)を検索キーワードとし、 検索結果としてリストアップされた上位 100 ペ ージの日本語ページを対象とした.図 3 に SO505iS に対して得られたマッピング結果を示 す.実装したシステムでは、プロットされた点 をクリックすると、その点に対応した Web ペー ジが別のウィンドウで表示できるようにしてい る.

なお,この実験における評価表現辞書には,収集した6機種合計600ページの中で出現頻度の高い52個の評価表現を登録した.ただし「大きい」などの一部評価表現は,「画面が大きい[Good]」、「持つサイズとしては大きい[Bad]」のようにどちらとも解釈できるため,除外した.また,評価表現辞書にGoodの名詞句として「対応」「可能」「搭載」の3つを登録し,辞書中の登録表現数を55個としている.

#### 3.2 マッピング結果と定性的評価の比較

提案手法により得られたマッピング結果の妥当性を検討するため、6機種の各結果から、図2の特性4区分の各区分から無作為に2、3ページずつ抽出し、合計10ページをリストアップした.そのリストを大学生25人に閲覧してもらい、見るに値すると感じたWebページを各機種2ページずつ選んでもらった.さらに、6機種合計12ページを対象として、10ポイントを自由に振りわけてもらった.

図3の丸で囲まれている点は ,SO505iS に対して抽出した 10 ページである .図3 から A はリッチ部分にあてはまる Web ページであると考えら

れる 実験では、このページは19人に選択され、29 ポイントを獲得した.このページに配点した理由として A には SO505iS の詳細情報に加え、第三者による使い勝手の情報が掲載されていたため、と述べた被験者もおり、有益な情報を含むリッチな Web ページが適切に配置されているといえる.また、B は 14 人選択、17 ポイント、C は 8 人選択、3 ポイントであった.B は機種のスペックと注意点、C はスペックを詳細に紹介していた.また、D は 3 人選択 1 ポイント、E は6人選択 3 ポイントという結果であった.その他のページは選択されていなかった.これらの結果から、提案手法によりユーザが有用と感じるページをリッチエリアに配置できたことがわかる.

#### 4. おわりに

提案手法を用いることで、被験者が見る価値があるとして高いポイントを与えた Web ページを、適切に配置することができた、Web ページ内の評価表現に着目し、見る価値のある Web ページを容易に判定することが可能になるといえる。

本研究の課題として、評価表現辞書の構成において、抽出された用語の Good 表現と Bad 表現への割当を人為的に行ったことがあげられる. すなわち、評価表現辞書に登録する用語は、対象商品で多数用いられている用語を機械的に抽出したが、その用語がどのように用いられているのかを判別する方法を考案する必要がある.

#### 参考文献

- [1] 立石健二, 石黒義英, 福島俊一: インターネットからの評判情報検索, 情報処理学会研究報告, NL144-11, pp.75-82, 2001.
- [2] 高間康史, 田村美由紀: Web ページ作成者の 主観的評価推定のための特徴量に関する考 察, 第 19 回ファジィシステムシンポジウム, pp.851-852, 2003.
- [3] 松本裕治, 北内啓, 山下達雄, 平野善隆, 松田寛, 高岡一馬, 浅原正幸:日本語形態素解析システム『茶筌』version 2.3.3 使用説明書, http://chasen.aist-nara.ac.jp/chasen/doc/chasen-2.3.3-j.pdf, Aug, 2003.

# 連絡先

村田 忠彦

関西大学総合情報学部

〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1

Phone: 072-690-2429 Fax: 072-690-2491

E-mail: murata@res.kutc.kansai-u.ac.jp

# グラフマッチングを用いた視覚的類似性に基づく Web ページ検索

# Visual Similarity-based Web Page Retrieval with Using Graph Matching

# 高間 康史

三橋 憲晃

Yasufumi Takama

Noriaki Mitsuhashi

# \*東京都立科学技術大学

\*Tokyo Metropolitan Institute of Technology

**Abstract** A Comparison method of Web page in terms of visual similarity is proposed. Although conventional Web search engines only handle text information within the HTML files, Web page design is the most important factor for us to estimate individual pages. The method can compare the layouts of Web pages, based on image processing and graph matching. Experimental results show the method can retrieve the relevant pages in terms of visual similarity.

# 1 はじめに

現在主流の検索エンジンでは Web ページのソースファイルから抽出したテキスト情報を用いている.しかし,我々が実際に Web ページを見る際にはコンテンツだけではなく,画面上にどのように表示されるかにも影響を受けており,近年では InfoLead や Grokker2など,検索結果のサムネールをユーザに提示するシステムも増えつつある.また,SEO(サーチエンジン最適化) やアクセシビリティの指南書が普及した結果,同業サイトのトップページ,ポータルサイトではページデザインが共通化する傾向もある.しかし,ソースファイルのみから Web ページのレイアウトや表示された時の様子を解析するには限界がある.

我々は、Webページを画像として扱いデザインの類似度 (視覚的類似性) に基づき検索する手法について研究を進めている [2].本稿では、画像処理によりページ画像から抽出した領域をノードとみなし、グラフマッチングにより視覚的類似度を計算する手法を提案する、Webから収集したトップページを用いた評価実験の結果、レイアウト解析および検索精度の両方で良好な結果が得られることを示す。

# 2 Webページ比較手法

提案手法は,ブラウザで表示される Web ページ画像を入力とし,画像処理技術を用いて視覚的類似性を計算する.下記に処理手順を示し,主要部分について以降に述べる.ここで,1 から 3 までがレイアウト解析部に,4 が類似度計算部に相当する.4 について,ピクセ

ル単位で比較を行う手法をすでに提案しているが [2] , レイアウトにおいて重要な , 各領域の位置関係が考慮 されていなかった . そこで本研究ではグラフマッチン グを用いた類似度比較手法を提案する .

- 1. ページ画像を YCbCr 空間に変換する.
- 2. Y画像からエッジ検出を行う.
- 3. エッジ画像から閾値処理により文字や画像などの 領域に分割する.
- 4. 領域情報を用いてページ間類似度を計算する.

#### 2.1 ページ画像からのエッジ検出

Y 画像を 2 imes2 画素プロックに分割し,各画素  $p_{ij}$  (画素値  $x_{ij}$ ) 毎に  $lpha_{ij}=x_{ij}/X(p_{ij})$  を求める.ここで, $X(p_{ij})$  は  $p_{ij}$  を含むプロックの平均画素値である.

 $lpha_{ij}$  は隣接画素間の相関性の高さから 1.0 付近に集中する性質を利用し ,  $lpha_{ij}$  がある閾値を超える場合エッジ部と判定しエッジ検出を行う .

# 2.2 コンテンツ種別に基づく領域分割

エッジ検出画像を用いて,文字や画像がそれぞれ集まった領域を抽出する事により,Webページを構成するレイアウト要素に分割する手順を以下に示す.

- 1. エッジ間距離を閾値 a と比較し, 領域に分割する.
- 2. エッジの出現間隔に基づき,各領域のコンテンツ種別を判定する.

- 3. 同種のコンテンツを含む隣接領域を統合する.
- 4. サイズの小さい領域が隣接する場合は統合する.

閾値 a はあらかじめ定めておくが,あまり大きな値にせず,コンテンツ種別判定後の統合処理(3) に任せる.

コンテンツ種別の判定では,各領域に含まれる情報が文字,画像のどちらであるかを判定する.ラスター方向に検索をしていきエッジが検出されるピクセル列から検出されないピクセル列までを見つけ(図 1(a)),その範囲内で横方向に一定間隔でエッジが連続して出現する場合は文字コンテンツと判定する(図 1(b)). 不規則にエッジが出現したり,エッジが検出されないピクセル列がない場合には,画像コンテンツと判断する.

最後の統合処理 (4) は,次節で述べるグラフマッチング処理において計算時間を削減するために行う.



図 1: 文字列検出 (a) と文字判定 (b)

ていると判断したページを正答としている.これより,グラフマッチングによる比較手法 (手法 2) が従来手法 (手法 1) より有効であることがわかる.5 つのクエリページについて同様の実験を行った結果,提案手法では全正答発見時 (はじめて再現率 1.0 となる時) の平均適合率が 0.48 であり,テスト集合中に占める正答の割合 (平均 0.18) より十分高いことを確認した.



図 2: 領域分割画像

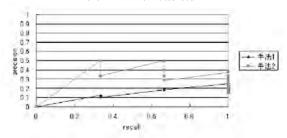


図 3: 適合率 再現率グラフ

# 2.3 グラフマッチングによる類似度計算

前節のレイアウト解析により, Web ページ画像はいくつかの領域に分割され,領域毎にコンテンツ種別,サイズ,位置などが記録される.また,コンテンツ種別は文字,画像,および混合の3種類とする1.

本稿では,レイアウト解析で抽出した領域をノードとみなして Web ページを 1 つのグラフと考え,A\*アルゴリズムを基にしたグラフマッチング法 [1] を用いて Web ページの比較を行う.

# 3 実験結果

図 2(a) に Web ページ (infoseek のトップページ) の原画像を , (b) に領域分割した結果を示す . 被験者アンケートによる評価を行った結果 , 領域分割の平均正答率が 91.6% , 属性も含めた平均正答率は 81.7%と良好な結果が得られている .

また,図2と視覚的に類似したページを検索した際の適合率-再現率グラフを図3に示す.ここで,被験者アンケートの結果,3名中2名以上が視覚的に類似し

# 4 おわりに

本稿では,グラフマッチングに基づき Web ページの 視覚的類似性を求める手法を提案した.評価実験の結果,レイアウト解析および検索精度の両面で良好な結果が得られた.本稿で提案する手法は,テキストを用いた従来検索技術とは異なる特徴に基づくものであり,両者を組み合わせることによってより効率的な検索の実現が期待できる.

# 参考文献

- [1] A. Hlaoui and S. Wang, "A new Algorithm for Inexact Graph Matching," 16th International Conference on Pattern Recognition, 2002.
- [2] N. Mitsuhashi, T. Yamaguchi, Y. Takama, "Layout Analysis for Calculation of Web Page Similarity as Image," International Symposium on Advanced Inteligent Systems, pp.142-145, 2003.

### [問い合わせ先]

〒 191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6 都立科学技術大学 高間 康史

Tel/Fax: 042-585-8629

E-mail: ytakama@cc.tmit.ac.jp

<sup>1</sup> 領域統合処理などのため,画像と文字の両方を含む領域(混合) も存在する.

# 長期記憶のモデルを内蔵した単語推測可能な検索エンジン

# A Search Engine to Guess Words Based on Long-Term Memory Model

石橋 洋一

横井 博一

ISHIBASHI Yoichi

YOKOI Hirokazu

九州工業大学大学院 生命体工学研究科

Graduate School of Life Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract: A goal of this research is to realize a search engine that can guess the appropriate word as a human from the question. A current search engine finds out the homepage with the keywords that accord with input ones perfectly. If the appropriate word is not chosen, users cannot get to the homepage of the purpose. In case of a human, semantic memory in long-term memory is used to guess the appropriate word from input one. Therefore, the human long-term memory model must be based on a search engine. Semantic network model and characteristic comparison model have already proposed as long-term memory model. However, the experiment result of sentence verification cannot completely explained by only one of each model. Then the human long-term memory is modeled as this experiment result can completely explained. Furthermore, the proposed model is realized by using learning threshold elements. We examine effectiveness that a search engine contains this model to guess words.

# 1 はじめに

近年,インターネットの普及により,あらゆる情報をホームページより得ることが掲載が掲載で表った。そのため,ほしい情報が掲載発えしてきた.現在は検索者が単語を入力しことを検索者が単語を入力した完全一致型のものがほとんどできるが、とるるがものがは対率的にしかしながら,検索者がのおいてきる。でくよの時間を要したり,そこに行き着けないたび起こる.がたび起こる.

それに対し、人間から直接情報を得ようとした場合、その情報に直接結びついた単語を質問に用いなくても、それと意味的に近い単語であれば、目的の情報を得ることができる。なぜなら、質問を受けた人は、質問に含まれる単語から質問内容を推測するからである。このような推測は長期記憶内の意味記憶が使われる。したがって、得たい情報と直接結びついた単語をがある。そのためには、検索エンジンは人間の長期記憶のモデルを内蔵しなければならない。

長期記憶,特に意味記憶のモデルとしては意味ネットワークモデル[1]や特性比較モデル[2]などがすでに提案されている.これらのモデルは,それぞれを支持する実験結果が得られている.しかしながら,それら全てを一つのモデルで説明することはできない.そこで,筆者らは二つのモデルを携帯電話のメニュー選択システムを最適化するのに,二つのモデル両方を用い

た[3].本稿ではまず,二つのモデルを融合し, 一つのモデルで実験結果の全てを説明すること ができるように意味ネットワークモデルを改良 する.次に,改良した意味ネットワークモデル における概念と属性を学習しきい素子で実現し, これを単語推測のために検索エンジンに内蔵す ることの有効性を計算機シミュレーションによ って検証する.

# 2 長期記憶のモデル

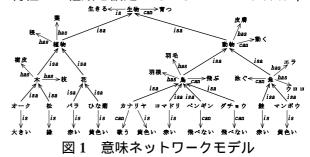
# 2.1 意味ネットワークモデル

意味ネットワークモデルでは,図1のように概念をノードとして配置し,それら概念同士を上位・下位関係リンクでつないでいる.また,一つの概念を特徴づける属性は,この概念とリンクで結びついている.

このモデルは,文の真偽判定実験の結果をほとんど説明することができる.しかし,「コウモリは鳥である」よりも「アリは鳥である」のほうが早く否定できることについては説明することができない.

# 2.2 特性比較モデル

特性比較モデルでは,意味記憶内の概念の意味は,一組の意味特性によって表現される.この特性として,概念の意味の基本的側面をなす定義的特性と,概念を記述する働きを持つ特徴的特性の二種類を仮定している.このモデルは,



意味ネットワークモデルで説明できなかった実験結果を説明できる.なぜなら,文の真偽判定において,まず特徴的特性を比較し,明らかに真偽を判断することができる場合には応答するが,真偽の判断に迷った場合にはさらに定義的特性を比較してから応答を出すからである.

しかし、「カナリアは鳥である」と「鳥はカナリアである」は両方とも真または偽という結果になり、意味ネットワークモデルで説明できることが逆にこのモデルでは説明できない.

# 2.3 改良型意味ネットワークモデル

本研究では改良型意味ネットワークモデルを 提案する.このモデルでは,特性比較モデル内 の概念の定義的特性と特徴的特性を,意味念が 同時に出現する頻度に基づいて,リンクに属性として追加する.二つの概念 度を新たに付与する.より多くの共通の属性を 持っている概念同士ほど,より多くのリンク 持って結びついている.連想頻度が高い概介 して結びついている.を持ったリンクを に付いている.その結果,リンクの結合 を基に概念同士の意味的 に概念同士の意味の を基に概念

# 3 単語推測可能な新しい検索エンジン

本研究では改良型意味ネットワークモデルを 実現するため学習しきい素子を用いる.図2の ように改良型意味ネットワークの各概念に基本 学習しきい素子を一つずつ割り当て,概念同士 の結合度を素子の結合荷重で表す.概念への刺 激は素子の入力端子に入力を入れることで表し、 活性度は出力である.一つの概念が刺激され活 性化すると、ネットワーク内のリンクに沿って 活性度が伝播し,近隣の概念も順次ある程度活 性化させる.このとき,概念同士の意味的距離 は活性度の差でわかり、最初に刺激された概念 に最も近い概念は最も活性化された概念である ことでわかる、ネットワークの複数概念同時に 活性化が起こった場合には、お互いに共通する 属性を介して連絡しあい、同時に活性化した状 態となる.

リンクの結合度は連想を促進させる関係だけではなく,連想を抑制する関係もあるする.そこで,結合荷重を正負の値を用いている.ある概念が他の概念に与える影響力には限界があると考え,素子の出力はシグモイド関数を用いている.学習しきい素子を用いたニューラルネットワークの汎化能力により,ある程度の入力情報の欠落や誤りに対する耐性を持つことが期待できる.

この連想システムは一つの概念から複数の概念 を推測することや,複数の概念から一つの概念 を推測することができる.つまり,単語で表記

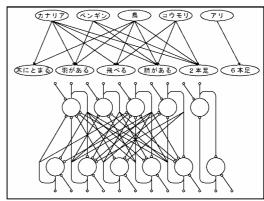


図2 改良型意味ネットワークとその実現できる概念の場合では、単語から単語を推測することができるということである。本研究ではこのシステムを使い、入力された単語から意味的な距離が近い単語を一つもしくは複数推測させ、検索エンジンの検索単語にすることにする.

### 4 まとめ

本研究では人間に質問するような使い方の検索エンジンを実現するため,長期記憶内の意味記憶をモデル化し,そのモデルとして改良型意味ネットワークモデルを提案した.さらに,このモデルを学習しきい素子を用いて単語推測するシステムの実現方法を示した.そのシステムに検索単語を推測させることにより,検索者が入力した単語に欠落や誤りがあっても目的のホームページに効果的に行き着くことができる検索エンジンについて述べた.

# 参考文献

- [1] Quillian, M. R., "Semantic Memory," Semantic Information Processing, MIT Press, pp. 216-270, 1968.
- [2] Collins, A. M., Quillian, M. R., "Retrieval time from semantic memory," Verbal Learning Verbal Behavior, Vol. 8, pp. 240-248, 1969.
- [3] 石橋洋一,横井博一,"長期記憶のモデルを 用いた使い易いメニュー選択システム"電 子情報通信学会技術報告書, Vol. 103, No. 465, NC2003-71, pp. 1-6, 2003.

#### 連絡先:

石橋 洋一

九州工業大学大学院生命体工学研究科 〒808-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-4 Phone + Fax: 093-695-6045 E-mail:ishibashi-yohichi@edu.life.kyutech.ac.jp

#### 横井 博一

九州工業大学大学院生命体工学研究科 〒808-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-4 Phone + Fax: 093-695-6045 E-mail:yokoi@life.kyutech.ac.jp

# ファジィ推論を用いた WEB ページ検索結果の改善方法の提案 The Improvement of WEB Page Searching by Fuzzy Reasoning

城市 広大 三好 力 増山 博 笹間 俊彦 Hiroo Joichi Tsutomu Miyoshi Hiroshi Masuyama Toshihiko Sasama

鳥取大学 工学部 知能情報工学科
Department of Information and Knowledge Engineering,
Faculty Engineering, Tottori University

**Abstract:** Usually a search engine is used for homepage searching. Therefore, it is difficult to search required pages, since the pages of many fields are intermingled. In this paper, we proposed improvement method that required pages are automatically classified using the word information included in pages, and the word information to be used is acquired by fuzzy reasoning.

#### 1. はじめに

インターネット上の WEB ページ検索においては Google[1]などの検索エンジンを使用することが主流である。しかし入力する検索語(キーワード)によっては大量のページが検索結果として表示され、求めている情報が探しにくい状況が発生することがある。・ザーが入力した検索語を、ユーザーが入力した検索語をで使用している情報と全く別の分野で使用しているより検索結果には分野の異なるページが混在することになり、別の語を追加して絞り込み検索を行うなどのユーザーの負担が発生する。

そこで本研究では検索エンジンの検索結果であるページ群の単語情報を解析し、ファジィ推論により導出した代表単語をもとにベクトル空間法の適合度計算でページのグルーピングを行い、ユーザーに提示するシステムを考案した。一回の検索語入力でも検索結果のページ群が分野ごとに自動でグルーピングされるため、ユーザーの負担軽減に繋がる。

#### 2. システム概要

本研究で作成したシステムの概要を処理の 流れに沿って説明する。

#### 2.1 単語出現頻度計算

検索エンジンの検索結果から表示されたページのHTML ソースのタグ除去を行い、プレーンテキスト化する。次にプレーンテキストから形態素解析を用いて単語毎に分割し、各ページの単語出現頻度を計算する。さらに、「同様の単語を一定の割合で使用するページは同様の分野に属する」という仮定から、各単語を次元とし、出現頻度を値としたページの特徴ベクトルを作る。

#### 2.2 代表単語抽出

特徴ベクトルの次元となる単語がページでとに異なるため、全ページで共通のベクトとを作成する。この時、全ての単語を算がの元となる。このためページ分類のための「このでは、次元数が代表単語」をファジィ推論に各単語の使用はをを基準とする。代表単語は各単語のでは、「満遍などのでは、「満遍などのでは、「満遍などのでは、「満遍などのでは、「満遍などのでは、「満遍などのでは、「満遍などのででは、「満遍などのできる。ルールは以下の3つとする。

ルール1: IF  $T_i$  AND SM THEN SM ルール2: IF  $T_i$  AND MD THEN BG ルール3: IF  $T_i$  AND BG THEN MD  $T_i$  は前述の単語iの使用されやすさのファジィ値、SM,MD,BG は図 2 で示すメンバーシップ関数である。

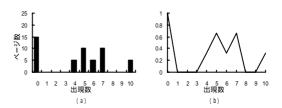


図1 単語の使用頻度表(a)とファジィ値(b)

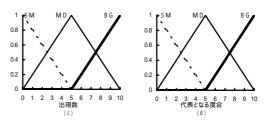


図2 前件部(c)と後件部(d)のメンバーシップ

#### 2.3 ページのグルーピング

選ばれた代表単語から、2.1で作成したページの特徴ベクトルを、各代表単語を次元とし、出現頻度を値としたページの特徴ベクトルPに変更する。また、代表単語それぞれの特徴を示すために、各代表単語を次元とし、共起出現頻度を値とした代表単語の特徴ベクトルを作成する。

次に不必要なグループを減らすために、似た特徴ベクトルを持つ代表単語は同じグループと考え、統合する。統合はベクトル距離が一定値以下である場合に、片方の代表単語をもう一方の代表単語に追加し、互いの特徴ベクトルの平均を新しい特徴ベクトルとする。 てージの特徴ベクトル P とグループの特徴ベクトル G の例を図3に示す。

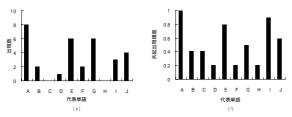


図3 特徴ベクトル P(e)とG(f)

ベクトル空間法により、グループの特徴ベクトルG ごとに各ページの特徴ベクトルP との適合度 g を計算する。計算式は以下の通りである。

$$g = \frac{\sum P \cdot G}{\sqrt{\sum P^2} \cdot \sqrt{\sum G^2}}$$

グループごとに適合度が高い順にページを 並べたものを結果として提示する。

# 3. 実験・結果・考察

考案したシステムを実現するプログラムを 作成し、いくつかの検索語について、Google が表示する検索結果の上位50ページをもと に実験を行った。検索語ごとの代表単語抽出 数と作成されたグループ総数を図4に示す。 また、グルーピングの例として検索語「ヒッキー」において、共起頻度の高い代表単語の 組み合わせがあったグループ名を図5に示す。

検索語	湖山池	仮面ライダー	ヒッキー
代表単語数	1 2 3	9 0	198
グループ数	6 9	6 9	7 9

図4 各検索語の代表単語数とグループ数

グループ1	人間,楽し,無い
グループ2	宇,多田,ヒカル,トップ
グループ3	月,映画,音楽
グループ4	写真,歌手

図5 検索語「ヒッキー」でのグループ名の一部

### 4. まとめ

本研究ではインターネットの WEB ページ 検索において、分野の異なる検索語の使用 ら生じる結果のページ群を解析し分類で見し、検索結果のページ群を解析し分類を考案した。結果から、検索語を見て分野で使用するページを別のグループ WEB て分類することを確認した。以上ァジモースージの検索結果とグルーピングで問題を ルによる単語抽出とグルーピングの問題を がであり、でさらに WEB ページ検索が容易と を本論文の結論とする。

#### 参考文献

[1] Google Japan (http://www.google.co.jp/)

#### 連絡先:

城市 広大

鳥取大学工学部知能情報工学科 〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101

Phone: 0857-31-5221

E-mail: joiti@ike.tottori-u.ac.jp

# Webにおけるファジィ検索に関する一考察

Some consideration of fuzzy retrieval on the Web

Motohide UMANO Takeaki MATSUO Mitsunori MATSUSHITA Kazuhisa SETA

# † 大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科

Department of Mathematics and Information Sciences, College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University

‡ 日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所 Communication Science Labs., NTT Corp.

**Abstract** We have proposed a technical method for manipulating fuzzy queries to ordinary databases on the Web. In this paper, we consider fuzzy retrieval on the Web from an aspect of interaction design, that is, usefulness, interface and treatment of membership function. We show our implementation for manipulating fuzzy queries to ordinary databases on the Web.

#### 1. はじめに

Web に関する技術の進歩と普及によって様々な データがインターネット上でやりとりされるように なった。また、組織内のネットワークにおいても、 Web システムを用いることにより便利かつ効率的 にデータがやりとりされている。その結果、ユー ザは Web 上でさまざまなデータに対して検索を行 いたいと考えるようになった[1]。その要求に応じ て、Web 上でデータ検索を行う技術が多く提案さ れ、実用化されている。しかし、通常の方法では ユーザの要求に応えることができない場合がある。 それは、"処理速度が速いパソコン"のように明確 な数値で表せない条件でデータを検索したい場合 である。Web 上でのデータ検索をユーザがさらに 活用するためにはこの問題の解決が不可欠であり、 解決方法の一つとしてファジィ理論が有効である と考えられている[2]。

しかし、従来の研究ではどのようにしてシステムを実現するかという面に重点が置かれており、どのようなインタラクションデザインを行えばユーザが抱える問題を解決できるかという視点からは、あまり議論されてこなかった。そこで、このような視点から問題を解釈し直し、ユーザの利用場面で有効なあいまい検索とはどのようなものかにつ

いて考える。

# 2. ファジィ検索の必要性

# 2.1 あいまいな検索

通常のシステムにおいてデータ検索を行う場合、問い合わせの条件として明確な数値や、文字列を用いる必要がある。しかし、検索したいデータに対するイメージは明確に定まっていないのがふつうである。データをしぼり込む前の段階では、具体的な検索条件として明確に指定できるはっきりとした要求をもっていないが、検索が進むにつれて要求が具体化され、やがては明確なことばや数値などで検索条件を指定することが可能となる。そして、ユーザが検索したいデータを具体化させる過程においては、あいまいなことばを用いた条件の指定ができる必要がある。

ことばが持っているあいまいさには少なくとも 二種類の異なったあいまいさが考えられる。一つ 目は、ある意味を表す表現として複数の候補があ げられるという表現のあいまいさである。二つ目 は、持っている意味の境界がはっきりしないとい うことば自身のあいまいさである。表現のあいま いさをデータ検索で用いる方法については、類義 語による検索が提案されており、実際に実用化さ れ Web 検索に利用されつつある。また、言葉自身のあいまいさをデータ検索で用いる方法についてはファジィ理論の応用が有効であると考えられており、一般的なデータベース検索については実用化されているものもある [2]。そして、Web システムへの応用も有効であると考えられる。

# 2.2 ファジィ検索が有効な場面

一般的なユーザがデータ検索を行うとき、ファジィ検索が有効である考えられる場面として次の ものがあげられる。

- (1) データに対して境界が明確でないグループを定義し、そのグループのラベルで検索を行いたいとき: これは我々が自然言語でコミュニケーションしていることを考えるとファジィ検索が最も有効となる場面である。データの具体的な数値ではなく、"寒い"などのあいまいな条件でデータ検索を行いたい場合がこれにあたる。
- (2) 検索結果に一致する順にデータを表示したいとき: 気温の場合に、"中くらい" という条件でデータ検索を行う場合、一般的な気温によるソートでは一致度順にデータを得られない。そして、これは検索条件が複雑になるほど効果的である。
- (3) 検索条件のイメージはあるが、具体的な値を知らないとき: たとえば、計算機の処理速度が"中くらい"のデータを検索したい時、検索を行うユーザはどれくらいの速さが"中くらい"なのかを知らないという状況が考えられる。このような場合には"中くらい"というキーワードでデータ検索を行えることはユーザに大きな使いやすさをもたらす。

ここで、(1) と (2) はデータのもっているあいまいさを扱うときであり、(3) はユーザがもっているあいまいさを扱うときである。

#### 2.3 ファジィ検索のインタフェース

実際にファジィ検索を行うことができるシステムを作成する場合、どのようなインタフェースを提供するかが重要である。その代表的なものとして次の3つがあげられる。

(1) ことばによる入力: この方式では、ユーザが任意 のことばを用いて検索条件を指定することが可能 である。そのため、最初はあいまいな条件を指定 し、検索が進んでからは明確な数値や文字列を検 索条件として指定することができ、データがもっているあいまいさとユーザがもっているあいまい さの両方を扱うことが可能である。一見、この方

式が最も適したインタフェースであるように思えるが、この方式ではユーザが入力できる内容の自由度が高すぎるため、場合によってはユーザ自身が何を入力すれば良いのかが分かりにくいという状況が考えられる。また、検索システムを提供する側にとっても、複雑な処理が必要となり、指定されるすべての検索条件に適切に対応することは難しい。

- (2) プルダウンメニュー方式による選択: あらかじめ 決められている選択肢の中からユーザが最も近い と感じるものを選択すればよいので、ユーザの考え方と一致する選択肢がある場合や、ユーザが検索条件として何を指定すればよいのか全く見当が つかない場合に有効である。しかし、選択肢自体 はあらかじめシステムの提供者側によって定められているため、システムの提供者の想定外の検索をユーザは行うことができず要求の変化に対して柔軟に応えることは難しい。
- (3) グラフ上で領域を指定する: 属性を軸としたグラフを用いることによって、グラフィカルに検索条件を指定することができるためユーザがもっているあいまいさを表現しやすい。この方式は、属性の値に順序関係が存在しているときに適している。しかし、グラフを画面に表示することを考えると、2次元以上のグラフを扱うことは難しい。また、ユーザの要求が明確になったときには他のインタフェースと比べて不利である。

これらの特徴より、検索条件の指定は次の方法が良いと考えられる。ユーザにとって、入力方法ができるかぎり簡単である方が良く、また検索条件として指定できる範囲がある程度限定されている方が要求を収束させやすいと考えられる。そこで、属性の指定にはプルダウンメニュー方式が適している。検索条件の値については、ユーザの考えている検索条件を要求の明確さに応じてあいまいなものから明確な数値や文字列まで自由に指定できる柔軟性が必要である。そこで、検索条件の値については、ことばによって入力する方式が適している。

# 2.4 メンバシップ関数の扱い方

ファジィ集合のメンバシップ関数の定義は個人によって異なる上に、同じユーザであっても状況によって異なっているので、メンバシップ関数を どのように扱うかは非常に重要である。 メンバシップ関数は、一般的なメンバシップ関数を定義しておき、それとは別にそれぞれのユーザと状況に応じたメンバシップ関数も定義できる必要がある。ユーザの識別は簡単に実現することが可能であるが、状況の識別はユーザ自身も十分認識していないので非常に難しい問題である。

そして、このメンバシップ関数を用いて検索した結果がユーザの思っていたものとずれている場合にはメンバシップ関数をチューニングできる必要がある。方法としては、メンバシップ関数をグラフとして表示し、それをグラフィカルに変更する方法と、検索結果がユーザが思っていたもので更する方法が考えられる。ユーザがメンバシップ関数をどのように修正したいかの方向性をもってプリる場合にはグラフィカルに行う方法が良く、検索結果に満足していないがどのようにメンバシップ関数を修正すれば良いのかが分からない場合には検索結果の評価を利用した方法が良いと考えられる。

また、複数の検索条件が指定されたときに、その指定された検索条件間に依存関係があるかどうかをシステムが解決できる必要がある。具体的には、"今年"の"速い"パソコンと"3年前"の"速い"パソコンは同じ"速い"ということばでも持っている内容は異なっているので、別のメンバシップ関数を用いることができる必要がある。

そして、これらのメンバシップ関数をサーバ側とクライアント側のどちらで保持するかについては、ある単一のサイトにおけるデータ検索を考えるならば、どのクライアントから使用しても同じ結果が得られるため、サーバ側で保持する方が良い。しかし、どのサイトへアクセスしたときにもチューニングされたユーザ独自のメンバシップ関数を利用したい場合には、クライアント側で保持する方が良いが、全体として矛盾なく複数のサイトに反映させることは難しい。

#### 3. 作成したシステム

ここまでの議論をふまえ、試作したシステムに ついて述べる。

### 3.1 システムの概要

Web においてファジィ検索を行えるシステムを 作成する時、次の条件を満たしている方が好まし ll.

- (1) 従来型のデータベースシステムを用いることができる: 一般に使用されているデータベースシステムを用いることが可能であれば、システムの提供者のニーズに一致する機能を持った DBMS を利用することが可能となるとともに、すでに利用されているデータやアプリケーションに手を加える必要がない。
- (2) 従来型の検索が行える: データ検索を行うときの 状況やユーザの違いによって、ファジィ検索を行い たい場合と、従来型の検索を行いたい場合がある。

これらのことをふまえ、今回はデータベースを 用いるアプリケーション側にファジィ集合の処理を 行う機能を組み込み、データベースサーバでは一 般的なデータベースと同じ処理を行うシステムを 試作した[4][5]。具体的には次のような処理を行う。

(i) 検索条件を入力する。検索条件は属性をプル ダウンメニュー方式で選び、値をテキストボッ クスに入力する。具体的には図1のように入 力する。

検索	条件	ŧ				
条件:	目付 🕶	:	<b>▼</b> s	umi	mer	
条件2:	温度 🛨	:	<b>T</b> C	old		
条件3:	日付 💌	-	1			
	送信					

図 1: 検索画面

- (ii) ファジィ検索を行うアプリケーションは、入力された情報からデータベースに対する問い合わせを作成する。このとき、ファジィ集合が検索条件として指定された場合は、そのメンバシップ値が正の部分の区間を検索する。
- (iii) 作成された問い合わせをデータベースシステムに対して行い、データベースシステムから 結果を受け取る。

- (iv) 返ってきた検索結果に対してメンバシップ関数を適用し、それぞれのデータの検索条件との一致度を求める。このとき、複数の検索条件が指定されていれば、ファジィ集合における演算を用いてメンバシップ値を求める。そして、データをメンバシップ値で降順にソートする。
- (v) この結果を画面に表示することによって、 ユーザは指定した検索条件に一致すると思 われる順にデータを得ることが可能となる。 具体的には図2のように表示される。

検オ	(E) 編集(E) <b>特果</b>	2009	<u></u> / 12	** <u>*</u>	,,,,
щ	日付	天気	温度	雨量	
0. 86	2001-08-07	雲	20. 7	0. 5	
0. 64	2001-08-21	雨	21.8	68. 5	
0. 54	2001-08-12	雨	22. 3	10.0	
0. 5	2001-08-19	晴	22. 5	0.0	
0. 44	2001-08-18	雲	22. 8	6. 0	
0. 36	2001-08-08	雲	23. 2	0. 0	
0. 346	2001-08-31	雨	22. 6	16.0	
0. 308	2001-09-01	雨	23. 4	1.5	
0. 3	2001-07-28	雲	23. 5	0. 0	
0. 3	2001-08-06	晕	23. 5	1 0	

図 2: 検索画面

Web システムにおいては、処理をサーバ側で行う方が有利な場合と、クライアント側で行う方が有利である場合が考えられるが、このシステムでは上記の(ii)と(vi)の処理をどちらで行うことも可能である。

また、システムに検索条件間の依存関係を定義 しておくことにより、ある検索条件に応じて別の 検索条件が用いるメンバシップ関数を切り替える ことができる。

# 3.2 議論

今回のシステムではユーザとシステムの関係が十分考慮されているとは言えない。より自然言語に近い型で検索条件を指定したいと考えるユーザや、文字列や数値ではなくグラフィカルに検索条件を指定したいとユーザが考える状況もあると思われる。そこで、システムとしては推奨するインタフェースを提示するとともに、他のインタフェー

スについてもユーザが希望に応じて選択できる必要があると思われる。また、検索条件の値として 入力されたことばの扱い方と複数の検索条件が指定された時の検索条件間の依存関係を解決する方法の改良をおこなう必要がある。

#### 4. おわりに

本報告では、Webにおけるファジィ検索の必要性とどのような機能が求められるかを考察するとともに、試作したシステムについて述べた。今後は、このシステムのインタフェースがユーザにとって利用しやすいものであるかの検証を行う必要がある。また、どのようにすればユーザの意図をシステムが解釈することができるか、そしてどのようにすればユーザの意図に沿った形でメンバシップ関数を扱うことができるかについて議論を深める必要がある。

# 参考文献

- [1] C.J. Date: An Introduction to Databese Systems 6th edition, Addison-Wesley, 1995 (藤原 譲 監訳, 原書 6版 データベースシステム概論, 丸善, 1997)
- [2] 日本ファジィ学会 編:ファジィ・データベースと 情報検索,講座ファジィ9,日刊工業新聞社,1993
- [3] 庄司 裕子, 森 幹彦, 松下 光範: "曖昧な思考を精緻化するためのインタラクションデザイン ― 揺らぐ情報要求に基づいてネット上の情報を取り扱うために ―", 知能と情報, Vol. 15, No. 5, pp. 515–524, 2003
- [4] 馬野 元秀、松尾 岳明、瀬田 和久、岡田 真 : "データベースに対するウェブからのファジィ検索"、第 18 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、pp.29–32、2002
- [5] 馬野 元秀, 松尾 岳明, 瀬田 和久, 岡田 真, 宇野 裕之: "データベースに対するウェブからのファジィ検索 (その 2) ―ファジィ集合の処理をブラウザ上で行う場合―", 第 19 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.631-634, 2003

# [問い合わせ先]

₹599-8531

堺市学園町 1-1

大阪府立大学 総合科学部 数理・情報科学科 馬野 元秀

TEL: 072–254–9675 FAX: 072–254–9930

E-mail: umano@mi.cias.osakafu-u.ac.jp

# 閲覧時間を考慮した閲覧履歴を用いたブラウザによる 再閲覧支援の有効性

# Efficiency of a Browser Using Browsing Duration in History to Support Revisitation

白戸 祥子 <sup>1)</sup> 村田 忠彦 <sup>2)</sup> 原田 一樹 <sup>3)</sup> 江澤 義典 <sup>2)</sup> Shoko Shirato Tadahiko Murata Kazuki Harada Yoshinori Ezawa

1) 関西大学大学院 Kansai University 2) 関西大学総合情報学部 Kansai University 3) 富士ゼロックス情報システム Fuji Xerox Information System

**Abstract:** This paper proposes the use of the history with browsing duration to support revisitation in web browsing. The longer browsing duration shows that the webpage is examined carefully. Thus, showing a list of pages with long browsing duration can be considered to support users to revisit attractive pages. In this study, we develop a browser using the history with browsing duration, and examine its efficiency to enhance browsing activity through experiments. Experimental results shows that the proposed browser reduces the rate of back button, and retrieving.

#### 1. はじめに

Web 情報の検索行動を支援するため、検索履歴の提示などが行われている[1]. Web 上から情報を検索する過程において、検索者が多数のページを比較検討した後に、有用だと判断したページを再閲覧するには、検索者の記憶をたどりながら閲覧したページ戻ることがしばしば行われる.本研究では、検索者の検索ページの有用性の判断が閲覧時間に関係していると仮定し、履歴リストを構成する情報として、閲覧回数や閲覧日時だけではなく、閲覧時間を含めた履歴の有効性を実験的に検証する.

# 2. 提案手法

原田[2]は,再閲覧を支援する目的で,閲覧回数,閲覧日時,閲覧時間を順に用いて,履歴リストを構成する方法を提案している.しかし,閲覧日時が同順位となる場合はほとんど発生せず,閲覧時間がリストの表示順位に影響していなかった.そこで,本研究では,閲覧時間が3つの特徴量の中で最も影響を与える「閲覧時間リスト」を次のように生成する.

- (1) 閲覧ページを閲覧時間の降順にソートする (閲覧時間の長いページがリストの上位に 表示される).
- (2) 閲覧時間が同順位の閲覧ページを閲覧回数 の降順にソートする(閲覧回数の多いペー ジがリストの上位に表示される).
- (3) 閲覧時間が同順位で閲覧回数が同順位の閲覧ページを最終閲覧時刻でソートする(最終閲覧時刻の近いページがリストの上位に表示される).

# 3. 効果検証実験

本研究では,図1のような実験ツールを用い, 閲覧時間を考慮した閲覧履歴リストによる再閲 覧支援の効果を,実験により検証する.

# 3.1 実験方法

「閲覧時刻リスト」のみを提示したブラウザでのブラウジング操作と、「閲覧時刻リスト」と「閲覧時間リスト」をともに提示したブラウザでのブラウジング操作の操作回数を比較し、検索者が入力した検索キーワードを記録する・実験に使用するブラウザに対する慣れ、課題の違いの影響、グループの違いの影響を排除し、「閲覧時間リスト」の効果を抽出するために、表 1のようなクロスオーバー法[3]の配置に従い実験を行う・

「閲覧時間リスト」の効果を確かめるため,被験者 14 名を同数の 2 つのグループ (グループ 1,グループ 2)に分割し,それぞれ異なる条件で 2 つの検索課題に取り組む検索実験を行った.表 1 に示すように,グループ 1 の被験者は,最初に「閲覧時刻リスト」のみを提示したブラウザで課題 1 に対する検索を行い,次に「閲覧時刻リスト」と「閲覧時間リスト」を提示したブ



図1 実験用ブラウザ

表 1 グループと課題による実測値(操作回数)

	課題 1	課題 2
グループ1	機能なし 11	機能あり <sub>12</sub>
グループ2	機能あり <sub>21</sub>	機能なし 22

表 2 操作回数の変化

	戻る	進む	リンク	時刻リスト	時間リスト	キーワード 検索回数	全操作回数
時刻リスト	24.8 回	0.5 回	46.1 回	8.4 🗖		5.4 回	87.2 💷
時刻リスト	28.4%	0.6%	52.9%	9.6%		6.2%	100.0%
	21.0 回	0.5 回	44.7 回	3.0 🗖	7.2 回	2.8 回	81.1 💷
時間リスト 	25.9%	0.6%	55.1%	3.7%	8.9%	3.4%	100.0%

表3効果パラメータ

戻る	全操作	キーワード	同一キーワード
	回数	検索回数	による検索回数
0.882	0.946	0.502	0.333

ラウザで課題 2 に対する検索を行った.一方,グループ 2 の被験者は,最初に「閲覧時刻リスト」と「閲覧時間リスト」を提示したブラウザで課題 1 に対する検索を行い,次に「閲覧時刻リスト」のみを提示したブラウザで課題 2 に対する検索を行った.なお,実験時間は 15 分とした.

ここで、抽出したい機能の効果を , 慣れ・課題差の影響を , グループの影響を , 観測誤差率を とし、これらの影響がない場合の値を  $\mu$ とすると、実測値 c は、次式のように得られると仮定できる[3].

$$c = \mu \times \times \times \times$$
 (1)

表1の実測値から,抽出したい機能の効果を以下のように求めることができる.

$$= \sqrt{\begin{array}{ccc} 12 & 21 \\ & & \\ &$$

を求めることにより,グループ2の被験者が 観測したい機能のないブラウザによる値μに対 する比を求めることができる.ここで, ≤1, 1< は,機能を用いることにより,測定値を減 少または増加させる効果があることを意味する.

### 3.2 実験

本研究では,多数のページを比較検討し,より有用な情報を探そうとする検索行動を観測できるような検索課題と実験時間を設定した.被験者は,日常的にコンピュータを使っている総合情報学部の学生14名である.課題1を「Linuxのインストール方法」,課題2を「分割コンパイルの行い方」とし,実験時間は15分間とした.

表 2 に 、「閲覧時刻リスト」のみを提示したブラウザを用いた場合と「閲覧時刻リスト」と「閲覧時間リスト」をともに提示したブラウザを用いた場合の平均操作回数と全操作回数に対する各操作回数の割合を示す.表 2 の結果から、「閲

覧時間リスト」を加えたことにより、「戻る」ボタンの操作回数の割合の減少と、リンクをクリックした回数の割合の増加が観測できる.これは、「閲覧時間リスト」によって、一度閲覧したページへの後戻りを減少させ、新しいページへと深く検索させる効果があったと考えられる.

表 3 に , クロスオーバー法によって求めた効果パラメータ の値を示す . 表 3 から ,「閲覧時間リスト」により ,「戻る」操作に対する の値は 0.882 となり ,操作回数を 11.8%減少させる効果があったことがわかる . また , キーワード検索回数に対する の値から ,新たにキーワードを入力し直して再検索をする回数を半減したことがわかる . さらに ,同一のキーワードによる再検索操作に対する の値は 0.333 となり ,同じキーワードの組合せによる再検索をした割合を約 70%減少させる効果があったことを示している .

#### 4. おわりに

表3の全操作回数に対する効果パラメータの値からわかるように,全操作回数はあまり減少していない.このことから,提案手法により「戻る」操作や「再検索」操作を減少させ,再閲覧の効率化を図ることにより,未訪問の課題関連ページを新規に閲覧できたと考えられる.

#### 参考文献

- [1] Kaasten, S., Greenberg, S.: Integrating back, history and bookmarks in web browsers, Extended abst. of ACM Conf. of Human Factors in Computing Systems, pp.379-380, 2001.
- [2] 原田一樹: Web 検索履歴を用いたブラウジン グ支援ツールの構築, 関西大学大学院総合 情報学研究科修士論文, 2003.
- [3] 高橋行雄: SAS による実験データの解析, 東京大学出版会, pp.129-146, 1989.

# 連絡先:

村田 忠彦 関西大学総合情報学部 〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1

Phone: 072-690-2429 Fax: 072-690-2491

E-mail: murata@res.kutc.kansai-u.ac.jp

# スパースコーディングモデルと語の関連性を用いた文脈依存型概念表現

# Concept representation dependent on context using sparse cording model and relevance between words

関矢 浩史 Hiroshi Sekiya

近藤 健 Takeshi Kondo

高木 友博 Tomohiro Takagi

明治大学 理工学部 情報科学科 Department of Computer Science, Meiji University

**Abstract:** Term's meaning changes dynamically by each context and this is an important problem for text processing based on term's label. In this paper, we propose a concept representation model dependent on context. The proposed model use relevance between document and word. This relevance is calculated from term frequency, inverse document frequency, and mutual information. We built the concept structure on sparse cording model which is used for information representation in human brain. Our proposed approach's utility and capability is discussed from verification results.

#### 1 . はじめに

現在の検索エンジンを始めとするテキスト処理の 分野では, キーワードマッチングのような単語のラ ベルに基づいた手法が主流である.しかし,単語の ラベルと概念とは多対多の関係にあり、その出現す る文脈によって単語が表現している概念はダイナミ ックに変化するものである. そのため, そのような 表面的な手法では正しく概念を表現することは困難 である. 本来であれば, 文書と検索語の概念的な近 さを考慮していかなければならないと考えられる.

そこで本研究では,文書と単語の関連性に基づい て、文脈依存型の概念表現を行うモデルを提案する. モデルの実装には,人間の脳内でも情報表現に用い られていると考えられているスパースコーディング モデル[1]を用いた.

#### 提案手法 2 .

# 2.1.文書と語の関連性

単語の意味する概念は,その出現する文脈によっ て変化する.これを言い換えると,文脈と単語の組 み合わせによって,ある概念を表現することが出来 るということになる.そこで本研究では,文書をあ るひとつの文脈と捉えることで,文書と単語の関連 度を定義し、それを基に概念を表現することとした.

具体的には , 文書ごとに TF-IDF 値の高い単語を 抽出し,その単語と文書の間には関連があるとみな す[2]. そして,この関連付けを多くの文書に対して 行うことで単語と文書の関連を表現する.

この関連度には相互情報量 I(x, y) を用いた[3].

$$I(x, y) = p(x, y) \log \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)}$$
 (1)

ここで、それぞれの単語と文書は、以下に示すス パースコーディングによってニューロンの組み合わ せで表現されるため , p(x) は単語層のニューロン x が関連を持つ文書層のニューロン数 , p(y) は文 書層のニューロン y が関連を持つ単語層のニュー

ロン数 , p(x,y) は単語層のニューロン x と文書層 のニューロン y の関連の有無をそれぞれネットワ ークのリンク数で除したものを表している.

多くの文書と関連がある単語は文脈の判断という 意味では価値が少ないが,相互情報量を用いること で、このような単語は関連度が下がることになる、

# 2.2.スパースコーディング

脳において、ひとつの情報はひとつのニューロン で表現されているのではなく、いくつかのスパース なニューロン群で表現されていると言われている.

スパースコーディングでは,表現出来るパターン 数 $_N C_M$ が,全体のニューロン数Nと比べて極めて 膨大な数となる、また、この表現手法は特にテキス ト情報に限られたものではないため、将来的な有用 性も高いと考えられる.

具体的には、ある情報に対して全体のニューロン からランダムにM個のニューロンを選び出して表 現するということとなる.

本研究では,情報は単語と文書の2種類であり, それぞれに対して独立に記憶するための層を設けた.

#### 3 . 実験システム

### 3.1.システム概要

システムの全体の構成(図.1)は,単語を記憶す る層,文書を記憶する層,層の間を繋ぐネットワー クで構成されている.

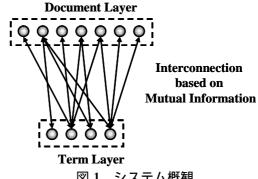


図.1 システム概観

単語と文書はそれぞれの層においてスパースコーディングされており、ネットワークの結合の強さは 0/1、つまり結合の有無の情報のみを保持している (活性値伝播時にはこの結合情報から相互情報量を逐次計算することになる).このことにより、ネットワークのサイズに対してメモリのサイズを大幅に減少させることが可能となる.

# 3.2.学習

学習時の処理の流れは以下のようになる.

- 1) コーパスの全文書 ,全単語について TF-IDF 値 を計算する .
- 2) 各文書において TF-IDF 値の高い単語をそれ ぞれ抜き出す.
- 3) 単語と文書をニューロン表現に変換し ,ニューロン間に結合を形成する.

# 3.3.検証

検証時の処理の流れは以下のようになる.

- 1) 単語または単語の組をニューロン群の表現に変換した上で単語層に入力する.
- 2) ニューロン間の結合から相互情報量を計算し, 文書層のニューロンへ活性値の伝播を行う.
- 3) 文書層では文脈の絞込みを行うために活性値の高い上位のニューロンを選び出す.
- 4) 再びニューロン間の結合から相互情報量を計算し、選び出したニューロンから単語層のニューロンへ活性値の伝播を行う。
- 5) 単語層のニューロンの活性値分布から単語の活性値に変換する.

#### 4. 実験結果

# 4.1.学習データ

学習には Reuters のニュース記事 1 年分(約81万文書)を用いた.

## 4.2.入力·出力結果

ここでは,本研究で実現を目指した文脈依存型の概念が形成されていることを検証するために,単語が単体で用いられた場合の一般的な意味とそこに文脈情報が加わった場合の意味の変化について,入出力データを基に例証する.

入力は , 「child 」 , 「seat 」 , 「child 」 + 「seat 」 の 3 パターンを行い , 結果として出力された単語は以下のようになった .

"child"				
child	1.42E-05			
police	3.69E-06			
girl	2.74E-06			
budget	2.61E-06			
bond	2.59E-06			

表 1.1 「child」の場合

"seat"			
seat	1.47E-05		
party	5.48E-06		
election	4.51E-06		
candidate	3.29E-06		
democrats	3.17E-06		

表 1.2 「seat」の場合

"child" + "seat"		
seat	1.42E-05	
child	1.37E-05	
safety	4.29E-06	
adult	4.16E-06	
bag	3.83E-06	

表 1.3 「child」+「seat」の場合

結果を見ると、「child」が単体で入力された場合と、「seat」と共に入力された場合とでは結果が全く異なっていることが分かる.また、「seat」が単体で入力された場合の結果からも「child」と「seat」双方の出力値の合計のようなものではないことも分かる.よって、提案手法は単語の組み合わせから正しい文脈を選択し、概念表現を行うことが出来ていると考えられる.

# 5. まとめ

本研究では,文書と語の関連に基づいて概念表現を行う手法を提案した.また,簡単な例を用いた実験により,出現する文脈によって変化する単語の持つ概念を表現できていることを示した.

今後の課題としては,より客観的な指標に基づく 評価の必要性が挙げられる.

# 参考文献

[1] R. Hecht-Nielsen, T. McKenna: Computational Models for Neuroscience, Springer, (2003)

[2] 北 研二, 津田 和彦, 獅々堀 正幹:情報検索アルゴリズム, 共立出版, (2002)

[3] 北 研二:確率的言語モデル,東京大学出版会, (1999)

#### 連絡先:

**〒214-8571** 

神奈川県 川崎市 多摩区 東三田 1-1-1 明治大学 理工学部 情報科学科

関矢 浩史

TEL: 044-934-7469 FAX: 044-934-7912

E-MAIL: sekiya@cs.meiji.ac.jp

# 不可視情報を利用した実環境とのインタラクション An Interaction Method on Real Environments Using **Invisible Information**

白井 良成 松下 光節 大黒

Yoshinari Shirai Mitsunori Matsushita Takeshi Ohguro

日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所

NTT Communication Science Labs, NTT Corporation

Abstract Activities of information gathering in real environments are classified broadly into Browsing and Retrieval. Ubiquitous systems that enhance the real environment should support the efficient gathering of information by employing an adequate method to convey information based on each activity. In this paper, we introduce a system, called HIEI projector, that fulfills these requirements. HIEI projector achieves efficient information convection by the system projecting adequate information for Browsing by visible light while it projects detailed information itself or pointers for detailed information by infrared light.

#### はじめに 1

近年の情報検索技術や情報抽出技術の飛躍的な性能 向上により、ユーザは日々増加の一途を辿る Web ペー ジの中から自らの興味や関心を満足させる情報を容易 に得られるようになって来ている. そのため、日常生 活の中で生じる疑問の解消や関連する情報の収集など 様々な場面で Web 検索が利用されている. 例えば, 珍 しい草花や店先に並ぶガジェットを見たときに、Web ページを検索することで、それらの名前や特徴、既購 入者の批評等を知ることができる.

Web ページを検索する際には、ユーザ自身が検索対 象の特徴や性質などをキーワードとして顕在化させ、 計算機に与える必要がある. そのため, 欲しい情報を 取得するためには、ユーザが適切なキーワードを想起 して計算機に与え、得られた検索結果集合の中から適 当なものを吟味しなければならない. これは、検索対 象の特徴や性質が表現しにくかったり、キーワードが 多義的であったりする場合には相当な負担になる. 日 常生活の様々な局面で発生する情報欲求を満たすため には、このような適切なキーワードの選択に関する問 題を解消する必要がある.

この問題点を解決する一つの手段として、情報を実 環境の場所や物等に関連付けておくことで、その場で 欲しい情報にすばやくアクセスするという方法が検討 されている. 例えば、中島らは、グラウンディングとい う言葉を用いて、デジタルな情報と実世界との結びつ

ジに付与された時空間メタ情報を利用した検索に関す る研究も進められている[2]. このように実世界の"そ の場"で情報が閲覧できるようになれば、ユーザは、よ り素早く、より容易に、必要とする情報を捜し出す事 ができるようになるだろう.

このような情報アクセスを実現するため、我々はユー ザが情報を取得しやすい実環境のデザインを試みてい る. その際, 実生活の様々な局面における必要な情報 のすばやい閲覧を可能とするためには、デジタルな情 報の実環境との関連付け方法だけでなく、関連付けた 情報のユーザに対する伝達方法も考える必要がある. そこで、本稿では、人が実環境内で自然に行なってい る情報取得行動に適した情報伝達方法について考察す る. これらの考察に基づきデザインしたシステムとし て「秘映プロジェクタ」を紹介する.

#### 人に優しい情報環境のデザイン $\mathbf{2}$

#### 実環境における人の情報取得行動

情報検索の分野では、人の情報取得行動は Browsing と Retrieval の二種類に分類される [3]. Browsing は欲 しい情報が明確でない状態の時に行なう行為であり、 Retrieval は欲しい情報が明確になった時に行なう行為 である. 人はこれらを状況に応じて切り替えることで、 情報を効率的に取得している(図1). 実際,我々はネッ トワーク上の情報を取得する際に、検索エンジンを用 けの必要性を述べている [1]. また、実際に Web ペー いた Retrieval とリンクをたどることによる Browsing

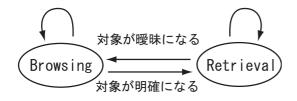


図 1: 情報取得行動の遷移

を組み合わせながら情報を取得することが多い.

これを実環境で行なわれる我々の活動に当てはめると、意識が散漫な状態でいるときは、環境内の配置されたさまざまな情報を Browse している状態であり、ある物に興味を持ちその詳細を知ろうとする行為は、特定の情報を Retrieve している状態である。我々は状況に応じてこの 2 種類の情報取得行動から適切な行為を選択していると云えよう。例えば、道を歩きながら無意識に環境内の情報を見ている状態 (Browsing) で珍しい草花や面白そうなガジェットを見つけると、人は見つけた対象物に意識を向け、いろいろな角度から眺めたり触ったりしながら観察をする (Retrieval)。即ち、散見によって欲しい情報が明確になると Browsing から Retrieval へのモードの遷移が起こり、一方、目的とする情報を一通り得たり、対象に対する興味が薄れると Retrieval から Browsing 状態への移行が起こる.

コンピュータディスプレイ上でネットワーク上の情報を取得する際の Browsing は、注視を前提としたディスプレイの特性上意識的な Browsing にのみ焦点が当てられていたが、実環境中で人は視界に入る情報のBrowsing を無意識的に行なっている。そのため、実環境に関連付けられた情報をその場で伝達するためには、実環境における Browsing と Retrieval という 2 種類のモード、及びモード間の遷移を考慮した方法で情報を伝達し、効率的な情報取得を支援すべきである。

# 2.2 人の情報取得行動に適した情報提示手 法

現在実環境で用いられている携帯電話に代表される 携帯端末は、ユーザが画面を注視し、能動的にボタンを 操作しながら情報を閲覧するデバイスである。そのため Retrieval モードにおける情報取得行動を満たしてい るといえる。しかしながら、実環境における Browsing に適した情報提示は困難である。第一に Browsing モー ドでは、人は情報を意識的に欲求しているわけではな いため、特定のデバイスの能動的な操作を期待することができない。しかし、携帯端末は基本的にユーザが利用するときに取り出して使うデバイスであり、能動的な動作を必要とする。第二にBrowseing モードにおける無意識的な情報の比較を可能とするためには、実環境とデジタル情報の関係性を直感的に伝達する必要がある。しかし、携帯電話の画面は現実世界と区切られているため実環境と情報の関係性を直感的に伝達することが難しく、さらにディスプレイが小さく比較しながら探索するという用途には向いていない。

実環境における Browsing を実現するために携帯端 末が抱えるこれらの問題点を解消するためには、ユー ザの能動的な動作を必要とせず、且つ実環境との関係 性を直感的に示すことができるデバイスが望まれる. そこで、我々はこれらの要件を満たすデバイスとして プロジェクタに着目した. プロジェクタを用いて実環 境に情報を投影することで、人が能動的に何らかの操 作をすることなしにその場にいる人に対し情報が見え ている状態を作り出すことができる. また, 実環境に重 ね合わせて情報を投影することができるため、実環境 とデジタル情報の関係性を直感的に掴むことができる. しかし、Browsing モードにはプロジェクタ、Retrieval モードには携帯端末という異なるデバイスを用いた場 合, ユーザのモード切り替えに応じたすばやいデバイ ス間の連携が必要となる. そこで, 次章ではユーザの モードの切り替えに応じてシームレスに提示方法を変 更可能な技術として「秘映プロジェクタ」を紹介する.

# 3 秘映プロジェクタ

# 3.1 システム概要

秘映プロジェクタは、可視光と非可視光 (赤外光) を同時に投光可能なプロジェクタである [4]. プロジェクタでこれまで活用されていなかった赤外の波長を利用することで、非可視波長を利用したアノテーションや、携帯端末との連携を可能とする不可視マーカの投影などが可能となる. 赤外光で投影された映像は、赤外線カメラ等を通して見ることができる. プロジェクタから発せられる可視光と赤外光の波長の切り分けを正確に行なうことで、可視光で投影した映像に対して、赤外光で異なる映像を重ねて投影しても赤外線カメラを用いて読み取ることができる.

に適した情報提示は困難である.第一に Browsing モー 秘映プロジェクタと携帯端末を用いることで,実環ドでは,人は情報を意識的に欲求しているわけではな 境で行なわれている Browsing と Retrieval という 2 種



図 2: マーカに対応した Web ページの提示 (左上: 可 視画像,右上:赤外画像,下:携帯端末を翳してホーム ページを閲覧している様子)

類の情報取得モード, 及びモード間の連携を支援する ことが可能である. Browsing モードのユーザに対し ては、秘映プロジェクタを用いて、可視光で Browsing に必要な情報を実環境と重ね合わせて提示することが できる. また、携帯端末と連携するための情報を可視 光で投影した情報に重ねて赤外光で投影しておくこと で、実環境に提示された情報の中から欲しい情報を見 出したユーザ (Browsing から Retrieval モードへ遷移) は、煩雑な操作に悩まされることなく、携帯端末を翳 すという簡単な動作でシームレスに Retrieval モード に適したデバイスである携帯端末に移行することがで きる. そして、Retrieval モードのユーザは、携帯端末 を能動的に操作しながら詳細な情報を自由に閲覧する ことができる.

我々は、2種類の方法で、携帯端末を翳すことによる 情報の引き出しを実現している. IR アノテーション は、赤外光を用いて実環境に直接情報を重ね合わせて 投影し、赤外線カメラを通して見る方式である. 一方、 IR マーカは、赤外光を用いて実環境にマーカを投影し、 赤外線カメラでマーカを読み取り、マーカに対応する 情報を携帯端末上に提示する方式である. IR アノテー ションは実環境との重ね合わせが容易であるが、実環 境に直接情報を提示するため提示環境の物理的制約を 受ける. 一方 IR マーカ方式は実環境に重ねて情報を 提示するためには、マーカのカメラに対する相対的な



図 3: IR アノテーション例 (下は赤外線フィルタを通 して撮影した画像)

けないため、提示する情報の自由度は高いと言える.

#### 3.2 掲示板に対する適用

我々は秘映プロジェクタを用いて掲示板を拡張する システムを作成している. 掲示板に貼られている掲示 物は基本的に静的なオブジェクトであり、情報が更新 されることがないが、これらの掲示物に対してネット ワーク上の動的な情報を付与しようというものである. 例えば、国際会議などの Web ページは、会議の日が近 づくにつれ徐々に更新されていくが、掲示板に貼られ た掲示物にはこれらの情報は反映されない. このよう な掲示物に対して、会議のホームページや、会議が行 なわれるホテルの予約状況のページ等を関連付けてお き、関連付けられたページの種類をアイコンとして秘 映プロジェクタを用いて掲示物のそばに投影しておく ことで、ユーザの Browsing を支援することができる. アイコンには、WebページのURLがエンコードされ た IR マーカが重ねて投影されており、掲示物と掲示 物のそばに提示されたページのアイコンを見て興味を 持ったユーザは、携帯端末を翳してすばやく Web ペー ジを閲覧することができる(図2). また、会議の宿泊 位置計算が必要であるが、提示環境の物理的制約を受 及び飛行機の予約情報は、図3のように、IR アノテー

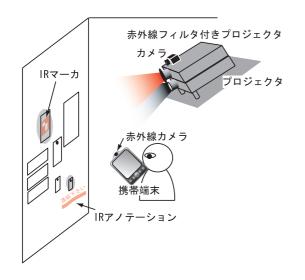


図 4: システム構成

ションを用いて直接実環境に投影されており、携帯端 末を通して閲覧することが可能である. 提示した情報 は会議日程を過ぎると不要となるが、情報をプロジェ クタで投影している利点を生かし、期間を過ぎたら自 動的に情報を消去したり、異なる情報に変える等、動 的に提示情報を変化させることが可能である.

システム構成を図4に示す. 秘映プロジェクタは,可 視光投光用の液晶プロジェクタと赤外光投光用の DLP プロジェクタの2台を用いることで実現した. 実装の 詳細については文献 [4] を参照されたい.

#### 関連研究 4

Wisneski らは、人が無意識のうちに情報を処理でき るという特徴に着目し、認知の周縁に対して情報の提示 することで情報の気配を伝達するメディアとして Ambient Display を提案している [5]. 幾つかの Ambient Display を具現化した作品では、認知の周縁に対する情 報の提示にプロジェクタが用いられており、プロジェク タを用いて無意識に処理可能な情報を投影するという 点で我々のアプローチと共通している. 我々はさらに、 無意識の Browsing によって、欲しい情報が意識された 後の行動も含めた実環境における情報取得方法をデザ インしている、渡邊らは、日々たまるメモを常時環境 中のディスプレイに対して提示することで、操作せず に情報を Browse 可能なシステムとして Memorium[6] を提案している、渡邊らのシステムは、気になったメ モの詳細情報を閲覧することも可能であり、Browsing と Retrieval の双方を具現化システムと言える. 本研究 では、情報と実環境との関連性を重視し、実環境に対 E-mail: way@cslab.kecl.ntt.co.jp

する直接的な情報の提示を行った.

#### おわりに 5

本稿では、その場で必要な情報を自然に取得可能な 環境のデザインを目指し、人が実環境で行う情報取得 行動に適した情報伝達方法について考察した.また, 考察に基づきデザインしたシステムとして「秘映プロ ジェクタ」を紹介した. 今後、システムの有効性につ いて検証していくと共に、実環境における情報取得の 在り方について考察を進めていく予定である.

# 参考文献

- [1] 中島秀之他: 情報インフラに基づくグラウンディ ングとその応用 - サイバーアシストプロジェクト の 概要 - , コンピュータソフトウェア, Vol. 18, No. 4, pp.48-56, 2001.
- [2] 平松 薫, 赤埴 淳一, 佐藤 哲司: 時空間構造に基づ く Web 検索の拡張、人工知能学会 セマンティッ クウェブとオントロジー研究会, 2002.
- [3] Ricardo Baeza-Yates and Berthier Ribeiro-Neto: Modern Information Retrieval, ADDISON-WESLEY, 1999.
- [4] 白井良成, 松下光範, 大黒毅: 秘映プロジェクタ: 不 可視情報による実環境の拡張、WISS2003, pp.115-122, 2003.
- [5] Wisneski, C., et al.: Ambient Displays: Turning Architectural Space into an Interface between People and Digtal Information, CoBuild'98, pp.22-32, 1998.
- [6] 渡邊恵太, 安村通晃: Memorium: 眺めるインタフ ェースの提案とその試作、WISS2002, pp.99-104, 2002.

# 連絡先:

白井 良成

日本電信電話(株)

NTT コミュニケーション科学基礎研究所 〒 619-0237 京都府相楽郡精華町光台 2-4

Phone: 0774-93-5261 Fax: 0774-93-5245

# 自己認知の変化とファジイ集合の模式的表示

# **Investigations of Change of Self-Recognition and Schematic**

# Representations of Fuzzy Sets

奥田裕紀 Hiroki Okuda 金城大学

Kinjo University

Abstract College student subjects were asked to draw positions of their own present and the future with circles on a paper. A disabled-persons set was printed in the center of the paper with a circle. Subjects were also asked to evaluate what degree they are regarded as people with a disability in the present and the future. Subjects were also ordered to answer with the numbers from 0 to 100 in these evaluations. Coefficient correlation between evaluation value and distance from the center of the disabled-persons-circle to the center of subject-circle was significant (p<0.01). Types of schematic representations of fuzzy sets were proposed. Applications and problems of schematic representations of fuzzy sets are discussed.

# はじめに

#### (1)あいまい性を持つ集合の模式的表示

ファジイ集合について知らない人に、ファジイ集合を説明する場合や、特定のメンバーシップ値を持つものを表示したり、複数のファジイ集合間の関係を示したりする場合など、ファジイ集合を模式的(視覚的)に表示することが有効だと思われる場合がある。

その際に、どのような模式的表示が適切であるのかは、その表示を用いる目的や、表示したいファジイ集合の特性などによって変化するであろうが、汎用的な模式的表示としては以下のような性質を持つことが望ましいであろう。

- (a)ファジイ集合について知らない(予備知識がない)人にもわかり易いこと
- (b)ファジイ集合についてよく知っている人に 認知されること(違和感などがないこと)

(c)様々な応用が可能なこと

# (2)メンバーシップ値と平面上の位置の関連

特定の集合に含まれる(含まれない)要素が 明確であるクリスプ集合の場合、集合を模式的 (視覚的)に示す際には、一般的にベン図が用 いられている。ベン図では、当該の集合に含ま れる要素はその集合を示す領域(円や長方形な どが用いられる)の内側に表示され、当該の集 合に含まれない要素はその領域の外側に表示さ れる。この領域の内(または外)であれば平面 上における位置関係には特別な意味はない(均 質である)

しかし、クリスプ集合とは異なり、ファジイ集合では、あるものが当該の集合に含まれている程度(メンバーシップ値)を示すことが求められる。その表示の方法には、様々なものが考えられよう。

例えば、ある集合を示す領域に対する特定の ものの位置関係が、そのものが当該の集合に属 する程度(メンバーシップ値)と関連する表現 を提案することも可能であろう。ただし、その ような表現が、一般的に理解され易いものであ るか否かについては、検討が求められよう。

そこで、本研究では、ファジイ集合論に関して特別な学習を行った経験のない被験者において、自分自身が特定の集合に属する程度の評価と、当該の集合に対する(被験者に認知された)自分自身の位置との関連について検討することとした。

本研究では、被験者自身が、その集合に属する程度と、被験者自身の相対的な位置を示すことを求める集合として、障害をもつ人全体の集合を選択した。このような集合を選択した理由の一つは、被験者自身が当該集合に属する程度が、評定を行う時点(現在と将来)で、変化する可能性が考えられたことであった(奥田、2001)。

# 方 法

#### (1)被験者

被験者は、大学生 162 名であった。

### (2) 手続き

初めに、自分が"現在"障害をもつと思う程度について、0~100までの数値を用いて評定することを求めた。平面上の位置関係の変化を連想させる可能性がある無段階スケール、ポイントスケールなどは使用しなかった。

次に、A4 サイズの白色の用紙上に、"現在"の自分の位置をサークルで描くことを求めた。この用紙の中央には、障害をもつ人全体の集合を示す半径25mmのサークルが、表示されていた。

自分が"将来"障害を持ようになると思う程度について、0~100までの数値を用いて、評定

することを求めた。

"現在"の自分の位置を描いたものと同一の 用紙(障害をもつ人全体の集合が、半径 25 mmの サークルで表示してあるもの)に、"将来"の自 分の位置を、サークルで描くことを求めた。

全ての回答は無記名で行った。障害をもつ(ようになる)と思う程度については、評定値の1/100を、メンバーシップ値(0~1)とした。そして、被験者群全体の平均値を求めた。

# 結果と考察

# (1)障害をもつ程度と、自己位置との関連

"現在""将来"障害をもつ程度の評定値と、 障害をもつ人全体を示すサークルの中心から、 "現在""将来"の自己位置を示すサークルの中心までの距離との間には、負の相関関係が見られた。障害をもつ人全体集合のサークルの中心から、自己位置サークルの中心までの距離と、 "現在""将来"障害をもつ程度の評定に基づく メンバーシップ値との相関係数は、・0.4 であり、有意であった(p<0.01)。

### (2)集合に含まれる程度と領域間の距離

この結果は、多くの被験者が、"現在""将来"障害をもつ程度の評定が高くなるほど、自己位置が、障害をもつ人全体の集合を示すサークルの中心に近くなると認知していることを示唆する。このことは、自己位置と自分自身が障害をもつ程度の評定との間には、一定の関連(自分自身が障害をもつ程度が高い場合ほど、自己位置は、障害をもつ人全体の集合を示すサークルの中心に近い位置に表示される)を、想定する被験者が多かったことを反映していると考えられよう。

このような結果は、ファジイ集合論に関して 特別な知識を持たない被験者であっても、特定 の集合に属するか否かについてあいまい性がある場合に、あるものの位置が、その集合を示す領域の中心に近く表示されているほど、その集合に属する程度が高いことを示すという方式を用いた、ファジイ集合の模式的表示が、比較的理解され易いことを示唆している。

ただし、特定のものが当該集合に含まれる程度の評定と、そのものと当該集合を示す領域、サークル)との想定位置との間の関連は、必ずしも明確に意識されているわけではなく、個人差も存在することに留意することが求められよう。

### (3)同心円状の模式的表示の特性

ある領域との距離関係が、特定の集合への所属の程度を示すという方式による、ファジイ集合の模式的表示にも、いくつかのものが考えられよう。ここでは、集合に含まれる程度と平面上の位置が関連を持つファジイ集合の模式的表示の例として、同心状のファジイ集合の模式的表示について検討を試みることとした(図1参照)。この表示では、メンバーシップの差異を示す同心円が描かれ、内側の円の方が外側の円よりメンバーシップ値が高くなっていることを示している。また、このような表示は、以下に示すような特性を持っていると考えられる。

- \*表示方法が比較的単純である(図1A参照)
- \*線種・線の明度などによって視覚的イメージ の変化が可能 (図1A,B参照)
- \*円などを用いたベン図との対比・連想が容易
- \* メンバーシップ関数の異なる集合の表示が可能(図 1C 参照)
- \*複数のファジイ集合を同時表示し、和集合・ 共通集合などを表示可能(図1D参照)
- \*複数の要素間の関連を表示可能
- \*メンバーシップ値の測定などに応用可能
- \* メンバーシップ関数の表示に応用可能 (この3点については、図1E参照)

# (4)同心円による模式的表示の応用例

図1A,B は、類似した同心円状のファジイ集合の模式的な表示例を示している。図1Bでは、線の太さ、明度、破線の間隔などを変化させ、より外側の同心円がより低いメンバーシップ値を示すことを強調している。また、図1C は、同心円の間隔を変えることによりメンバーシップ関数の(リニアではない)変化を表すことを試みた例である。

図 1D は、ファジイ集合 1(実線で示したもの) と、ファジイ集合 2(破線で示したもの)を同 時に表示した例である。このような例では、2 つのファジイ集合の共通集合、和集合をも表示 することが可能である。

図 1 E は、複数のものに関する複数の特性(この例では、買いたい自動車のファジイ集合のメンバーシップ値と、購入予算との差額の大きさ)を示した例である。

この例では、同心円の中心からの距離は、各車が買いたい車であると評価された程度(メンバーシップ値)を示している。また右側の水平軸は購入予算を示している。右の水平軸に対する左回り(上方)の角度(180 度未満)は、購入予算より高額である程度を示している。逆に、右回り(下方)の角度(180 度未満)は、購入予算を下回る程度を示している。このような表示を行えば、各々の車を買いたい程度と、購入予算との関係の把握に有効であると思われる。

また、このような表示は、メンバーシップ値を測定するメジャーとしても利用可能である。例えば、車の購入を検討している人が、購入候補車について、価格別に買いたい車である程度を評定し、同心円の各価格軸上に適切な位置を指定する方法で、メンバーシップ値を測定することが可能である。この他にも、同心円状(あるいは類似の)ファジイ集合の模式的表示には、様々な応用可能性があると思われるが、この他の応用については、今後の検討課題である。

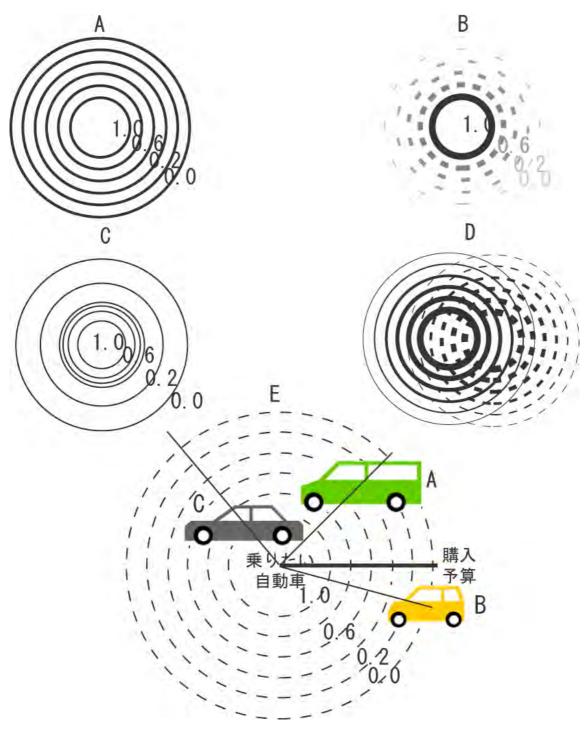


図1 同心円によるファジイ集合の模式的表示とその応用例

# 引用文献

[1] 奥田裕紀 青年期・成人期の発達と障害 新・障害者の心理 みらい 47-62, 2001

# [連絡先]

〒924-8511 石川県松任市笠間町 1200

金城大学 奥田裕紀

TEL:076-276-4400

E-mail: okuda@kinjo.ac.jp

# 航空機の画像からの特徴抽出

# **Feature Extraction from Aircraft Image**

飛澤 真人 Masato Tobisawa 植田 佳典 Yoshinori Ueda 東洋大学 Toyo University 佐藤 章 Akira Sato

**Abstract**: The figure of wings decides the aerodynamic characteristic of an aircraft, and depends on the model of the aircraft. We present a method for recognizing the model of an aircraft in an image using templates for the figure of wings.

### 1. はじめに

飛行中の航空機の情報(機種など)を目視や識別信号に頼らず知ることができれば便利であると思われる。

航空機の写真画像からその機種を特定する手がかりとして、写っている機体の特徴を抜き出すことを考える。我々はその方法の一つとして、 翼形状を識別する方法を提案する。

航空機の最も重要な要素は揚力を発生する機構であり、機体全体の比重を軽くする飛行船などか、直接地面に向かって推力を発生するヘリコプターなど以外は、主翼がその役割を担う。

また航空機の機体は進行方向の空気抵抗を低減するため、主翼と同一平面上に胴体や水平尾翼などのその他の構成要素を集める設計をすることが多々ある。

以上から、主翼を含む平面が切り取る機体の断面の形状をテンプレートとして記憶しておき、目標画像の主翼の形状をその同一平面の形状ごと識別する方法を提案する。

# 2.翼平面テンプレートの作成

最終的には主翼形状を機種の特定に適したカ テゴリーに分け、その典型的なものについてテ ンプレートを作成していく。

今回の実験ではまず、一枚のテンプレートで 主翼形状が識別できるかどうか確認するため、 模型飛行機の説明図等を参考、以下のようなテ ンプレートを作成した。



図1 主翼平面テンプレートの例

### 3. テンプレートの変形

航空機は高空を高速で移動するため、その写 真画像はあまり広角で撮影されることはないと 予想されるので、航空機の画像はパースによる ゆがみが少なく、平面の形状はアングルの変化 による三次元の回転が二次元での伸縮・回転・平 行のゆがみとなって現れる。

図2のように機体のアングルの基準となる三点(ここでは左右翼端と機首)をテンプレートおよび目標画像中に決め、以下の手順でテンプレートを目標画像のアングルに合わせて変形する。

第一・二点間を水平にするように回転する 第三点が第一点の真上になるようにゆがみ を与える(ゆがみ角を直角にする)

目標の翼長と機首主翼間距離に合わせて伸 縮する

歪み角を目標のゆがみ角と同じになるよう にゆがみを与える

傾きが目標と同じになるように回転する

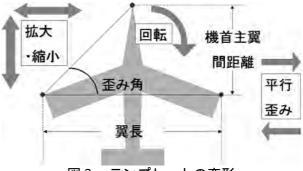


図2 テンプレートの変形

目標画像との照合は、変形したテンプレート を目標画像と重ね合わせ、重なる部分とはみ出 す部分とを調べることで類似性を検証する。

#### 4. 実験

# 4.1 テンプレートと同じ機種

テンプレートと同じ機種の目標画像を用いて 実験を行った。図3はその目標画像である。な お今回の実験では翼端の点は後ろ側の角を用い ている。



図3 テンプレートと同じ機種の目標画像

図4は図1のテンプレート(暗くなっている)を図3のそれぞれの目標画像に合わせて変形し、重ねた結果である。右上および下の画像では、 尾翼周辺でテンプレートがややはみ出しているが、実機の水平尾翼周辺は断面が完全な平面ではなく若干カーブしているためと思われる。



図4 同機種の結果

# 4.2 テンプレートと異なる機種

図5のテンプレートと異なる機種の目標画像についても4.1と同様に実験を行った。



図 5 テンプレートと異なる機種の目標画像

図6は図5の目標画像に 4.1 で用いたのと同じテンプレートを変形して重ねた結果である。



図6 異機種の結果

テンプレートと異なる機種の場合では、テンプレートと機体シルエットが重ならない面積が、シルエットとテンプレートが重なる面積(S₁)に対して、同じ機種の場合よりも大きくなっていることが見て取れる。

### 4.3 類似性の数値化

機体シルエットがテンプレートからはみ出す面積( $S_s$ )は実機が厚みを持った立体である以上ある程度は生じるはずであり、テンプレートがシルエットからはみ出す面積( $S_t$ )よりも、テンプレートと目標画像の類似性に与える影響は少なくなければならない。(0 < w 1)の重みwを用いて、計算機上での画像の画素数を面積として、次の式で類似度( $F_a$ )を求めた。

$$F_a = \frac{S_1}{S_1 + w \times S_s + S_t}$$

(1)

表 1 は w=0.5 とし、先の三つの画像について ( 1 ) 式で算出した類似度である

同機種(左)	0.901448
同機種(右)	0.892067
異機種	0.628846

表 1 テンプレートと目標シルエットの類似性

同機種と異機種でかなり異なる値が得られたので、変形されたテンプレートと目標画像の、 類似性を表す値として用いることが可能である と思われる。

# 5. まとめ

航空機の主翼とその同一平面を合わせた形状のテンプレートを用いて主翼形状を識別する方法を提案し、この方法が主翼形状の識別にある程度有効な方法の一つであると確認した。

今後の課題として、実験で用いたテンプレートに加えて複数のテンプレートを作成するとともに、より多くの画像で実験を行い、航空機の多数の機種を識別するのに適したテンプレートとパラメータの値を検討していく必要がある。

また、テンプレートの変形の基準となる点を 自動的に目標画像から発見する方法や、アング ルの関係でそれらの点が画像中から見つけられ ない場合の対策を検討が必要である。

### 参考文献

[1] 高橋 祥郎: SNAKES 理論を拡張した歩行 人物の領域特定", 平成14年度卒業論文, 東洋 大学工学部情報工学科, 2002

[2] "Game City MASDF"ホームページ,

http://www1.seaple.icc.ne.jp/seki/

[3] "アルティメーター"ホームページ http://altimeter.nce.buttobi.net/

[4] 矢野 健太郎 春日 正文:"モノグラフ 24 公式集",科学新興社,1969,5 訂版 1997

## 連絡先

飛澤 真人 東洋大学大学院工学研究科 情報工学専攻博士前期課程 〒350-8585 川越市鯨井中野台 2100 東洋大学工学部 情報回路学研究室 E-mail: camy-you@wing.zero.ad.jp

# SOMを用いた倒産可能性診断手法に関する研究

A bankruptcy possibility diagnostic technique using SOM

中岡 伊織

## 谷 久壹朗

亀井 且有

Iori Nakaoka

Kyuichirou Tani

Katsuari Kamei

立命館大学大学院理工学研究科

立命館大学大学院理工学研究科 Graduate School of 立命館大学理工学部

Graduate School of Science and Engineering

Science and Engineering

Computer Science

Ritsumeikan University

Ritsumeikan University

Ritsumeikan University

**Abstract** Bankruptcy danger judgement of a company is an important problem to investment. The calculation and analysis are very important. In order to deal bankruptcy, it is necessary to investigate the change in money. Therefore, a cash flow is adopted. This paper uses some kind of data for input. And, we describes a bankruptcy possibility diagnosis technique using SOM, and show proposal system works well for the bankreptcy.

### 1 はじめに

株式投資などのポートフォリオを行う場合には,良い状況に有る企業を選定すべきである.逆に,倒産しそうな企業には投資すべきではない.その際,どのような企業が倒産するかを見極めることは非常に難しい問題である.また,従来の倒産しそうな企業を見つける手法では様々な分析方法を用いている.だが,多くの要因が絡む倒産では,分析結果をさらに評価しなくてはならない.

本研究では多次元のものを 2 次元で視覚的に示す手法として自己組織化マップ (SOM)を用いる.データとしてはキャッシュフローというお金の流れを表す指標を用い,企業の倒産可能性診断手法について提案する.

### 2 キャッシュフロー

本研究では倒産を扱うということで,お金の増減を扱う必要がある.キャッシュフロー [1] は従来のように利益があるかどうかではなく,お金が増えているかどうかをみる指標であり,近年非常に注目・重視されている.その理由として「黒字倒産」などのように,利益は出ていても貸し渋りなどの影響を受け,倒産している企業を見抜くためである.またそれにともない近年は企業価値の測定尺度も変化している.従来は他社とのシェア・売上高・利益比較だけで評価していたが,株主の出資金からどの程度の資金や利益が生み出されたかといった資本の効率性が大きな評価の基準となっている.

### 3 SOM

SOM[2, 3] は、=ューラルネットワークをモデル化し たもののひとつで、教師なし競合強化学習および近傍学 習を行うことにより、ある分布に従う多次元のデータに 対して、その分布を近似した特徴マップ生成を行う.特 徴マップは2次元平面に表示され、同じような特徴を持 つ入力データはマップ上の近い位置に出力される. 入力 データに対してマップのどの位置に出力されたかによ り、どのデータと類似した特徴を持つかということがわ かり、視覚的にも理解しやすい、SOM のネットワークは、 データの次元に対応した入力ノードをもつ入力層と、2次 元平面状に出力ノードが格子状に配置された出力層の2 層からなり、各入力ノードはすべての出力ノードと結合 している。また、各々の出力ノードには入力データであ る n 次元の結合ベクトルが格納されており、入力ベクト ルと1番近い結合ベクトルを持つ出力ノードと、その近 傍にある出力ノードの結合ベクトルを入力ベクトルに近 づける事で学習を行う このような動作を近傍を縮小し ながら繰り返すことにより、次第に同じような特徴を持 つデータ同士が集まった領域が作られていく、すなわち、 マップが自己組織化されていき、入力ベクトルの特徴を 反映したマップが生成される [4].

# 4 倒産可能性診断手法

投資家は,良い状況に有る企業に投資するとともに, 倒産しそうな企業には投資をするべきではない.どの

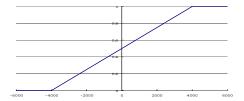


Fig. 1 A function of actual data and previous year difference data

ような企業が今後倒産の方向へ向かっていくかというこ とを分析することは,難しい問題である.本研究では, SOM を用い倒産可能性診断手法を提案する.入力デー タとして用いるキャッシュフロー計算書は,有価証券報 告書に掲載を義務付けられて4年しか経っておらず,記 載方法が各企業によって異なっている.よってよりたく さんの企業において記述されている指標をできるだけ 採用し,計39指標を採用した.また,4年間・現存34 社に 14 年に倒産した企業 4 社・15 年に倒産した企業 4 社,計42社を用いた.実際のSOMへの入力へは「該 当年度のデータ」「前年差」「前年比」を用いる.その理 由としてまず,該当年度のデータは,その年の状況を見 るためである.また,前年差・前年比は傾向を把握する ためである.前年差・前年比を共に用いた理由として, 前年差では実際の値でどの程度増減しているかを把握で きるのに対し,前年比では企業の規模に影響されないと いうメリットがあり,共に必要な指標であると考えられ たためである.しかし,該当年度のデータ・前年差は円 と前年比の%は単位が異なる問題がある.本研究では, Fig. 1, Fig. 2 に示すような正規化関数を用いることによ り , 全ての入力値を [0,1] で表現できるようにした . Fig. 2 これらのデータを用いた結果を示す.ここで,図中に て「-」の左側の数字は,個々の企業を,右の数字は年 度を示している.また「T」と記載されているものは倒 産企業である.

結果として,まず第1に,14年に倒産した企業と15年に倒産した企業が近い領域に出力されていることが見受けられる.これにより,各企業が同じような状況にあり倒産したことがいえる.第2に,この倒産した企業がある領域近辺のやや色の薄い領域にある企業は,最も危険性が高く至急に経営体質を改善する必要がある企業であると考えられる.また,その領域の近辺の領域にある企業は,最も危険性が高い領域の企業にならないために,資金を増やすなどの努力をした方が良い企業であるといえる.これらより,本システムには有用性があると考えられる.

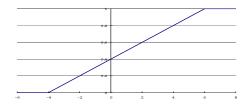


Fig. 2 A function of previous year ratio data

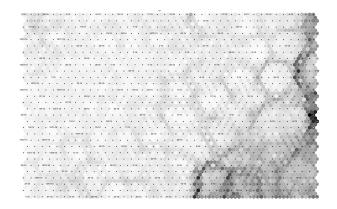


Fig. 3 A result by SOM

## 5 おわりに

本研究では SOM を用いた企業の倒産可能性診断手法を提案した.その結果として,倒産した企業と同じような状況にあり,倒産の危険性があるかないかを診断することができた.今後の課題としては,指標ごとの正規化関数の設定や倒産要因ごとに予測・評価する必要があると考えられる.また,本研究には一般的な SOM を用いているが,階層的に示すことが出来る SOM である GHSOM の使用も検討していく.

# 参考文献

- [1] 友田和彦 , キャッシュ・フロー計算書の理論と作成実務 , 財 経詳報社 , 1998.
- [2] 徳高平蔵,岸田悟,藤村喜久郎,自己組織化マップの応用, 海文堂,1999.
- [3] G. Deboeck, T. Kohonen, 金融・経済問題における可視化情報探索-自己組織化マップの応用-,シュプリンガー・フェアラーク東京,1999.
- [4] 道端正裕,三好力,増山博,"自己組織化マップの自動追加学習システム",日本ファジィ学会誌,vol. 14, no. 2,pp. 147-156, 2002.

### [連絡先]

住所 : 〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 立命館大学理工学部情報学科亀井研究室

Tel : 077-561-2861 Fax : 077-561-2861

e-mail : nakaoka@spice.cs.ritsumei.ac.jp

# 新規ユーザが参加しやすい環境を提供する コミュニティ分割型チャットシステムに関する研究

# Community Partition Based Chat System Easy to Join for New Members

平山嘉之 Yoshiyuki Hirayama 大分大学 Oita University 行天啓二 Keiji Gyohten 大分大学 Oita University

#### **Abstract:**

Recently, communication tools have been popularized rapidly on Internet, where communities are formed based on common interests as well as in a real society. Since topics brought up at the communities will be limited to the interests shared by the senior participants, newcomers consequently become hard to participate in the conversation. To avoid this problem, it will be appropriate to provide the newcomers communication environment where the community is not formed. From this viewpoint, we propose the chat system that always provides newcomers the environment where participants are unfamiliar with each other. The proposed system evaluates intimacy between them by considering the number of their statements and separates the community by analyzing the graph representing the human relationship in the room.

# 1. はじめに

近年のインターネット環境の充実に伴い,チャットや電子掲示板など,ネットワーク上の多対多コミュニケーションツールが急速に普及している。通常の社会と同様に,このようなが形式にあるというでもコミュニティが固定された成熟したコーザが固定され,新たなユーザが固定され,新たなユーザをはいるに参加しにくくなる傾向がある[1]・インター、より多くのユーザを集めようとする管理者に少っての現象は,新規ユーザの定着率を減少っている。

この問題点に対処するためには,新規ユーザにはコミュニティが形成されていないコミュニケーション環境を提供することが適切であると考えられる.本稿では,チャットによるコミュニケーションを想定し,成熟したコミュニティを別ルームとして分割することで,コミュニティ未形成のコミュニケーション環境を新規ユーザに提供するチャットシステムを提案する.

提案するシステムでは、チャットに参加しているユーザが、成熟したコミュニティに属しているかを判断するために、発言数を基にした1対1のユーザ間の親密さを算出する.そして、ノードがユーザを表し、エッジがユーザ間の親密さの値を有するグラフにより、ユーザ間の関係を表現する.ユーザ間の親密さが互いに深い部分グラフをグラフから獲得し、これを成熟したコミュニティと解釈する.

あるルームの参加ユーザ数が多くなり、ルー

ム内のコミュニケーションに全ユーザが参加することが困難になった場合、上記のアププム内のからにより、成熟したコミュニティを別ルーム内の名には、チャットシステムと内の名には、チャットシステムに親密ないのでは、カームに表れている。チャットションの場ができれる。チャットションの場ができれる。チャットションの場ができまれて、新規ユーザのコミュニティス適成のルームに基本的に参加として検証する。

以下, 2.でユーザ間の1対1の親密さを評価する親密度・親密度比・相互親密度を定義する. 3.で相互親密度を基に形成したユーザ関係グラフからコミュニティを抽出する手法を説明する. 4.では,提案手法を実装したチャットシステムの概要について説明する. 5.では,提案システムに実際にユーザに参加してもらい,アンケートにより提案システムの評価と考察を行う. 6.でまとめと今後の課題について述べる.

# 2. 親密さの定義

提案手法では,発言数が多いユーザ同士は親密であるという考えに基づき,以下に定義する親密度・親密度比・相互親密度と呼ばれる値を用いて,ユーザ間の親密さを計算する.

あるユーザのチャットルームへの参加·離脱によって,ルーム内のユーザ集合に変化があると,ルーム内のユーザ関係も変化してしまう.そこで,図1に示すように,同ユーザ集合で行

われたコミュニケーションをチャットにおける 1つの時間区間と解釈する.ユーザ間の親密さ を評価する各評価値は,各ルームの各時間区間 ごとに算出するものとする.

#### 時間区間

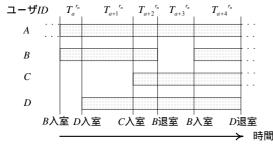


図1 時間区間の定義

1つの時間区間における親密度を以下に定義する.親密度は,あるユーザがあるユーザをどれほど親しく感じているかという,一方向の親密さを表す.ルーム $r_n$ の時間区間 $T_a^{r_n}$ におけるユーザ $ID_A$ のユーザ $ID_B$ に対する親密度を,

$$C(T_{a}^{r_{n}}, ID_{A}, ID_{B}) = \frac{S_{T_{a}^{f_{n}}}^{ID_{A}} \times S_{T_{a}^{f_{n}}}^{ID_{B}}}{\sum_{ID_{X} \in U_{T_{a}^{f_{n}}} - ID_{A}} S_{T_{a}^{f_{n}}}^{ID_{X}}}$$

と定義する.ただし, $U_{T_a^{r_a}}$  は時間区間 $T_a^{r_a}$  におけるユーザ集合を表す. $S_{T_a^{r_a}}^{ID_X}$  は時間区間 $T_a^{r_a}$  におけるユーザ $ID_x$  の発言数を表す.

算出した親密度は過去の親密度データとしてサーバに保存され、次の親密度算出時に利用される.しかし、現在と過去ではユーザ関係が変化していることも考えられるため、より現在に近い親密度を反映した計算を行うことが必要である.そこで本手法では、過去の親密度データと算出された親密度を基に、最終的な親密度を以下のように定義する.

$$C'(T_{a}^{r_{n}},ID_{A},ID_{B})$$

$$=\begin{cases} C'(T_{a-1}^{r_{n}},ID_{A},ID_{B}) + C(T_{a}^{r_{n}},ID_{A},ID_{B}) \\ (C(T_{a}^{r_{n}},ID_{A},ID_{B}) \neq 0 \text{O とき}) \\ C'(T_{a-1}^{r_{n}},ID_{A},ID_{B}) / 2 \\ (C(T_{a}^{r_{n}},ID_{A},ID_{B}) = 0 \text{O とき}) \end{cases}$$

このように場合分けすることにより,過去に蓄積された親密さを反映し,かつ,より現在の親密さに重点をおいた親密度を算出することができる.

算出された親密度については,蓄積された親密度の値と,各ルームによる時間区間の違いにより,値域に個人差が生まれてしまう.そのため,各ユーザの持つ親密度を比で表す親密度比

を定義する.

$$VC_{AB} = \frac{C'(T_a^{r_n}, ID_A, ID_B)}{\max_{X} \{C'(T_a^{r_n}, ID_A, ID_X)\}}$$

この親密度比を用いることで,ユーザが他の各ユーザをどれほど親密に感じているかを,0.0~1.0の値で相対的に表すことができる.

これまでに定義してきた親密度・親密度比とは一方向の親密さを表す値である.そこで,ある二人のユーザが,互いにどの程度仲が良いかという双方向の親密さを,相互親密度として以下のように定義する.

$$MC_{AB} = VC_{AB} \times VC_{BA}$$

相互親密度は 0.0~1.0 の値で表される.この相 互親密度を基にユーザ関係を定義する.

# 3. 成熟したコミュニティの分割

前節で定義した相互親密度を用いて,ノードがユーザを表し,ノード間のエッジがユーザ間の相互親密度を表すユーザ関係グラフを表現する.成熟したコミュニティを形成するユーザ間の相互親密度は,比較的高いと考えられる.そこで本手法では,ユーザ関係グラフを基に,エッジが密の部分を抽出する.そして,抽出された部分グラフのノードに対応するユーザを,成熟したコミュニティのユーザであると判断する.

本手法では,文献[2][3]のクリーク獲得方法を用いる.この方法ではグラフから定義される以下の複製方程式を用いる.

$$x_i(t+1) = x_i(t) \frac{(W\vec{x})_i}{\vec{x}(t)^T W \vec{x}(t)}$$
,  $i = 1...n$ 

nはグラフ内のノード数であり,Wはユーザ関係グラフの $n \times n$ の隣接行列である.特徴ベクトル $\bar{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T$ は,各成分が各ノードに対応するn次元ベクトルである. $x_i(t)$ の値が大きいほど,ノードが所望の部分グラフに属することを表している.この式により $\bar{x}(t)$ を更新し, $f(x) = \bar{x}^T W \bar{x}$ が収束したときの特徴ベクトル $\bar{x}(t)$ の値を用いて,各ユーザが成熟したコミュニティに属するかどうかを判断する.図 2 に,本手法を適用することによるコミュニティ獲得例を示す.

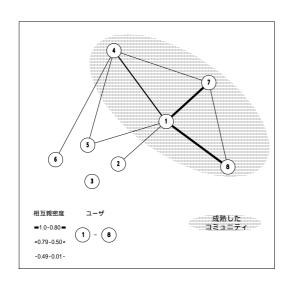


図 2 ユーザ関係グラフと把握した コミュニティ例

# 4. システム概要

コミュニティ分割手法を実際にチャットシステムへ実装した場合の.システム処理の流れを図3に示す.図3では,1つのルームのユーザ数がMを超えた場合にコミュニティ分割を行う.

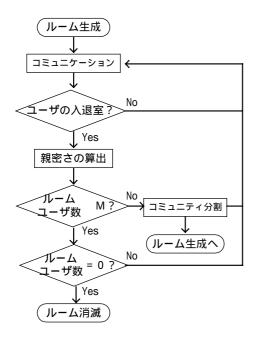


図3 システムのフローチャート

### 5. 実験結果·考察

提案システムを実装し、参加したユーザにアンケートをとる形でシステムの評価を行った、参加したユーザ数は9人、時間は3時間であった、1つのルームのユーザ数定員Mは7人とした、また本チャットシステムでは、基本的なテキストベースのコミュニケーションおよびルーム分割機能、コミュニティ分割機能に加え、ユ

ーザ検索機能や他のルーム状況確認機能,コミュニティ把握によるルーム分割時に移動対象となるユーザにルーム移動の是非を問う機能を追加した.

実験終了後,参加ユーザに回答してもらった アンケート項目を以下に示す.

- ・A.分割は適性であったか
- ·B. コミュニティ分割についてどう思うか
- ·C.分割を体験してどう思ったか
- D.分割後は発言しやすかったか

項目Aについては図4に示すように,分割されなかったユーザと分割自体をよく思わないユーザを除き,概ね適性であったと回答している。これより,提案システムは成熟したコミュニティをうまく把握できていたと考えられる.

項目Bについては図5に示すように,実験中に不本意な分割が起こったユーザを除き,ほぼ肯定的な回答が得られた.良い印象はないと答えたユーザは,コミュニティが分割されたとき1人になってしまった.これは,ユーザ関係グラフから部分グラフを抽出する際の判断基準となる,特徴ベクトルのしきい値が問題であると考えられる.

項目 C については図 6 に示すように,不本意な分割をされたユーザを除いて,悪くはないと回答している.このことから,コミュニティが自然に,適正に把握できれば,分割は悪い印象は与えないと考えられ,新規ユーザ,把握されたコミュニティのユーザの双方共に参加しやすいコミュニケーションの場となるのではないかと考えられる.

項目Dについては図7に示すように,あまり会話に参加できていなかったユーザが発言しやすくなったと回答している.このことから,新規ユーザにコミュニティ未形成のコミュニケーションの場が提供され,そのユーザ同士で新たなコミュニティが形成されるのではないかと考えられる.ただし,成熟したコミュニティと判断されたユーザによっては,会話の最中に分割が行われることが会話を妨げると回答しており,この点については,今後検討する必要がある.

他に、「ルームのユーザ数が一定数に達したときではなく、ルーム内で同時に複数の話題についてコミュニケーションが行われたときに即座に分割してはどうか」という意見や「分割に会話内容を考慮してはどうか」という意見があった、「テキストベースのコミュニケーションであるから、その中で個性を出すために、文字やユーザ名の工夫をして欲しい」という意見も聞かれた.

以上の実験結果から,コミュニティの把握,コミュニティ分割のタイミングが適正であれば,新規ユーザが参加しやすく,あるコミュニティのユーザにも影響を与えない分割型チャットシステムを提供できると考えられる.また,何らかの方法で,会話の内容を考慮した処理も,今後必要となるという知見が得られた.

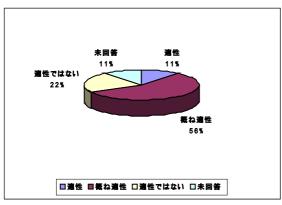


図4 アンケート項目A

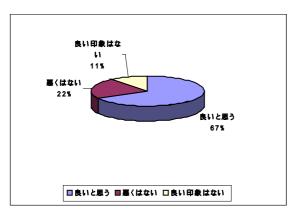


図5 アンケート項目B

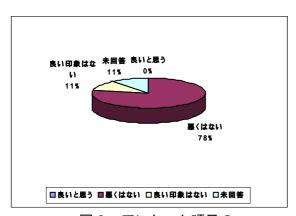


図6 アンケート項目 C



図7 アンケート項目 D

# 6. まとめ

本研究では、コミュニティ分割を適用し、新規ユーザにはコミュニティ未形成のルームに参加させるチャットシステムを提案した、実験では、新規ユーザはコミュニケーションへの参加がしやすかったという結果が得られた.

今後の課題としては、コミュニティ把握において、判断基準となる特徴ベクトルの回の実験である。さられる。さられぞれのユーザは全てお互いに知り、コミュニケーショとは全てお互いに知られなのユーザンがルームのユーザであるとりにしたが、カーショとは、カーショとは、カーショとは、カーショとは、カーショとは、カーショとがであるともである。また、がえるというであるともである。というであるともである。というであると考えられる。

## 参考文献

- [1] 井上雅之 他 : 3次元仮想社会 InterSpace におけるコミュニティ形成過程とコミュニケーションメディア利用推移に関する考察,情報処理学会論文誌, Vol.41 No.10, pp.2670-2678, 2000.
- [2] T.S. Motzkin and E.G. Straus, : Maxima for Graphs and a New Proof of a Theorem of Turan, Canadian J. Math., vol. 17,pp. 533-540, 1965.
- [3] Marcello Pelillo et al.: Matching Hierarchical Structures Using Association Graphs, IEEE TRANSACTIONS OF PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, VOL.21, NO.11,1999.

## 連絡先:

平山嘉之

大分大学工学部知能情報システム工学科 〒870-1192 大分県大分市旦野原 700 E-mail: hira@csis.oita-u.ac.jp

# ディレクトリ型検索エンジンの分類体系をもとにした 概念辞書の利用による文献のランキング

Ranking Documents by utilizing a Concept Dictionary based on a Classification Scheme of a Directory-based Search Engine

中島 誠 Makoto Nakashima

太田黒 啓 Akira Ohtaguro 佐藤 慶三

伊藤 哲郎

Keizo Sato

Tetsuro Ito

大分大学知能情報システム工学科

Department of Computer Science and Intelligent Systems, Oita University

**Abstract:** Retrieval performance can be improved by getting query and document expressions in which the keywords are replaced by their identifiers in a concept dictionary, and by ranking the documents according to the conceptual relations among the keywords. The problem is that most of the available concept dictionaries are domain-specific and not up-to-date. This paper proposes a method of ranking documents utilizing conceptual relations for keywords via the classification schema of Yahoo! JAPAN. The effectiveness of utilizing conceptual relations was evaluated computationally.

# 1. はじめに

WWW 上の検索エンジンの普及に伴い,大量 の文献情報を容易に手に入れられるようになっ た.問題は不必要な文献も同時に取り出されて しまうことである.これに関して,情報検索の 分野では,概念辞書を利用して,質問と文献の キーワード同士の概念的関連性を捉えながら、 ユーザが望む情報を効率よく取り出す手法が提 案されている[6].

概念的関連性を捉えるには、様々な分野で整 備されている概念辞書[1][7]が用いられる.しか しながらこれらは,特定の分野の文献に対応し たものとなっている. 広い分野に対応可能な辞 書は、構文解析など語用論的な視点から構築さ れたものが多く,キーワード同士の概念的な関 連性を捉えるのに必ずしも適していない[8].ま た,多くの辞書が人手により作成されているこ とから、時事情報などにうまく対応できない、

ディレクトリ型検索エンジンでは,様々なカ テゴリに, それぞれの内容に合った文献が分類 されている.また,カテゴリに含まれる情報は 必要に応じて更新される.ここでは,ディレク トリ型検索エンジンの 1 つである Yahoo!Japan[10]の分類体系を概念辞書として利 用して,質問と文献のキーワード同士の概念的 関連性を捉える方法について述べる.その有効 性は Excite[3]の検索結果を用い実験を通じて確 認した.

# 2. 文献のランキング

概念辞書を利用した文献のランキング方法を [6]に従ってまとめておく、概念辞書中の各概念 は,記述子(概念を示すための語句あるいは記 号)によって表されている.質問および文献は 重みつきのキーワードのリストとして与えられ

るとする.これらキーワードを概念記述子に置 き換え,置き換えられた記述子を集めて得たも のを, 文献や質問の概念的表現と呼ぶ. 概念的 表現中に,質問の概念的表現中の記述子により 近い位置にある記述子を多く含んでいる文献ほ ど,質問との関連性が強いとする.これにより, キーワードの文字面では捉えることの出来ない 関連性を,概念的に捉えることができ,関連性 を数量化することで,より優れた検索効率が期 待できる文献のランキングが得られる.

# 3. ディレクトリ型検索エンジンの利用

キーワード同士の概念的関連性を捉えるため に, Yahoo!Japan の分類体系を概念辞書として利 用する .1 つのカテゴリを 1 つの概念とし,分類 体系を概念の上位下位関係として捉える. その 上で,カテゴリ名を各概念を表す記述子として 捉える.

質問や文献のキーワードは,類似した文字列 を含む記述子に置き換えるようにする.Web 上 には,様々な分野の文献が存在している.これ らの内容を,キーワードを置き換えた記述子に より余すことなく表すことが必要となる.これ には、概念記述子の同義語を用意して、キーワ ードと高い類似性を示す同義語をもつ記述子へ 置き換えられるようにする.同義語には,記述 子としてのカテゴリ名と , カテゴリに Web ペー ジが登録されている場合には,これらのタイト ルおよび説明文から形態素解析によって抽出し た名詞句を充てる.1つに記述子につきできるだ け多くの同義語を用意することで,様々なキー ワードを置き換えられる可能性が高くなる.

概念辞書の例を図1に例を示す.概念記述子 と同義語として抽出した名詞句を階層に配置し た形となっている.カテゴリごとに抽出した同 義語は四角の中に示してある.低い(高い)レ

ベルに置かれた記述子ほど上位(下位)の概念を示す.上位の記述子は,その子孫にあたる下位の記述子より一般的といい,逆に下位の記述子は,その祖先にあたる上位の記述子より特定的と呼ぶ.

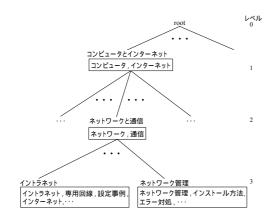


図1 概念辞書

# 4. 概念的関連性

質問qと文献 $d_i$ (i 1)との概念的関連性を捉えるには,まず,概念記述子の同義語のうち,キーワードと類似性の高い文字列を含むものを見つけ,それらを同義語としてもつ概念記述子に置き換える.置き換えられた記述子を集めて質問(あるいは文献)の概念的表現とする.次に,質問と文献の概念的表現中の記述子同士の対応づけをもとにした,両者の一般的な表現を利用し,関連性の強さを数量化する.

# 4.1 概念的表現

与えられる質問および文献は次のような重み つきのキーワードのリストである(重みは正規 化してある).

q:[ ネットワーク構築: 0.5, 専用回線網: 0.5], d<sub>l</sub>:[ 設定事例: 0.4, インターネット: 0.3, コンピュータ: 0.3].

通常のキーワードマッチングでは,上の例のように,質問と文献が共通のキーワードを持たなければ,両者の関連性は捉えられない.ここでは,キーワードを辞書中の記述子に置き換えて,辞書を介した記述子の対応づけをもとに関連性を捉える.

キーワードと概念記述子の同義語との類似性の強さを式  $(m_1+2m_2)/(L+2(L-1))$ で求め,値が閾値(と記す)以上である同義語を見つける.ここで, $m_1$  はキーワードと同義語の間で共通する文字の数, $m_2$  は隣接する二文字を一組としたときに共通する組の数 L はキーワードと同義語それぞれの文字数のうち多い方の数である.この処

置により,意味的に似通っていながら,日本語の表記に多少違いがあるような同義語も見つけられる.

見つけられた同義語は,これらを持つ記述子に置き換えられる.図 1 より,q および  $d_l$  の各キーワードを記述子に置き換えた表現 Q および  $D_l$  は,それぞれ次のようになる(=0.60 とした).

Q = [ ネットワークと通信: 0.25, ネットワーク管理: 0.25, イントラネット: 0.50],  $D_I = [$  イントラネット:0.55, コンピュータとインターネット: 0.45]

各記述子の重みは,キーワードの重みを置き換えた記述子の数で等分した後,同じ記述子ごとに合計して求める.高い類似性を示す同義語が見つからないキーワードについては,それ自身をレベル1にある概念記述子として扱う.これは,図1にある"root"の下位概念を示し,自身を除いて,より特定的な記述子をもたないとしておく.

# 4.2 対応づけ

質問qと文献 $d_i$ の概念的表現Qおよび $D_i$ が得られた状況で,両者について述べた一般的な表現 $QD_i$ を求める. $QD_i$ としては,Q および $D_i$ の各記述子について,それより一般的な記述子が $QD_i$ に含まれ,また, $QD_i$  の各記述子について,それより特定的な記述子がQおよび $D_i$ に含まれる表現とする[6].このような表現は複数出てくるが,その中でも特定的な記述子をより多く含むものを選ぶ.もし $d_i$ とは別な文献 $d_j$ の概念的表現から求められた一般的な表現 $QD_j$ と比較したとき, $QD_i$ がより特定的な記述子ばかりからなっていれば, $d_i$ は $d_j$ より qとの概念的関連性が強かったといえる.

問題は,質問と文献の概念的関連性を捉えるための一般的な表現をどのように求めるかである.ここでは,Q(および  $D_i$ )の各記述子を  $D_i$ (Q)の任意の記述子に対応させて,それら最小共通祖先を求める.そして,それら最小共通祖先のうちの最も特定的なものを  $QD_i$ の1つの記述子とする[6]. すなわち, $QD_i$ の各記述子は, $Q(D_i)$ の1つの記述子を,最も特定的な最小共通祖先を生む  $D_i(Q)$ の1つの記述子に対応させて求められる.得られた  $QD_i$  の記述子の重みについては, $QD_i$  が Q および  $D_i$  双方から得られたことを考慮して,対応させられた記述子の重みの小さい方と定める.最後に,同じ記述子は重みを合計して1つにまとめる.

 つの記述子から  $QD_I$ の 1 つの記述子が求まる.例えば,Q の " ネットワークと通信 " は, $D_I$  の " コンピュータとインターネット " との最小共通祖先" コンピュータとインターネット " より, " イントラネット " とのそれ " ネットワークと通信 " が特定的であることから," イントラネット "に対応させられる.そして最小共通祖先 " ネットワークと通信 " が  $QD_I$  の記述子となり,その重みは  $0.25(=\min(0.25,0.55))$ となる(同じ最小共通祖先を導く記述子が複数ある場合は,より大きな重みとなるものを選ぶとする).

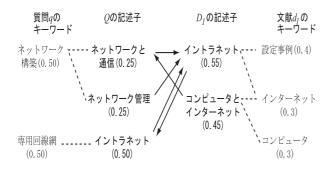


図2 記述子同士の対応づけ

同じ記述子ごとに重みを合計すると,  $QD_I$  は次のようになる.

 $QD_I$ =[ ネットワークと通信: 0.50, イントラネット: 1.00, コンピュータとインターネット: 0.25]

ここでの対応づけは, $Q(D_I)$  の 1 つの記述子を  $D_I(Q)$  の 1 つの記述子にしか対応させないが, $D_I(Q)$  の 1 つの記述子には  $Q(D_I)$  の複数の記述子が対応させられてもよい,多対 1 の対応づけととしている(図 2 では, $D_I$  の"イントラネット"には,Q の"ネットワークと通信"に加え,"ネットワーク管理"と"イントラネット"が対応させられている).このことにより,Q と  $D_I$  の記述子同士の対応関係が明示できる上,それらの概念辞書中での近さも  $QD_I$  に自然に反映できる.

コサイン関数[9]での類似度の求め方に倣い, Chenら[2]のように共通する記述子を対応づけたり, お互いに近くにある 2 つの記述子を選んで 1対1に対応づけたりすることも考えられる. しかしながら, これでは,対応関係は明らかになっても,記述子同士の概念的関連性をうまく反映できない. Mandala ら[5]は,概念辞書から得た記述子をもとに質問を拡張し,記述子同士の多対多の対応づけをもとに文献との概念的な関連性をとらえる方法を示した. しかしながら,この方法では,記述子同士の概念的関連性はう

まくとらえられても,対応関係が明白でなくなってしまう.

### 4.3 関連性の強さ

一般的な表現  $QD_i$ をともに,質問 q と文献  $d_i$  の関連性の強さを測る.具体的には,一般的な表現に含まれる記述子の特定さに従う数値を割り当てる.この値を以下  $s(q,d_i)$ と書く.

各記述子の特定さは,辞書中でのレベルを l として,l/h を割り当てるとする.ここで,h は辞書中で最も高いレベルをあらわす.例えば,図 1 (h=3) で"イントラネット"には 1 ,"ネットワークと通信"には 2/3 ,"コンピュータとインターネット"には 1/3 がそれぞれ割り当てられる.値  $s(q,d_l)$ は,0.71(=  $(0.50 \times 2/3 + 1.00 \times 3/3 + 0.25 \times 1/3)/2)となる.分母の <math>2$  は,正規化のための定数である.

# 5. 実験

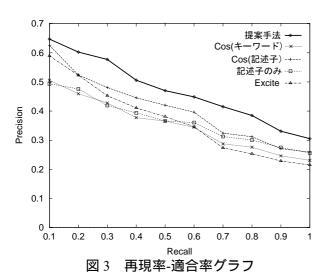
被験者7人にそれぞれ質問を設定してもらい,15件の質問を収集した.各質問について,ロボット型検索エンジン Excite[3]の検索結果上位100件の文献(Webページ)について,質問を設定した被験者に,適合,不適合の判定を行ってもらった.表1に質問とキーワード数および適合文献数の統計を示す.各被験者の趣味に関わる質問や,興味のある時事問題についてのものなど多岐にわたった.

表1 質問の統計

な」 負担の巡問				
質問	キーワード数	適合文献数		
プログラミング言語,見通し	2	13		
肝炎,急性	2	43		
国連,イラク,動向	3	49		
フセイン,身柄	2	14		
土木,暴力団	2	53		
筋子,寿司	2	6		
美 , 裏切り	2	6		
アリ,反逆,師	3	3		
孔明,戦術,赤壁	3	13		
アタリ,ジーパン	2	9		
アントニオ , 祭り	2	13		
阿蘇山,ドライブコース	2	5		
釣り,挑発	2	23		
コーヒー,アメリカン	2	29		
スカイライン,故障	2	11		
平均	2.2	19.3		

検索結果にある各 Web ページより抽出した名詞句を文献のキーワードとした.正規化した生起頻度の重み付けによる上位 20 個を利用した. 各質問についてキーワードの重みは同じとした. Yahoo!Japan の分類体系をもとにした概念辞書を を介し,質問と文献の概念的表現を求めた.辞書中の概念記述子数は 30,213 で,最も高いレベルは 11 であった (辞書中で他の位置へリンクされている記述子は用いなかった.また,レベル1にある"地域情報"より下位の概念は,このような記述子を多く含むため用いなかった[4]). 各記述子の同義語の平均の数は,27.8 で,置き換えの際の閾値を0.6とし,各キーワードは平均の数で12.2 の記述子に置き換わった.

提案手法により文献をランキングしたときの検索効率を再現率-適合率の形で図 3 に示す.比較対象として,質問と文献のキーワードをそのまま用いたコサイン関数による結果( $\cos(キーワード)$ と記す)と辞書を介した概念的表現を用いながら、関連性をみるのにsの替わりにコサイン関数を用いた(すなわち,記述子同士の対応づけは 1 対 1 で行う)場合の結果( $\cos(記述子)$ )も示す.



提案した手法による検索効率が他の方法よりも優れていた.Wilcoxon の検定によっても,提案手法の結果は,Cos(キーワード)(Cos(記述子))に対して再現率  $0.1 \sim 0.7 (0.2 \sim 0.7)$  の間で有意に優れていた(95%信頼率).提案手法により,キーワード同士の概念的関連性がうまく捉えられていることがわかる.また,Cos(記述子)との違いから,ここでの記述子同士の対応づけ方が,概念辞書中の上位下位関係をうまく捉えるのに有効であるといえる.

キーワードを記述子へ置き換えるのに,記述子のみから抽出した名詞句との類似性をもとに行った場合の結果(記述子のみ)も調べた.各キーワードは平均の数で 3.4 の記述子にしか置き換わらず, Cos(キーワード)と同様な結果となった.多くの同義語を用意することで,質問や文献の関連性と捉えやすい表現が得られたことがわかる.Excite の検索結果での文献のランキ

ングについての効率も調べたが,再現率 0.1 の場合を除いて Cos(キーワード)を下回る結果となった.以上の実験結果より,記述子の同義語を考慮した Yahoo!Japan の分類体系の用い方と記述子同士の多対 1 の対応づけ方による提案手法が質問と文献のキーワード同士の概念的関連性を捉えるのに役立つことがわかった.

### 6. おわりに

ディレクトリ型検索エンジンの分類体系を概念辞書として利用し、質問と文献の概念的関連性を捉える手法を述べ、その有効性を示した、今後は、ロボット型検索エンジンの検索結果に対し、ブラウザ上で提案手法を適用できる環境の開発を予定している。また、望みの文献を取り出しやすいように、記述子同士の対応づけを視覚化する方策についても検討していく。

# 参考文献

- [1] Association for Computing Machinery. Computing Classification System. 2004. http://portal.acm.org/ccs.cfm
- [2] Z. Chen, S. Liu, L. Wenyin, G. Pu and W. Ma. Building a web thesaurus from web link structure. Proc. of SIGIR'2003, pp.48-55, July/Aug. 2003.
- [3] Excite. http://www.excite.co.jp/
- [4] Y. Labrou and T. Finin. Yahoo! as an ontology Using Yahoo! categories to describe documents. Proc. ACM CIKM'99, pp.180-187, Nov. 1999.
- [5] R. Mandala, T. Tokunaga, and H. Tanaka. Combining multiple evidence from different types of thesaurus for query expansion. Proc. ACM SIGIR'99, pp.191-197, Aug. 1999.
- [6] M. Nakashima, K. Sato, Y. Qu and T. Ito. Browsing-based conceptual information retrieval incorporating dictionary term relations, keyword association, and a user's interest. JASIST, vol.54, no.1, pp.16-28, Jan. 2003.
- [7] National Library of Medicine. Medical Subject Headings. 2003. http://www.nlm.nih.gov/mesh/ meshhome.html
- [8] 榊 克彦, 宮崎 雅隆, 中島 誠, 伊藤 哲郎. 概念辞書を用いた日本語文献の索引づけ. 火 の国情報シンポジウム発表論文集, pp.17-22, 2002
- [9] G. Salton and M. J. MacGill. Introduction to Modern Information Retrieval. McGraw-hill, New York, 1983.
- [10] Yahoo!Japan. http://www.yahoo.co.jp/

# 連絡先:

中島誠

大分大学工学部知能情報システム工学科 〒870-1192 大分県大分市旦野原 700 番地

Phone: 097-554-7884 Fax: 097-554-7886

E-mail: nakasima@csis.oita-u.ac.jp

# 対話型進化計算を利用した3次元モデル作成の一手法

# A Method of 3D modeling using Interactive Evolutionary Computation

賀川 経夫 Tsuneo Kagawa 西野 浩明 Hiroaki Nishino 大分大学工学部 Oita University 宇津宮 孝一 Kouichi Utsumiya 高木 英行 Hideyuki Takagi 九州大学大学院 Kyushu University

**Abstract:** We propose a new 3D modeling method using deformation of real objects scanned by range finders. A 3D object obtained by the range finder is typically represented as a triangle mesh representation (a set of polygons) in the computer. First, we show a method for transforming such 3D polygon data into a 2D gray scale image format using Fourier series. Then, the proposed method allows users to easily perform some 3D geometric operations such as deformations, shape blending and texture mapping by editing and retouching the corresponding 2D image. A method called interactive evolutionary computation (IEC) is adapted to realize the method. The users can easily find a new 3D model easily.

# 1. はじめに

コンピュータの高速化とソフトウェアの高機能化により、コンピュータグラフィックス(Computer Graphics)技術は、ゲームや遠隔教育などの多くの分野で活用されている。これに伴い、3次元コンピュータグラフィックスで利用するモデル形状の造形操作を容易に行なうことができる手法やツールの開発に対する要望が高まっており、これまでに多くの研究がなされている[1].しかしながら、3次元モデルのデザインに関しては、ユーザの意図したものを簡単に実現する機能は必ずしも充実しているとはいえない。

レンジファインダで計測した 3 次元計測値は、 通常、三角形メッシュ(ポリゴンの集まり)と してその形状が表現される。三角形メッシュを して得られた物体形状を幾何モデルに変換まる 手法も数多く提案されてきたが、得られたモデルに造形や変形操作を施すことは、いまだに困難である。そこで、本研究では、図 1 に示すと ずに、レンジファインダで計測したポリゴるように、レンジファインダで計測したポリリーを が元を輪切りにして 3 次元モデルを表現することにより組んでいる[2]。本手法では、各輪切りな変形操作を実現しているが、このモデルのな形操作を実現しているが、このモデルの変形が可能であるということが挙げられる。

本論文では、このモデルを利用した 3 次元モデルの作成方法について述べる。本手法では、ユーザが選択した 3 次元モデルに対して、様々な画像処理を組み合わせることにより、多様な変形を実現する。さらに、曖昧で主観的なユーザの好みに柔軟に対応することができるように対 話 型 進 化 計 算 (Interactive Evolutionary Computation、以下 IEC) を利用する[3]. このよ

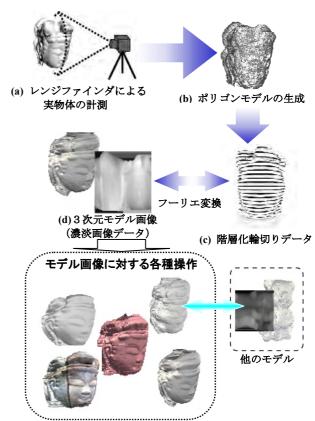


図1 モデル画像による造形操作

うに、3次元モデルに様々な変形や着色を行なうことにより所望する3次元モデルを直観的に 作成することができる.

# 2. 3次元モデル

# 2. 1. 3 次元モデル

本手法では、図1 (c) のようにポリゴンで表現された3次元モデルを、等間隔に輪切りにすることにより、2次元輪切り線(断面図)の積み重ねとして扱うことができる.以下に輪切り線への変換アルゴリズムを述べる.

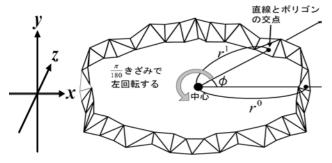


図2 輪切り処理

- (1) 3次元データの中心軸を決定し、その軸がx-z平面に垂直になるようにモデルを回転する。任意の $y_i$ について、すべてのポリゴンから $Y=y_i$ 平面と交差するポリゴンを取り出す。
- (2) 図 2 に示すように,反時計回りにきざみ角  $\phi$  ずつ回転する直線と(1)で取り出した ポリゴンとの交点を計算し,中心からその 交点までの距離 $r_i^k$  (k=0,1,…, $2\pi/\phi$ -1)を算出する.この処理によって得られた点を順に結んだものがY= $y_i$ 平面に対する輪切り面 (断面図)になる.この処理を輪切り線数m回繰り返す.

輪切りにより、3次元データは $2\pi/\phi$ 個の距離データ $r_i^k$ を要素とするm個のベクトルの集合として表現される.

### 2. 2. モデル画像

積層されたフーリエ輪切り面で表現された3次元データは,図 3 に示すように各輪切り面を表すi成分( $0 \le i \le m-1$ )とその復元きざみ角 $\gamma$  による回転を表すk成分( $0 \le k \le (2\pi/\gamma)-1$ )における距離値 $r_i^k$ を階調値とする 2 次元画像データとして捉えることができる.以後,図 3 の全ての距離データを256階調の濃淡値に変換したものをモデル画像と呼ぶ.図 4 にモデル画像の例を示す.なお,本手法で扱う全てのモデルについて,輪切り回数m=200,輪切りきざみ角 $\phi=\pi/360$ ,復元きざみ角 $\gamma=\pi/100$ ,フーリエ級数の最終項n=180である.したがって,モデル画像の解像度は, $200\times200$ 画素となる.また,対応する頂点が存在しない場合は,画素値を微小な一定値とする.

## 3. 造形操作

### 3.1. 画像処理を用いた造形操作

3次元モデルの各頂点とモデル画像中の各画素は一対一に対応する.したがって,モデル画像に対して,一般的なスムージングなどの画像処理がそのまま3次元モデルに適用できる.つ

### 復元きざみ角 γ による回転 (k γ だけ回転)

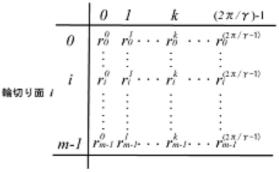
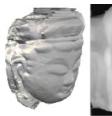


図3 モデル画像



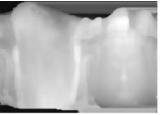


図4 モデル画像の例





(a) 元モデル









(b) スムージング

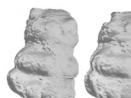
(c)エッジ強調

**図5** モデルの変形

まり、画像処理による3次元モデルの造形や変形操作が可能である。ここでは、平滑化に代表されるフィルタを適用する処理と算術関数を重ね合わせる処理について説明する。

### (1)フィルタの利用

スムージングやエッジ抽出においては、4近 傍や8近傍のフィルタが適用される. 本手法 においても、モデル画像に対して様々なオペレータが適用可能である. モデル画像に対して平滑化処理の1つであるメディアンフィルタを適用し、その結果を3次元モデルに反映させる. メディアンフィルタは、画像中の注目画素とその8近傍から求めた画素値の中央値を注目画素の新たな濃度値とするものであり、画質を損なわずに平滑化をすることができる. したがって、幾何形状を劣化させずにモデル表面の平滑化が可能となる. 図





 $\alpha = 0.25$ 

 $\alpha = 0.5$ 

 $\alpha = 0.75$ 

図6 モーフィング

5(a)のモデルに対してメディアンフィルタを5回適用した例を同図(b)に示す.

## (2)算術関数の利用

本手法では、モデルの各断面がフーリエ級数を利用して表現されているために各種の数学関数との親和性が高い(詳細は文献[2]を参照).例えば、モデル画像中の各距離値 $r_i^k$ にsin関数を重ね合わせることにより、図 5 (b)のように凹凸を強調する処理が可能である.

# 3. 2. モーフィング

複数モデルの混合やモーフィングの機能は、 形状デザインにおける強力な手段として多くの 手法が提案されてきた。モーフィングの実現に は複数モデル間で混合や補間演算のための幾何 学的な対応づけが必要であり、そのための有効 な手法の開発が大きな課題となっている。

本手法では、複数モデル間で同一の輪切り回数mと輪切りきざみ角 $\phi$ でのサンプリングが行なわれていれば、形状が全く異なるモデルに対して同一解像度のモデル画像が生成できる。そこで、両者の対応する画素間で補間演算を実行すれば、異なるモデル形状間で滑らかなモーフィングを容易に実現することができる。図6に示すモーフィングの例は、熊のモデル画像をF(i,j)、石仏のモデル画像をG(i,j)として以下の演算を施したものである。

$$H(i,j) = \alpha F(i,j) + \beta G(i,j)$$
 (ただし $\alpha + \beta = 1$ )

ただし、F(i,j)はモデル画像中の画素値を表す. さらに、モーフィングにおける画像間の対応は一意ではなく、自由に変化させることができるため、適当な対応づけにより多様なモーフィング処理を容易に実現することができる.





図7 テクスチャマッピング

# 3. 3. テクスチャマッピング

モデル画像中の画素に対して適当なRGB 値を対応させることにより、3次元モデルへの着色ができる。したがって、図7のようにモデルの色情報も画像の形式で表現される。さらに、色情報を適当なテクスチャ画像に変えることにより、テクスチャマッピングを容易に行なうことができる。また、モーフィングと同様にテクスチャ画像との対応付けを適宜変化させることにより様々なテクスチャを貼り付けることが可能である。

# 4. 対話型進化計算

本手法では、主観的なユーザのイメージに柔軟に対応できるように遺伝的アルゴリズム(GA)に基づくIECを利用する. IECは、遺伝子としてコーディングされた対象に対して、交叉、突然変異というGA操作を繰り返しながら、ユーザが各世代の遺伝子に適合度を直接与えることができ、計算機上では記述し難い問題解決を行なうことができる.

図8にIECの枠組みを示す。本手法では、3節で挙げた(1)画像処理、(2)モーフィング、(3)テクスチャマッピングと着色処理におけるパラメータ(処理を行なうか否かを含む)を遺伝子としてコーディングし、進化シミュレーションを進めていく、各世代では、遺伝子コードに従ってモデル画像に対する様々な処理が適用される。また、モーフィングを行なうための3次元モデルやテクスチャマッピングのためのテクスチャ画像などはあらかじめユーザが気に入ったものを与えておき、それらの選択操作もGAで実行する。

図9に本手法のインタフェースを示す。ユーザは気に入ったものに対して適当な適合度を与えることによりインタラクティブに所望する3次元モデルを作成することができる.

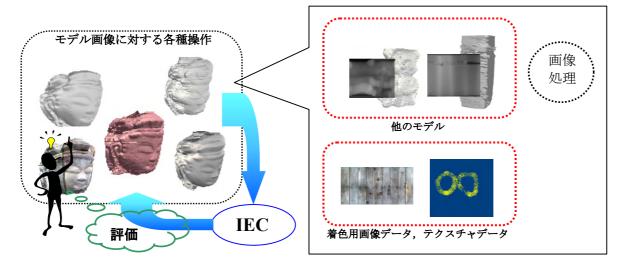


図8 対話型進化計算



図9 インターフェース

### 5. おわりに

本論文では、3次元モデルを画像として捉え、 それらに対して様々な処理を適用することによ り新たな3次元モデルを作成する手法について 述べた. 利用者がレンジファインダで取り込ん だ3次元モデルを素材としたデザインや3次元 モデルを用いたモンタージュシステムへの応用 など、3次元CG作成の経験や技能をさほど必要 としない新たなモデリング手法として有効であ る. 造形操作の制御にIECを導入することにより, ユーザの意図を即座に反映することができる柔 軟な手法を構築することができる. また、GA独 特の突然変異などの考え方により, ユーザにと って予期できない形状の出現が期待できる. ま た,本手法ではレンジファインダで取り込んだ 3次元形状を素材として3次元モデルの作成を 行なっているが、IECにより全く新しい形状を作 成する手法にも取り組んでおり、有効な成果を 得ている[4].

今後の課題として、モデルの表現能力の向上 があげられる.現状では、輪切り線の距離値が 定まらない場合(断面が開曲線)や逆に距離値 が複数存在する場合(ドーナツ形や凹凸の激し い複雑な曲線等)には、本手法が適用できない. 現在では簡略化した各モデルに対して変形を行なうといった手法の開発を検討している.

さらに、本手法を実際の3次元モデルのデザインに適用し、詳細な評価を得る必要がある. その評価を基に市販の画像処理ツールとの併用に有効な機能を付加することも重要である.また、提案手法とFFD[1]などの3次元直接変形を組み合わせた新しい造形環境の構成法についても検討していきたい.

# 参考文献

[1] Thomas W. Sederberg and Scott R. Parry: Free-Form Deformation of Solid Geometric Models, Proc. ACM SIGGRAPH'86, pp.151--160, 1986.

[2]稗田正樹,賀川経夫,西野浩明,宇津宮孝一:フーリエ級数を利用した3次元データ表現法とその応用-2次元画像フィルタによる3次元モデル造形法-,情報処理学会論文誌,Vol.44,No.11,pp.2873-2883,2003.

[3] H.Takagi, Interactive evolutionary computation: Fusion of the capacities of EC optimization and human evaluation, Proc. IEEE, vol. 89, no. 9, pp.1275--1296, 2001.

[4] 西野浩明,高木英行,宇津宮孝一:対話型進化計算を用いた創作支援型3次元モデラ,電子情報通信学会論文誌,Vol.J85-D-II,No.9,pp.1473-1483,2002.

# 連絡先:

賀川 経夫

大分大学工学部知能情報システム工学科 〒870-1192 大分県大分市旦野原 700 番地 Phone: 097-554-7877 / FAX:097-554-7886

E-mail: kagawa@csis.oita-u.ac.jp

# 画像処理を用いた実サッカー映像の抽象化 A Real Soccer Movie Abstraction with Image Processing Support

大城英裕 \* 山崎一城 \* 橋本賢一 \* 大崎保彦 \* Hidehiro Ohki \* Kazuki Yamasaki \* Kenichi Hashimoto \* Yasuhiko Ohsaki \* 井上誠喜 \* \* 藤田米春 \*

Seiki Inoue\*\* Yoneharu Fujita\*
\* 大分大学工学部 \*\*NHK 放送技術局番組送出センター
\*Oita University \*\*Japan Broadcasting Corporation

Abstract: We propose a method for "abstraction of soccer game" which presented soccer event and its various representations. The proposed method consists of estimation of player's position, event selection of play and its visualization. Our estimation of player's position allows for flexible camera movement and angle such as zooming in and out, pan, tilt and yaw. The reliable and robust estimation is based on image analysis by synthesis and Generalized Hough Transform(GHT). Also we classified soccer play events and annotate the game scenes using distance between players and ball. We demonstrate the applicability of these estimation and annotation scheme via visualization of animation character's behavior from the results.

### 1 はじめに

我々は、スポーツ競技をデジタル化し、あらゆる観点から観察できる映像システム(デジタルスコアブック)の構築を目指している。本稿では、サッカー競技を対象とし、デジタルスコアブック生成過程における一連の方式、複数カメラ環境下での画像処理支援を受けての、(1) 画像中での選手・ボールの位置抽出、(2) 画像中の選手位置とキャリブレーション結果からの選手のコート上での位置推定、(3) 選手・ボール位置に基づくボールパス、シュートなどのプレーイベントタグの映像への付加、そして、(4) 競技を効果的に見せるために、抽象化された競技のプレーデータからのアニメーション生成について述べる。

### 2 選手の位置推定

サッカー競技の戦術解析を行う場合,選手の位置情報は必要不可欠である.ここでは,競技映像での選手の2次元座標を抽出し,3次元空間での選手位置情報を求める.映像中の選手の追跡は,領域評価法[1]で抽出した選手領域を正規化相関法を用いて追跡する.選手の追跡が失敗した場合は,手動でテンプレートを再設定する.次に,得られた画像中の選手位置と予め求めていたカメラキャリブレーション情報を用いて,選手の3次元位置は,選手の足元がフィールドの上にあるという拘束条件を用いて求める.

$$\mathbf{X}_{n} = \mathbf{M}_{(i\,n)}^{1} \mathbf{P}_{(i\,n)}^{1} \mathbf{x}_{(i\,n)}$$
 (1)

$$^{\top}\mathbf{X}_{n} = 0$$

ここで,式 (1) に,カメラi における n フレーム目の 2 次元画像上の点の斉次座標  $\mathbf{x}_{(i\,n)}=(x_{(i\,n)},y_{(i\,n)},1)^T$  と 3 次元世界の斉次座標  $\mathbf{x}_{n}=(o_n,y_n,z_n,1)^T$  を示す. $\mathbf{P}$  は,線形歪みを考慮した透視変換行列であり, $\mathbf{M}$  は並進及び回転行列である. $\mathbf{M}^{-1}$  及び  $\mathbf{P}^{-1}$  はカメラの並進及び回転行列の逆行列である.

列の逆行列である. はフィールド平面である. 各逆変換行列  $\mathbf{M}_{(in)}^{-1}$ ,  $\mathbf{P}_{(in)}^{-1}$  は,実際の3次元空間のフィールド上のラインの交点と画像中ラインの交点と対応させ,一般化  $\mathbf{Hough}$  変換 ( $\mathbf{GHT}$ ) を用いて求める.なお,3次元空間のフィールド上のライン交点と画像中のライン交点の対応,ならびに,3次元空間でのフィールド上のラインの交点の3次元座標,カメラ位置座標,フォールド面,カメラの向きならびにカメラアングルは実測値を用いるが測定誤差のため補正が必要である.また,カメラの向きならびにカメラアングル,レンズ歪みは未知である.

### 3 アニメーション化

以上のようにして求めた選手の位置情報を効果的な映像を制作するため,以下のルールに基づいて CG を用いて選手をアニメーション化する.1) 選手やボールの位置は,デジタルスコアブックのデータを用い、2) シーンの中心はボールであり,ボールの大きさはカメラからの距離に応じて変化し,3) 選手は,アバタとなり,数字のキャラクターで表現され,4) そのアバタは常にボールに向いている.



図 1: 入力映像

カメラワークはユーザが任意に設定する.

### 4 実験

大分県別府市 b-con plaza (ビーコンプラザ)の コンベンションホールにおいて,大分大学サッカー 部現役,OB混成チームによるサッカーのミニゲー ムを収録した、コートの側面からアングル固定撮 影をした映像に加えて,左手ゴール後方から撮影 した映像を用いた.図1にコート側面から撮影した 映像を示す、二台のカメラの誤差の少ない水平方 向の値を組み合わせて,選手の3次元位置を求め, アニメーションを生成した.図2(a)にミニコート でのアニメーションの例を示す.また,実際のサッ カーの試合を首振りズームカメラにより撮影した 映像を用いて、フルコートでの選手の位置推定も 行い,アニメーション生成を行った.図2(b)にそ のアニメーションの例を示す、ミニコート、フル コートのサッカーの試合において,選手の位置が 画像中で正しく抽出できれば,床面拘束を使って どの視点からでも試合の様子を再現可能である. 5 まとめ

有効利用できるシステムの構築を目指したデジタルスコアブックの実現が最終的な目標であり,本稿では,競技映像からの選手の位置推定と,アニメーションによる効果的な情報提示を提案した.現実のデータに基づいたものではあるが,アバタに他の動作を付けることで,現実は異なった映像生成も可能である.これは,実際のサッカーの試合が本システムにより抽象化されたことを示唆している.画像上での選手追跡の精度と処理速度の向上とともに,動作認識を取り入れ,実際のプレー

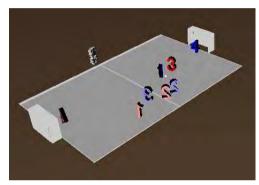
本研究では、サッカー競技における戦術解析に

# 参考文献

の課題である.

[1] 橋本,大城,井上,藤田:上半身領域に着目したサッカー選手の位置推定,2002年度電子

に近い動作をアニメーション化することが,今後



(a) ミニコート



(b) フルコート

図 2: アニメーション生成

情報通信学会九州支部学生会 講演会論文集,D-03, 2002.

### 連絡先

## 大城英裕

大分大学工学部知能情報システム工学科 〒 870-1192 大分県大分市大字旦野原 700 番地

Phone & FAX: 097-554-7882 email: ohki@csis.oita-u.ac.jp

# 一対比較法を利用したファジィ積分の入力値の同定

An identification method of fuzzy integrals' input values using pairwise comparisons

# 高萩栄一郎 (専修大学)

Abstract— We propose an identification method of the fuzzy integrals' input values using pairwise comparisons. In many cases, the comparison words used by AHP are assigned fixed values. Our experiments show that the correspondence table between the comparison words and the comparison values change in different cases. Input values of Choquet integral should have same evaluation unit among all input values. In our methods, examinees reply comparison words, ideal points and satisfaction points. By varying the correspondence table, we make satisfaction points' weights same values among all inputs.

## 1 はじめに

n 個の評価対象,m 個の評価基準での個別評価値を求める.総合評価値は,ファジィ測度を求め,ファジィ積分(主にショケ積分)で行う.このとき,各個別評価値(ファジィ積分の入力値)を一対比較を使って同定する方法を考察する.

本研究のきっかけとなった課題は,ファジィ積分を使ったデータ検索システムの各評価基準の評価値をどのように同定するかである.個別評価値は,利用者の希望条件とデータベースに記憶された値から求める.例えば,家賃の希望条件が 70,000円で,あるレコードの家賃が 71,000円のとき,そのレコードの家賃の個別評価値を求める.AHP などで用いられる一対比較法を用いる.各評価基準の個別評価値が取りうる値を定義域とするメンバーシップ関数を求めることでもある.

一対比較法を用いてメンバーシップ関数を求める方法は,吉川 [6],中村 [4] によると,比較評定法のなかの比率評定法に分類されている.AHP を利用している方法としては,例えば,竹田 [2] では,AHP の一対比較法で,重要度を求め,メンバーシップ関数を同定している.また,中村 [4] は,メンバーシップ関数の同定に一対比較を用いるとき,「固有ベクトルのスケーリングの問題が存在する」としている.

本稿では,次の点を中心に考察を行う.

- AHP の「ことばと一対比較値の対応表」(表1)で,「その中間」を含めて1間隔の数値を割り当てている.その数値差は状況に依存することを実験により示した.
- ファジィ積分の入力値の条件を満たし,かつ (1)の数値
   差の値を含めて,入力値を同定する方法を提案する.
- ◆ 本稿では、メンバーシップ関数の定義域が連続値であるとき、メンバーシップ関数を Logit 曲線に近似する方法を提案する。

# 2 一対比較値は可変

表 1 の AHP の列は , AHP で使われることばに対する一対比較値である.この値は , 状況などにより , 利用者が持っている値が異なるのではないかと考え , 表右の等差的 , 等比的な間隔で , 公差 (s) や公比 (r) を変化させる.

表 1 ことばと一対比較値の対応表([1]のことばを利用)

ことば	АНР	等差	等比	番号
	AIII	s:公差	r:公比	$c_{ij}$
絶対的によくない	1/9	1/(1+8s)	$1/r^{8}$	-8
÷ :	:	:	:	:
おなじくらい	1	1	1	0
(その中間)	2	1+s	$r^2$	1
若干よい	3	2+s	$r^3$	2
:	:	•	:	:
絶対的によい	9	1 + 8s	$r^8$	8

そこで,刀根 [1] と同じ日本の道州 (IA) と関東地方の都県 (東京,神奈川,千葉,埼玉) (IB) の面積に関する一対比較のアンケートを 34 名に行った (詳細は,[7] を参照).

各人のそれぞれの一対比較から次の手順で,真の面積の割合にもっとも当てはまる s と r を求めた.等差的な場合と等比的な場合で求め方はほとんど同じであるので,\* は,s または r とする.

- (1) 一対比較結果を表 1 の番号の列の値を使い, 行列の形に まとめる.
- (2) s または r を固定して , 一対比較値を求める .

等差的 
$$a_{ij}=egin{cases} 1+sc_{ij} & c_{ij}\geq 0 \text{ の場合} \ \frac{1}{1-sc_{ij}} &$$
 それ以外の場合  $a_{ij}=r^{c_{ij}}$  (2)

(3)  $a_{ij}$  から一対比較行列を作成し,固有値法で,ウエイト

 $w_1, \ldots, w_n$  (n は代替案の数, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ ) を求める.

(4) 真のウエイト (面積の割合 , $w_1^+,\ldots,w_n^+,\sum_{i=1}^n w_i^+=1$ ) と (3) で求めたウエイトの差異の二乗和を求める .

$$d(*) = \sum_{i=1}^{n} (w_i - w_i^+)^2$$
 (3)

(5) (2) の s または , r を変化させて , 最小の d(\*) となる s または r を探す .

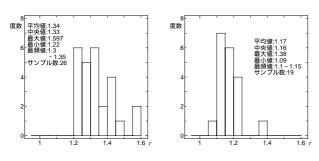


図 1 r の分布 (左 IA , 右 IB)

# 3 ファジィ積分の入力値

[5] で指摘したように,ショケ積分の入力値は次のような制約を満たしていなくてならない.

- 入力値は間隔尺度であること.
- ショケ積分の入力値は、その定義により、他の評価基準の入力値と減算をしている。そのため、他の入力値との大小関係(順位)も重要である。

このような関係を [5] では、「評価単位が等しい」と呼んでいる. また、効用理論では、「strong commensurability」と呼ばれている.

### 4 提案手法

#### 4.1 考え方

提案手法は,一対比較の対象である代替案に次の2点を含むようにする.

理想点 (I) ほぼ理想的な代替案.この点のメンバーシップ関数の値を  $e_{I}$  (例えば, 0.95 または 1.0) とする.

満足点 (G) 理想的ではないが,満足できる代替案.この点の メンバーシップ関数の値を  $e_G$  ( 例えば,0.7 または 0.8 ) とする. この他に,一対比較を行う代替案を  $3\sim5$  個用意する.各評価基準の理想点の満足度,満足点の満足度は同じになるように,理想点,満足点の代替案を選ぶ.たとえば,家賃が 6 万円のとき満足点で,駅からの時間が 12 分のとき満足点であるとすると,家賃 6 万円の満足度と駅からの時間が 12 分の満足度は等しいとする.

求め方は,理想点の満足度が  $e_I$ ,満足点の満足度が  $e_G$  になる s または r を定める.そのときのウエイトを各一対比較の代替案の満足度(メンバーシップ値)とする.

#### 4.2 各一対比較の代替案の個別評価値の求め方

ある適当な s>0 または r>1 に対して,次の手順で,各案の個別評価値を求める(\* は,s または r).

- (1) s または r に基づいて一対比較行列 A を作成し,最大固有値,それに対応する固有ベクトル  $(w_1,\dots,w_n$  ただし, $\sum_i^n w_i=1)$  を求める.
- (2) (1) で求めた理想点のウエイトを  $w_I$  とし, $t=e_I/w_I$  とし,各代替案のメンバーシップ値

$$w_i^* = w_i \times t, i = 1, \dots, n \tag{4}$$

を求める.

(3)  $w_1^*,\ldots,w_n^*$  のうち満足点の代替案の個別評価値を  $w_G^*$  とし,満足値  $e_G$  と比較する.

 $w_G^* > e_G$  s または r を増大させる . (1) へ戻る .

 $w_G^* < e_G$  s または r を減少させる . (1) へ戻る .

 $w_G^* = e_G$  このときの s または r を採用する .

実際には,2 分検索などで,満足点の個別評価値と満足値がほぼ一致する点を求める. $w_G^*=e_G$  のときの  $w_1^*,\dots,w_n^*$  を代替案のメンバーシップ関数の値とする.

### 5 定義域が有限離散集合の場合

メンバーシップ関数の定義域が有限離散集合でかつ,要素の数が比較的少数(おおよそ7以下)の場合,§4.2で示した方法でできる.定義域の要素をそのまま,一対比較の代替案ににする.通常,もっともよい代替案を理想点とし,それ以外の代替案で,満足できる代替案,複数ある場合は,満足できる代替案のうち,もっとも満足度が低い代替案を満足点の代替案とする.

定義域の要素が比較的多い場合(おおよそ 100 個くらいまで),一対比較を行うことは事実上不可能である.一対比較を行わず,直接評価 – 「とてもよい,よい,すこしよい,普通,...,とてもよくない」の7段階評価など – を行うことが考えられる.しかし,ファジィ積分の入力値は,評価単位がすべてそろっていなくてはならない.すなわち,一対比較を行った評価基準と同様に比率に意味があること,理想点と満足点が他の評価基準と揃っていることが必要である.次のような方法を提案した.

- (1) 定義域の要素の中から,理想点と満足点ともっともよく知っている要素など基準となる要素,基準点を選ぶ.
- (2) 一対比較は,この基準点とのみ行う.すなわち,定義域の要素数 -1 回行う.

- (3) 理想点の値が  $e_I$  , 満足点の値が  $e_G$  になる r(または s) を調整する .
- (4) このr(またはs)と基準点の一対比較結果から各要素の満足度を求める.

各要素の満足度は1回の比較で決まるので,多重比較に比べて信頼度が低い.そこで,準基準点を設けて,一対比較を多重化する必要があることもある.

有限個でも,要素の数が多く上記の部分的な一対比較ができない場合,満足度に影響する数値的な属性から, $\S6$ で説明する連続値から求める方法を利用する.

## 6 連続値の場合

連続値型とは,メンバーシップ関数の定義域が実数または実数区間のものをいうことにする.

一対比較でメンバーシップ関数を同定する方法としては,次のような方法がよく使われる(竹田[2]).

- (1) 定義域から適当な点を選択し代替案とする.
- (2) 代替案間の一対比較を行い,固有値法などでウエイトを求める.
- (3) 最大の代替案のウエイトが1になるように正規化する.
- (4) 各代替案のウエイトを直線で結び,メンバーシップ関数とする.

本稿では,他の評価基準との理想点,満足点を揃え,関数形に当てはめる.関数形は,Logit 曲線と直線を使用する.

関数の形状は,次の3つを考える.

理想方向型 ある方向  $(+ \pm t t t - )$  に値が行けば行くほど , メンバーシップ関数の値が大きくなる ( 図 2 ) . たとえば , 価格のように安ければ安いほどよいと考えた場合の メンバーシップ関数である .

理想点型 ある 1 点がもっともメンバーシップ値が高いメンバーシップ関数である ( 2 3 ). たとえば , 最適な室温があり , それより高くなっても低くなっても単調に減少する関数である .

理想区間型 理想点型の理想点を区間にしたものである.たと えば , 青年のメンバーシップ関数のように , ある区間で メンバーシップ値がほぼ 1 のものである .

メンバーシップ関数には, Logit 曲線

$$y = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha - \beta \log x)} \tag{5}$$

 $(\alpha, \beta$  はパラメータ) または,線型

$$y = ax + b \tag{6}$$

(a, b はパラメータ)を用いる. logit 曲線は,

$$\log(\frac{y}{1-y}) = \alpha + \beta \log x \tag{7}$$

という  $\log x$  と  $\log(\frac{y}{1-y})$  とをデータにして , 線型回帰モデルで推定する .

#### 6.1 理想方向型

理想方向型は,1 つの Logit 曲線または線型の関数で表現できる.希望家賃が 10 万円の場合の家賃 (0 < x) の満足度を表すメンバーシップ関数を例に説明する.評価基準全体で,理想点の満足度  $e_I$  を Logit 曲線では 0.95,線型では,1.0 で揃える.満足点  $e_G$  を 0.7 にそろえるものとする.また,一対比較値は,等比的に割り当てるとする.

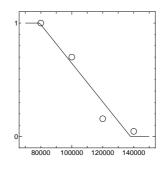
- (1) 一対比較を行う代替案を設定する.家賃の例では,10 万円が希望なので,その家賃で借りることができれば満足なので,満足点を 10 万円。8 万円で借りることができれば理想的として 8 万円を理想点とした.2 点以外にも,多少不満な部分のメンバーシップ値を求めるために,12,14 万円を代替案に加えた.
- (2) 一対比較を行う.家賃の例では,4つの代替案間で,10 万円が希望という条件の下で一対比較を行う(表2).
- (3)  $\S 5$  と同様に ,  $w_I^* = e_I$  ,  $w_G^* = e_G$  になる r を同定する .
- (4)  $y_i=w_i^*$  として,表 3 を求め,回帰分析より,線形の場合 a=-0.0000170, b=2.349,Logit 曲線の場合  $\beta=-9.91, \alpha=114.8$  となる.図 2 は,それぞれの場合のグラフである.

$c_{12}$	$c_{13}$	$c_{14}$	$c_{23}$	$c_{24}$	$c_{34}$
-5	-6	-8	-6	-5	-2

表 2 家賃の一対比較

NO(i)	1	2	3(G)	4(I)
x	140000	120000	100000	80000
線形 $y_i$	0.0459	0.1571	0.7000	1.0000
Logit $y_i$	0.0782	0.2107	0.7000	0.9500
$\log(x)$	11.850	11.695	11.513	11.290
$\log(\frac{y}{1-y})$	-2.4669	-1.3206	0.8473	2.9444

表 3 家賃の例



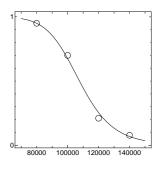


図 2 家賃のメンバーシップ関数 (左:線形,右:Logit)

また,それぞれの同定結果から,データと推定点の差の 2 乗和を計算すると,線型では 0.0317,Logit 曲線では 0.0026 になる.

### 6.2 理想点型

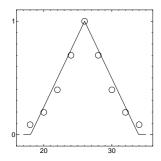
理想点型の場合,理想点の左側の曲線と右側の曲線を別個に 同定する.別個に同定する場合,理想点は左右共通にし,その 他の点は別個に一対比較の代替案を選択する.夏の適当な室温 の満足度の同定では,右側のための {26,28,30,32,34},左側の ための  $\{26, 24, 22, 20, 18\}$  を使う.

理想点型の場合,同定したメンバーシップ関数が,点 $(x_I,e_I)$ を通ることが重要なことが多い.しかし,回帰分析の場合,点  $(x_I, e_I)$  を多少外すことがある.そこで,回帰分析を行うとき,  $(x_I,e_I)$  を必ず通るように、パラメータを同定する、線型の場 合 , $y_I = ax_I + b$  ,Logit 曲線の場合  $\log(\frac{y_I}{1-y_I}) = \alpha + \beta \log(x_I)$ という制約をつけて , (a,b) または (lpha,eta) を推定する . この場 合,次式でパラメータを推定する.

$$a = \frac{\sum \{(x_i - x_I)(y_i - y_I)\}}{\sum (x_i - x_I)^2}$$
 (8)

$$a = \frac{\sum \{(x_i - x_I)(y_i - y_I)\}}{\sum (x_i - x_I)^2}$$
(8)  
$$\beta = \frac{\sum \{(\log x_i - \log x_I)(\log \frac{y_i}{1 - y_i}) - \log \frac{y_I}{1 - y_I}\}}{\sum (\log x_i - \log x_I)^2}$$
(9)

理想点型の場合,左右対称の場合と非対称の場合が考えられ る.対称の場合,片方のみ同定すればよいので,片側のみ一対 比較を行う.非対称の場合,左右別々に同定する.図3は,左 右対称での快適な室温についてのメンバーシップ関数の同定結 果である.



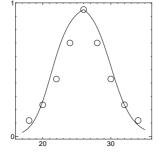


図3 夏の快適な室温 (左:線形,右:Logit)

### 6.3 理想区間型

理想区間型の理想点との違いは次の点である.

- 理想点は,左右別々に選択する.左の理想点は,台形の 上底の左端,右の理想点は上底の右端に相当する.
- 同定する曲線は,理想点を必ず通る必要はない.
- ullet 図 4 のように  $e_I$  の値を越えることがある.

図4は,左右非対称の場合の例で,「青年」のメンバーシップ関 数である.理想点は,18と28である.

### 7 おわりに

理想点と満足点の選択と一対比較を利用して,ファジィ積分 の入力値を同定する方法を提案した.しかし,さまざまな問題 が残っている。

● 理想点と満足点の選択や代替案の選択でメンバーシップ

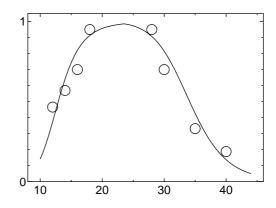


図 4 青年のメンバーシップ関数 (Logit)

関数の形状がほぼ決まってしまうのではないだろうか?

- 理想点,満足点の値の設定, e<sub>I</sub>, e<sub>G</sub> の設定は,どのよう な影響があるのであろうか?
- 求められたメンバーシップ関数から求めたファジィ積 分の入力値は,きちんとその条件を満たしているだろ うか?

ファジィ積分の入力値の同定という面から,一対比較を使った メンバーシップ関数の同定を再度,検討して見る必要があるだ ろう.

# 参考文献

- [1] 刀根薫,「ゲーム感覚意思決定法 AHP 入門 -」, 日科技 連出版社,1986.
- [2] 竹田英二, ファジィ理論と AHP, 「社会科学の数理 ファ ジィ理論入門」, pp.235-248, 裳華房, 1994.
- [3] 中島信之、「人の主観を生かした意思決定法 AHP と ISM - 」, 未公刊
- [4] 中村和男,メンバーシップ関数の測定諸手法の関連につい て,第2回ノンエンジニアリングファジィワークショップ 講演論文集, pp.66-67, 1992.
- [5] 高萩栄一郎,室伏俊明,ファジィ測度の同定について,第 5 回インテリジェント・システム・シンポジウム (FAN Symposium '95) 講演論文集,日本ファジィ学会,pp. 463-468, 1995.
- [6] 吉川歩,ファジィ評定とメンバーシップ関数同定法,日本 ファジィ学会誌,10,2,pp. 184-192,1998.
- [7] 高萩栄一郎,一対比較法を利用したファジィ積分の入力値 の同定,第8回曖昧な気持ちに挑むワークショップ講演論 文集,CD-ROM, 2003.

### [問い合わせ先]

〒214-8580 神奈川県川崎市多摩区東三田 2-1-1 専修大学商学部 高萩 栄一郎 TEL:044-900-7988 FAX:044-900-7849 e-mail:takahagi@isc.senshu-u.ac.jp

# 主観に基づいた時系列的個人内評価

# Individual time series evaluation with subjective views in school education

佐藤 博
Hiroshi Sato
福岡県立小倉工業高等学校
Fukuoka prefectural
Kokura Technical High

矢鳴 虎夫 Torao Yanaru 東亜大学 Toua University

**Abstract:** This paper shows how to measure the student's behavior that is invisible in school by using a subjective observation model.

## 1. はじめに

学校生活を地道に努力している生徒の行動を 評価し、生徒の励みにするため、目立ちにくい 行動の評価を主観観測モデルを用いて測定する ことを提案する。

School

# 2. アフィン写像の一般的定義

生徒の行動の主観的な評価をする際の理論的 基礎として、アフィン写像の一般的な定義から 紹介する。

二つの空間 $\left(X_1,V_1^n
ight)$ と $\left(X_2,V_2^m
ight)$ において $\left(X_1,V_1^n
ight)$ から $\left(X_2,V_2^m
ight)$ へのアフィン写像とは,

( )基礎集合の間の写像

$$f: X_1 \to X_2$$

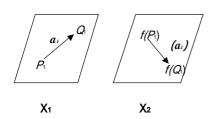
( )ベクトル空間の間の線形写像

$$\varphi: V_1^n \to V_2^m$$

の組 $(f, \varphi)$ で  $f \ge \varphi$  との間に等式

$$f(P_1 + \vec{a}_1) = f(P_1) + \varphi(\vec{a}_1)$$

が、任意の $P_1\in X_1, \vec{a}_1\in V_1^n$  に対して成り立つものをいう。ここに、 $V_1^n$  はn 次元ベクトル空間, $V_2^m$  はm 次元ベクトル空間を表す。



 $P_1+\vec{a}_1=Q_1$  とおくとき ,  $\vec{a}_1=\overline{P_1Q_1}$  だから  $f(Q_1)=f(P_1)+\varphi(\overline{P_1Q_1})$  となる。 さらに、  $\overline{f(P_1)f(Q_1)}=\overline{\varphi(P_1Q_1)}$ となる。以上が、アフィン写像の一般的定義である。

## 3. 主観観測ベクトル及び主観観測ベクトル対

アフィン写像の定義により空間 $\left(X_1,V_1^n
ight)$ の中の任意のベクトルを

$$\vec{\varsigma} = \varsigma_1 \overrightarrow{e_1} + \varsigma_2 \overrightarrow{e_2} + \cdots + \varsigma_n \overrightarrow{e_n}$$

$$\vec{\eta} = \eta_1 \overrightarrow{e_1} + \eta_2 \overrightarrow{e_2} + \cdots + \eta_n \overrightarrow{e_n}$$
とする。ただし, $P_1 \in X_1, \vec{\varsigma}, \vec{\eta} \in V_1^n$  で,
$$P_1 + \vec{\varsigma}, P_1 + \vec{\eta} \circ P_1$$
を省略している。このとき,同じ空間 $(X_1, V_1^n)$ の中の任意のベクトル

 $\vec{a} = a_1 \vec{e_1} + a_2 \vec{e_2} + \dots + a_n \vec{e_n}$  は線形写像  $\varphi$  を次のように定義することにより 2 次元平面  $\left(X_0, V_0^2\right)$ に写像される。ここで, $V_1^n, V_0^2$  は内積ベクトル空間を表す。いま,  $\varphi(\vec{e_i}) = \left(\vec{\varsigma} \cdot \vec{e_i}\right) \vec{O_1} + \left(\vec{\eta} \cdot \vec{e_i}\right) \vec{O_2} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$ 

のように定義すると $(e_1, e_2, \cdots, e_n)$ が、正規直交規定であることから

 $R\left(\overrightarrow{\varsigma},\overrightarrow{e_i}\right) = \overrightarrow{\varsigma} \cdot \overrightarrow{e_i} = \varsigma_i \ , R\left(\overrightarrow{\eta},\overrightarrow{e_i}\right) = \overrightarrow{\eta} \cdot \overrightarrow{e_i} = \eta_i$  となる。ここに, $R\left(\bullet,\bullet\right)$ は二つのベクトルの関係(Relation)を表す。従って,  $\varphi\left(\overrightarrow{e_i}\right) = \varsigma_i \overrightarrow{O_1} + \eta_i \overrightarrow{O_2}$  と書き直せる。このこと

から任意のベクトル 
$$\vec{a}$$
 に対しても
$$\varphi(\vec{a}) = \varphi(a_1 \vec{e_1} + a_2 \vec{e_2} + \dots + a_n \vec{e_n})$$

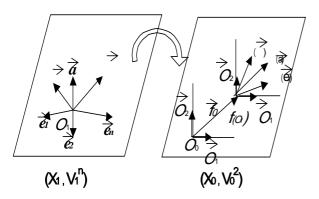
$$= \sum_{i=1}^{n} a_i \varphi(\vec{e_i})$$

$$= \sum_{i=1}^{n} a_i (\varsigma_i \vec{O_1} + \eta_i \vec{O_2})$$

$$= \left(\sum_{i=1}^{n} a_{i} \varsigma_{i}\right) \overrightarrow{O_{1}} + \left(\sum_{i=1}^{n} a_{i} \eta_{i}\right) \overrightarrow{O_{2}}$$

$$= \left(\overrightarrow{\varsigma} \cdot \overrightarrow{a}\right) \overrightarrow{O_{1}} + \left(\overrightarrow{\eta} \cdot \overrightarrow{a}\right) \overrightarrow{O_{2}}$$

と表せる。以上のことから空間 $(X_1,V_1^n)$ から任意に取り出される 2 つのベクトル $(\vec{\varsigma},\vec{\eta})$ をもって,空間上のすべてのベクトルを 2 次元の観測平面 $(X_0,V_0^2)$ に写像することができる。これらの $\vec{\varsigma},\vec{\eta}$ を各々主観観測ベクトルと呼び, $(\vec{\varsigma},\vec{\eta})$ の組を主観観測ベクトル対と呼ぶ。



ここでは,上の図で, $f(O_1)=O_0$  として以下の議論をすすめる。これは,教師が,すべての評価対象の生徒を公平にみていることに相当する。

### 4.学校教育における主観的評価の例

さて,生徒 $\overline{s_i}(i=1\sim n)$ に対して、地道な活動を一年間してきたと認められる生徒を表彰することを考える。真理探究賞,質実剛健賞,勤労努力賞の三賞を設け,真理探究賞にふさわしい理想的な生徒を $\overline{g}$ ,質実剛健賞にふさわしい理想的な生徒を $\overline{g}$ ,勤労努力賞にふさわしい理想的な生徒を $\overline{g}$  。この2つのベクトルの組を主観観測ベクトル対と呼ぶ。

ここでは, $(\vec{\varsigma},\vec{\eta})$  , $(\vec{\eta},\vec{\theta})$  , $(\vec{\theta},\vec{\varsigma})$ の3組が考えられるが,いま,10人の生徒 $\vec{s_i}(i=1\sim10)$ の $(\vec{\varsigma},\vec{\eta})$ の主観観測ベクトル対をもって評価することを考える。

三賞の評価基準項目としてそれぞれ 5 項目  $c_i(i=1\sim5)$ を考える。

これらの評価基準項目は互いに独立な項目として取り扱う。

評価基準項目の例を表1に示す。

	→ 真理探究賞 <i>S</i>	$_{ m \oplus}$ 質実剛健賞 $\eta$	勤労努力賞 $\overset{ ightarrow}{ heta}$
C <sub>1</sub>	授業に積極的	挨拶がよい	クラスの仕事を責 任をもって行った
C <sub>2</sub>	に出場	カー	サタデースマイルひ ろば運動に協力
C <sub>3</sub>	産業教育フェアに 出展・参加	応援団	中学生体験入学の 指導員をした
C <sub>4</sub>	多数の資格取得		委員会活動を着実 に行った
C 5	その他ものづくり等 に携わった		美化ボランティア活 動等に参加

表 1

まず,真理探究賞にふさわしい理想的な生徒と質実剛健賞にふさわしい理想的な生徒を教師の主観により決定し,コード化する。各評価基準項目  $c_i(i=1\sim5)$ を  $0.00\sim1.00$  の範囲でコード化し,これをイメージコードと呼ぶ。こうして作成したイメージコード表を表 2 に示す。

評価基準項目	$\overrightarrow{\varsigma}$	$\stackrel{ ightarrow}{\eta}$
C 1	0.80	0.90
C 2	0.60	0.60
C 3	0.50	0.70
C 4	0.60	0.60
C 5	0.80	0.90

表 2

表 2 は,真理探究と質実剛健という評価項目に対する各評価基準項目  $c_i(i=1\sim5)$  の寄与の度合いを 1.00 を理想として,主観的にコード化したものといえる。

次に、10人の生徒について真理探究賞について評価した例と質実剛健賞について評価した例をそれぞれ表3,表4に示す。

直理探究當

<del>兵</del> 在1水九貝					
	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
S <sub>1</sub>	0.5	0.0	0.0	0.0	0.2
S <sub>2</sub>	0.8	0.0	0.5	0.0	8.0
S <sub>3</sub>	1.0	1.0	1.0	0.0	0.9
S <sub>4</sub>	0.6	0.0	0.0	0.0	0.5
S <sub>5</sub>	8.0	0.0	0.5	0.0	8.0
S <sub>6</sub>	0.5	0.0	0.0	0.0	0.4
S <sub>7</sub>	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2
S <sub>8</sub>	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2
S <sub>9</sub>	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3
S <sub>10</sub>	1.0	1.0	1.0	0.0	0.9

表 3

# 質実剛健賞

	C <sub>1</sub>	$C_2$	$C_3$	C <sub>4</sub>	$C_5$
S <sub>1</sub>	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0
S <sub>2</sub>	0.8	0.3	1.0	0.0	1.0
$S_3$	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0
$S_4$	0.1	0.9	0.0	1.0	0.0
S <sub>5</sub>	0.8	0.5	0.0	0.0	1.0
$S_6$	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
S <sub>7</sub>	0.2	0.4	0.0	1.0	0.0
S <sub>8</sub>	0.6	1.0	0.0	0.0	0.0
S <sub>9</sub>	0.5	0.6	0.0	1.0	0.0
S <sub>10</sub>	1.0	0.5	0.0	0.0	8.0

表 4

表 2 、表 3 、表 4 をもとに次の 5 次元ベクトルを定義する。

$$\vec{\zeta} = \zeta_1 \overrightarrow{e_1} + \zeta_2 \overrightarrow{e_2} + \dots + \zeta_5 \overrightarrow{e_5}$$

$$\vec{\eta} = \eta_1 \overrightarrow{e_1} + \eta_2 \overrightarrow{e_2} + \dots + \eta_5 \overrightarrow{e_5}$$

$$\vec{s_i} = s_{i1} \overrightarrow{e_1} + s_{i2} \overrightarrow{e_2} + \dots + s_{i5} \overrightarrow{e_5} \qquad (i = 1 \sim 10)$$

ここに ,  $\overrightarrow{e_i}(i=1\sim5)$ は正規直交規定を表す。

いま,主観観測ベクトル対 $(\vec{\varsigma},\vec{\eta})$ をもって,各生徒の観測(評価)をすると,次式で表される。  $\varphi(\vec{s_i}) = (\vec{s_i} \cdot \vec{\varsigma})\overrightarrow{D_1} + (\vec{s_i} \cdot \vec{\eta})\overrightarrow{D_2}$ 

$$= \left(\sum_{k=1}^{5} s_{ik} \varsigma_{k}\right) \overrightarrow{O}_{1} + \left(\sum_{k=1}^{5} s_{ik} \eta_{k}\right) \overrightarrow{O}_{2}$$

右辺第 1 項の係数は真理探究賞の評価を,第 2 項の係数は質実剛健賞の評価を意味する。ただし, $\left(\overrightarrow{O_1},\overrightarrow{O_2}\right)$ は,直交規定を表す。右辺第 1 項と第 2 項を表にしたものを表 5 に示す。

	$ec{S}_i \cdot ec{arsigma}$	$ec{S}_{_i}\cdotec{\eta}$
	右辺第1項	右辺第2項
S <sub>1</sub>	0.56	0.27
$S_2$	1.53	2.50
$S_3$	2.62	1.20
S <sub>4</sub>	0.88	1.23
S <sub>5</sub>	1.53	1.92
S <sub>6</sub>	0.72	0.45
S <sub>7</sub>	0.24	1.02
S <sub>8</sub>	0.32	1.14
S <sub>9</sub>	0.48	1.41
S <sub>10</sub>	2.62	1.92

表5(1学期)

以上から , 時刻 t (1 学期 ) における  $\vec{s_i} \cdot \vec{\varsigma}$  を 横軸に  $\vec{s_i} \cdot \vec{\eta}$  を縦軸にしたグラフを図 1 に示す。 番号は生徒の番号を表す。

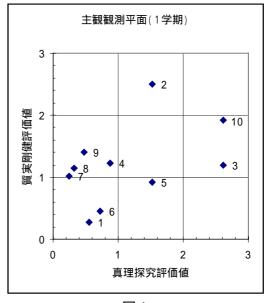


図 1

同様に、2学期、3学期の生徒を観測した結果をコード化した表を作成し、教師の主観で定めた表2のコードは時間によらず一定として計算すると、それぞれ表6、表7のようになる。

それらの表をもとに、主観観測平面を作成するとそれぞれ図2、図3のようになる。

	$\vec{S}_i \cdot \vec{\varsigma}$	$ec{S}_i \cdot ec{\eta}$
	右辺第1項	右辺第2項
S <sub>1</sub>	0.72	0.48
$S_2$	2.21	2.14
S <sub>3</sub>	2.22	1.2
S <sub>4</sub>	0.56	1.17
S <sub>5</sub>	1.53	1.47
S <sub>6</sub>	1.2	0.63
S <sub>7</sub>	0.4	1.78
S <sub>8</sub>	0.8	1.86
S <sub>9</sub>	0.4	1.41
S <sub>10</sub>	2.54	1.08

表6(2学期)

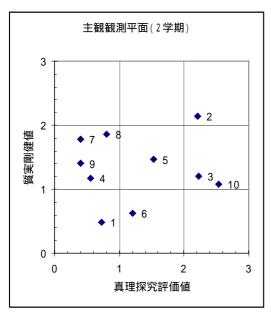


図 2

	$\vec{S}_i \cdot \vec{\varsigma}$	$ec{S}_i \cdot ec{\eta}$
	右辺第1項	右辺第2項
S <sub>1</sub>	0.88	0.69
$S_2$	2.05	1.54
$S_3$	2.38	1.2
$S_4$	0.96	1.32
$S_5$	1.53	0.78
$S_6$	1.2	0.96
S <sub>7</sub>	0.32	2.47
S <sub>8</sub>	0.72	0.66
$S_9$	0.8	1.41
S <sub>10</sub>	2.38	2.04

表7(3学期)

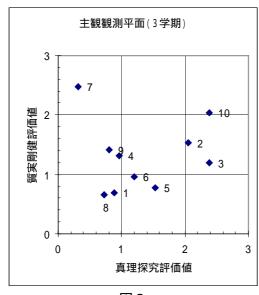


図 3

図1、図2、図3から10番の生徒は1年間を通して評価が高いが、1番の生徒は評価が低いということがわかる。他の生徒についても年間を通して評価がそのように変動しているかが、視覚的に把握でき、時系列的個人内評価が可能になる。つまり、学期はじめと比較してどの程度、行動が進歩したかを評価できる。生涯学習ではこのような評価法が適しているともいえる。

# 参考文献

[1]T . Yanaru : BASIC CONCEPT AND THEORY FOR SUBJECTIVE OBSERVASION MODEL ,AND THE APPLICABILITY TO CREATE A NEW MACHINE EQUIPTED WITH EMOTIONAL FUNCTIONS, Fifth IFSA World Congress(1993), 50-53

[2]河田:アフィン幾何·射影 幾何,岩波講座基礎 数学

[3]佐藤,矢鳴他:教育における主観的評価に関する研究,電子情報通信学会 信学技報,ET94-103(1994-12)

#### 連絡先:

佐藤 博

福岡県立小倉工業高等学校

〒803-0862 北九州市小倉北区白萩町 6-1

Phone 093-571-1738 Fax 093-581-6761 E-mail melodiesmaster@yahoo.co.jp

# ファジィノードファジィグラフを応用した教材系列分析

Instruction Cognition Analysis Applying Fuzzy Node Fuzzy Graph

上江洲 弘明 新海 公昭 山下 元 津田 栄 Hiroaki Uesu Kimiaki Shinkai Hajime Yamashita Ei Tsuda 早稲田大学 早稲田大学 早稲田大学 国学院高校 Waseda University Waseda University Waseda University Kokugakuin S<sub>R</sub>.H.S

**Abstract:** The inexact phenomena such as the mental process and cognition would effectively be analyzed by using the fuzzy graph.

In this paper, we would explain about the learning structure analysis system by applying fuzzy graph, present its practical case study and the effectiveness.

# 1. 教材構造分析

n 人の学習者  $\{S_k: 1 \le k \le n\}$  にm項目のテスト $\{P_i: 1 \le i \le m\}$ を行うと、テストの得点行列  $X = (x_{ki})$  が得られる。ただし、 $S_k$  が  $P_i$  を正解した場合は  $x_{ki} = 1$ 、誤答した場合は  $x_{ki} = 0$  とする。

次に、得点行列  $X = (x_{ki})$  から、項目の得点 パターンを集計すると、図 1 のクロス集計表 ができる.

$Pi \setminus Pj$	1	0	合計
1	а	b	a+b
0	С	d	c+d
合計	a+c	b+d	n

図1 クロス集計表

クロス集計表の要素

$$a = \sum_{k=1}^{n} x_{ki} x_{kj}$$
,  $b = \sum_{k=1}^{n} x_{ki} (1 - x_{kj})$ ,

$$c = \sum_{k=1}^{n} (1 - x_{ki}) x_{kj}, \quad d = \sum_{k=1}^{n} (1 - x_{ki}) (1 - x_{kj})$$

次に項目  $P_i$  と  $P_j$ の類似の度合いを計測するため、ファジィ類似係数を定義する. 定義 1 ファジィ類似係数  $s_{ij}$ 

$$s_{ij} = \frac{a+d}{n} \in [0,1]$$

類似係数  $s_{ij}$  から,ファジィ類似構造グラフ (行列) ができる  $S = (s_{ij})$ ,  $s_{ij} = s_{ji}$ .

次に項目  $P_i$  と  $P_j$ の関連の度合いを計測するため、ファジィ関連係数を定義する. 定義 2 ファジィ関連係数  $t_{ii}$ 

$$t_{ij} = \frac{a+d}{(a+c)+(c+d)} \in [0,1]$$

ただし、 a=c=d=0のときは、 $t_{ij}=1$ とする.

関連係数  $t_{ij}$  から,ファジィ関連構造グラフ(行列) $T=(t_{ij})$ ができる.

類似係数  $s_{ij}$ ,関連係数  $t_{ij}$ ,相関係数  $\phi_{ij}$  に関して,次の性質が成り立つ.

定理 1

$$(1) \ \phi_{ij} \approx 2s_{ij} - 1$$

(2) 
$$\frac{1}{t_{ij}} + \frac{1}{t_{ji}} = \frac{2}{s_{ij}}$$

(3) 
$$a+b>a+d \Leftrightarrow t_{ij}>t_{ji}$$

ファジィ類似構造行列 S をクラスター分析すると、分割樹形図 P ができる. これから、項目の類似性に関するクラスターの分岐状態がわかり、教材構造の類別ができる.

また、ファジィ関連構造行列  $T = (t_{ij})$  を近似 3 値分析すると、近似 3 値グラフ  $T^*$  ができる. これから、教材項目の順序づけができる.

分割樹形図 P と近似 3 値グラフ  $T^*$  を統合すると,テストデータの特徴を表す認知構造グラフ  $\phi^z(z=z^0)$  ができる.

# 2. 適用事例

前節で紹介した分析法を用いて,「順列の数」についての適用事例を述べる.

「順列」の教材構造は,

- (lpha) 基本型、(eta) 円卓型、 $(\gamma)$  数珠型 および
- (A) 単純順列, (B) 重複順列 などの特性により分類される. その教材構造 は図2の教材構造グラフIとなる.

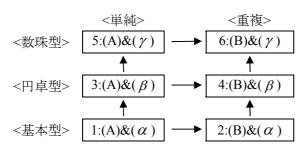


図2 教材構造グラフ I

教材構造グラフⅠに基づいて「順列」の授

業を行い、40名の学習者にテストを行った結果、得点行列Xが得られた。

この得点行列 X から類似構造行列 S をつくり、S をクラスター分析して分割樹形図 P ができる。また,得点行列 X から関連行列 T をつくり,T を近似 S 値分析して,近似 S 値グラフ S ができる。

次に、分割樹形図 P と近似 3 値グラフ  $T^*$  を統合して、図 3 の認知構造グラフ

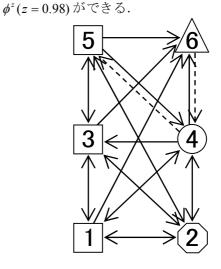


図3 認知構造グラフ  $\phi^z$ 

(z = 0.98)

# 参考文献

- [6] 上江洲, 山下: Instruction Analysis Applying Fuzzy Node Fuzzy Graph, Int'l Congress on Mathematical Education IX PS-270, 2000.
- [8] 上江洲,山下:Instruction Structure Analysis by Multi-Valued Data, Int'l Conference on Soft Computing and Intelligent Systems 22Q1-3, 2002.
- [9] 上江洲, 山下: Mathematical Analysis of Similarity Index and Connectivity Index in Fuzzy Graph, Int'l Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society XXII TID-3, 2003.

# 遺伝的アルゴリズムを用いた多目的フロアプラン設計

Multiple-Objective Floorplan Design Using Genetic Algorithms

# 井田 憲一 木村 要介

Kenichi Ida Yosuke Kimura

#### 前橋工科大学大学院システム情報工学専攻

Department of Systems and Information Engineering, Maebashi Institute of Technology

#### Abstract

In this paper, we apply multi-objective genetic algorithms (MOGAs) to Multiple-Objective Floorplan Design. The object of this problem consists of area and interconnection cost. However, as far as authors know, it has been regarded as a single objective problem in many cases. We expect MOGAs to solve this problem more practically. We compared existing MOGAs using a MCNC benchmark problems called ami49 and ami33. From the results, we execute a sequential execution of two algorithms to check an effective mechanism for the problem.

### 1 はじめに

フロアプラン設計は,組合せ最適化問題にモデル化で きるが,その多くは NP 困難となることが知られている. このため,これまでこの問題に対して GA の適用が試 みられてきた [1, 2, 3]. 特に VLSI の設計の最適化を考 慮したものの場合,全体の面積と総配線長という2つの 目的を最適化するものとしてモデル化される場合が多い が、これらは重みパラメータ法により単一目的の問題と して解かれる場合が多く、著者らの知る限りでは、これ を 2 目的問題として扱った例は見られない.一方,渡邉 らは面積の最小化という1つの目的を,縦と横の長さを 最小化する2目的問題としてモデル化することで,多目 的問題としている.本論文では,全体の面積と総配線長 の最適化をこのように多目的問題としてモデル化する. また, MCNC ベンチマーク問題を用いて渡邉らの手法 を含む従来の多目的  $\mathrm{GA}$  を比較し , さらに 2 手法の組合 せの有効性から、多目的フロアプランに対して有効なメ カニズムについて考察する.

# 2 多目的最適化問題

ここでは , 文献 [4] を参考に , n 目的の多目的最適化問題を , 以下のように定義する .

Maximize 
$$f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$$
. (1)

または

Minimize 
$$f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$$
. (2)

ここで, $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$  は n 個の目的である. 以下のの不平等が 2 つの解 x と y について成り立つと

# き、解yは解xを優越するという.

$$\forall i : f_i(x) \le f_i(y) \text{ and } \exists j : f_j(x) < f_j(y).$$
 (3)

多目的最適化問題の解が,他のどの解にも優越されない場合,その解はパレート最適解であるという.それぞれの目的が互いに競合しあうとき,唯一の最適解を得ることは困難なため,本論文では,より多くのパレート最適解を得ることを目的とする.

# 3 多目的フロアプラン設計問題

フロアプラン設計問題は、与えられた長方形の、最適な配置を決定する問題で、一種の組合せ最適化問題と見なすことができる.これまでの研究からは、最適化する目的は、面積と総配線長の、2つの要素から成るものが多く見られる.しかしこれらは、重みパラメータ法によって、単一の目的として扱われている.しかしこの方法では、一部のパレート最適解は得られない場合があるため、我々はこれを2目的問題としてモデル化する.基となる単一目的問題として、重弘らの文献[2]の定義を用いた.目的関数のうちの1つを以下に示す.

$$s = \{ \max_{i} (x_i + \frac{w_i}{2}) - \min_{i} (x_i - \frac{w_i}{2}) \}$$

$$\times \{ \max_{i} (y_i + \frac{h_i}{2}) - \min_{i} (y_i - \frac{h_i}{2}) \}$$
(4)

ここで, $x_i,y_i$  は長方形  $r_i$  の中心座標, $w_i,h_i$  は幅と高さを表している.これは全ての長方形  $r_i(i=1,\dots,n)$ を含む最小の長方形領域の面積となる.もう一方の目的関数を以下に示す.

$$l = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \{ (|x_i - x_j| + |y_i - y_j|) \times m_{ij} \}$$
 (5)

ここで, $m_{ij}$  は長方形  $r_i,r_j$  間の配線数表す.よって l は,長さをマンハッタン距離としたときの総配線長をしめす.この 2 つの目的関数 s,l から,多目的フロアプラン設計問題を次のように定義する.

Minimize 
$$s, l$$
. (6)

また ,長方形同士は重ならない ,すなわち任意の  $i,j (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n, i \neq j)$  について

$$|x_i - x_j| \ge \frac{(w_i + w_j)}{2}$$
or  $|y_i - y_j| \ge \frac{(h_i + h_j)}{2}$  (7)

を満たすものとする.また,長方形の縦横比は固定と した.

# 4 比較実験

### 4.1 実験 1

既存の多目的 GA を , 多目的フロアプラン設計問題に 適用し,比較を行なった.手法は,渡邉らの論文[6]で 用いられた NSGA-II と SPEA2 と NCGA , 北野らの文 献[5]から, Goldberg の方法(図中ではGorldberg's), Schaffer の方法(以下, VEGA), Fonseca らの方法(以 下, MOGA), 玉置らの方法(図中では Tamaki et al's), Horn らの方法(以下, NPGA)を比較した.インスタ ンスは MCNC ベンチマーク問題の ami49 を用いた. 集団サイズは 35 としたが, NPGA はこの集団サイズ は探索に十分ではないことが予備実験から判明したた め, NPGA については 200 とした. 最終評価個体数は 1,000,000,試行回数は1回とした.必要なパラメータ は予備実験により統計的に良いと思われる値を採用した が,より論理的な設定は今後の課題である.この結果を 図1に示す.各手法について,集団内の優越されている 個体は表示していない.ここから,いくつかの手法は, ami49 に対してあまり有効に働かなかったことが分か る. NPGA は,集団サイズを大きくしても,優れた解は 得られなかったことが分かる.また NPGA と MOGA は,集団内で優越されていない個体は3個体のみである. VEGA も , 多様な解を得ることはできていない .

### 4.2 実験 2

実験 1 から , NPGA , MOGA , VEGA は , 多目的フロアプラン設計問題には有効でないのではないかと考えた.また渡邉らの論文においては , NSGA-II と SPEA2が優れた手法とされている.このため以下では , NSGA-II , SPEA2 , NCGA , Goldberg の手法 , 玉置らの手法の比較を行なっている.ここでは , MCNC ベンチマーク問題より ami33 を用いて実験を行なった.このインスタンスは ami49 と異なり , l に関する条件がより複雑であるという性質を持っている.それぞれの手法のため

の集団サイズ,最終評価個体数,試行回数は,実験1における値と同じとした.交叉確率や突然変異確率などのパラメータは,予備実験から ami33 のために調整した.実験結果を図2に示す.玉置らの手法は,実験1の結果と比較すると,ある程度よい結果が得られていることが分かる.しかし,実験1のNPGAと他の手法のような決定的な違いは確認できない.理由として,ここでの最大評価個体数と試行回数が,それぞれの手法の効果を確認するためには十分でなかったことが考えられる.

### 4.3 実験3

次に, すべての方法が十分に収束したときの結果を確 認するために,最終評価個体数を30,000,000,試行回数 を 10 回として実験を行った.実験結果を図 3 に示す. 図 3 には , それぞれの手法について , 10 回の試行で得 られた解で優越されていない個体を表示している.ここ で, Goldberg の手法は, ある程度有効な解を得られた ことが分かる.また,今回はSPEA2が有効であったこ とも分かる.他の手法で得られた解は,ほとんどが,こ の Goldberg の手法と SPEA2 で得られた解によって優 越されている.これらの優れた解のうち, Goldberg の 手法によって得られた解はsとlについてバランスの保 たれた解であり、一方、 $\mathrm{SPEA2}$  による解は多様で,s か l のどちらかにおいて優れた解を得ている. $ext{NSGA-II}$  も 多様な解を得てはいるが,既に述べたように,これらは ほとんどが優越されている.これまで,探索した優良解 の保存が有効であると言われてきた.しかしこの実験に おいては,このメカニズムを持たない Goldberg の手法 が,他の手法で得られた解に優越されずにバランスが保 たれた解を得られた、このことから、ここで定義したフ ロアプラン設計問題に対しては,このメカニズムが必ず しも有効とは限らないと考えられる.

### 4.4 実験 4

Goldberg の手法は,sとlについてバランスの保た れた解を得ることができた.その一方で,SPEA2 は多 様性の維持ができていて、なおかつ優良解を保存できる という性質がある.このため, Goldberg の手法の後に SPEA2 を実行すれば, Goldberg の手法によってバラン スを保ちながら探索を行い,その後 SPEA2 によって, 優良解を保存しながら解に多様性を持たせることが期待 できる.この実験では,これらの2手法を組み合わせた 手法, すなわち, 最終評価個体数に対して, 評価個体数 が半分未満のとき Goldberg の手法を実行し,半分以上 のとき SPEA2 を実行する手法を適用し、その効果を確 認しました.この実験の結果を図4に示す.パラメ-タ など,実験の条件はすべて実験3と同じとしたため,実 験3の結果もここに表示し,比較している.10回のそ れぞれ試行で、集団中の個体はお互いに優越されない個 体となった.また,この2手法の組合せによって得られ

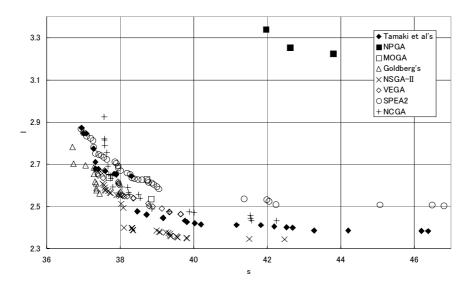


図 1: 実験 1

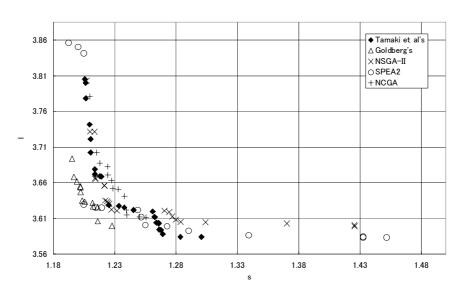


図 2: 実験 2

た解は,実験3で得られたすべての解を優越している.このように,この2手法の組合せが有効であることが分かる.

### 5 さいごに

この論文では,フロアプラン設計問題を多目的最適化問題として定義した.また,MCNC ベンチマーク問題を使用して,既存の多目的 GA を比較し,比較実験を行った.この結果から,この問題において有効なメカニズムを考慮した 2 手法の組合せの有効性を確認した.この結果は,この問題のための多目的 GA を開発するために有効であるが,今後,より詳しく実験,解析を行う必要がある.

### 参考文献

- [1] 染谷博司,山村雅幸,"探索領域を適応的に調整する遺伝的アルゴリズムによるフロアプラン設計問題の一解法,"電学論 C, vol.119, no.3, pp.393-403, 1999.
- [2] 重弘裕二,山口真吾,井上正一,増田達也,"方形系列対に基づく遺伝的アルゴリズムを用いたフロアプラン設計,"電学論 C, vol.121, no.3, pp.601-607, 2001.
- [3] 中矢真吾, 小出哲士, 若林真一, "適応的遺伝的アルゴリズムに基づく VLSI フロアプランニングの一手法," 情処学論, vol.43, no.5, pp.1361–1371, 2002.

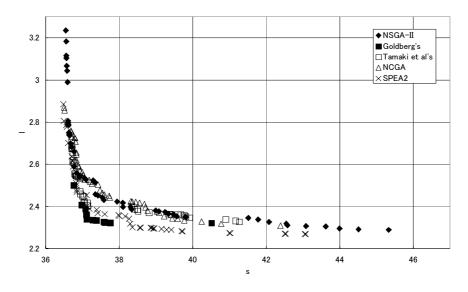


図 3: 実験 3

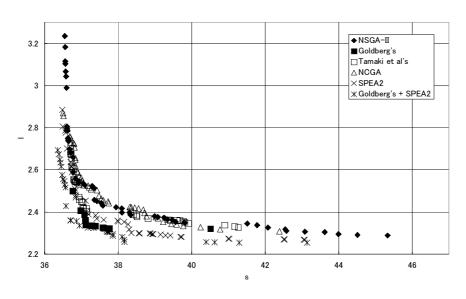


図 4: 実験 4

- [4] Tadahiko Murata, Hisao Ishibuchi, Mitsuo Gen, "Specification of genetic search directions in cellular multi-objective genetic algorithms," Proc. of First International Conference on Evolutionary multi-criterion optimization, pp.82–95, 2001.
- [5] 北野宏明 ,"遺伝的アルゴリズム 2," 産業図書 ,pp71-87, 1995.
- [6] 渡邉真也, 廣安知之, 三木光範, "多目的方形パッキング問題に対する進化的手法の有効性,"信学論(D-1)vol.J86-D-1, no.11, pp.791-799, 2003.

連絡先:  $\mp 371\text{-}0816$  群馬県前橋市上佐鳥町 460-1 前橋工科大学大学院工学研究科 井田 憲一

 $\hbox{E-mail: ida@maebashi-it.ac.jp}$ 

TEL: 027-265-7360 FAX: 027-265-7360

# ハードナップサック問題のための範囲調節型 GA の提案

# Adjustment Type GA for Hard Knapsack Problems

井田 憲一\* 菅 良平\*\* 玄 光男\*\* Kenichi Ida Ryouhei Suga Mitsuo Gen

### 前橋工科大学大学院工学研究科\*

Department of Systems and Information Engineering, Maebashi Institute of Technology 早稲田大学大学院情報生産システム研究科\*\*

Graduate School of Information, Production and Systems, Waseda University

#### Abstract

The knapsack problem is believed to be one of the "easier" NP-hard problem. Not only can it be solved in pseudo-polynomial time by the dynamic programming, but also decades of algorithmic improvements have made it possible to solve nearly all standard instances from the literature. The currently most successful algorithm for the knapsack problem was presented by Martello, Pisinger and Toth. The algorithm can be seen as a combination of many different concepts and is hence called Combo. But they noticed that it is difficult for Combo to solve some instances. In this paper, we propose a new genetic algorithm for knapsack problem. The algorithm can adjust solution spaces in consideration of the stability of each item which can obtain from the greedy algorithm. We apply the proposed method to those difficult instances, and test the effectiveness.

### 1 はじめに

ナップサック問題の歴史は古く,現在に至るまで様々な厳密解法が考案されている.その中で最も有効な手法の一つに動的計画法が挙げられる.動的計画法は擬似多項式時間で最適解を得ることが可能であり,現存するほとんどのインスタンスを解くことができることが知られている.そのため 0-1 ナップサック問題に関しては,NP困難な問題の中でも比較的簡単な部類に属すると言われている.

しかし,他の組合せ最適化問題と同様,問題の規模が大きなものを含め,ある種の性質を持つインスタンスに対しては実用時間内で解くことが困難であるという指摘もある [1]. そのため,近年では比較的早い段階で精度の高い近似解を得ることを目的とした手法の研究が行われてきた [2].

遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm: GA) もその一つであり,多点からの並列的な解の探索を行うため探索範囲が広く,多くの組合せの中から解を求めるような組合せ最適化問題に対して有効であるとされている.そのためナップサック問題にも遺伝的アルゴリズムを適用することは有効であると考えられ,現在様々な研究が行われている.しかし,探索領域が広い場合では解の探索に時間がかかり,解の精度も低くなるという問題もある.そのため解空間の縮小,分割が効果的とされており,従来より様々な研究が行われている[3].

本論文では、GAでの探索過程において、貪欲解を基準として各荷物の安定性を考慮することで探索コストの削減を目的とした範囲調節型 GA (adjustment type genetic algorithm: ATGA)[4]を提案し、文献[1]で指摘されているような困難なインスタンスに適用することでその有効性を示す。

# 2 ナップサック問題

ナップサック問題は,複数の荷物と一定容量まで荷物を入れられる袋があり,各荷物の重量とその価値(重要度)は既知とするとき,袋の容量を越えない範囲でその価値の和が最大となるように入れる荷物を決定する問題である.

一般に,n個の荷物をもつ0-1ナップサック問題は,以下のような0-1整数計画問題として定式化される.

$$\max v = \sum_{i=1}^{n} c_i x_i \tag{1}$$

subj. to 
$$\sum_{i=1}^{n} a_i x_i \le b \tag{2}$$

$$x_i = \{0, 1\} \quad (i = 1, \dots, n)$$
 (3)

ここで, $c_i$  は荷物 i の価値, $a_i$  は荷物 i の重量,b は荷物を格納するナップサックの許容重量であり, $x_i$  は荷物 i をナップサックに格納するとき 1,そうでないとき 0 をとる 0-1 変数である.また,荷物には順に  $1,\ldots,n$  の番号がつけられているものとする.

### 3 起因レベル

貪欲解法より得られた解の安定度を本論文では起因レベルと呼ぶ [6]. 貪欲解法とは,n 個の荷物を価値と重量の比率(本論文では,価値密度と呼ぶ) $c_i/a_i$  が高い順に並べ,許容重量 b まで荷物を詰め込んでいくナップサック問題の近似解法の一つである.ここで得られた貪欲解の格納した荷物と格納されない荷物の境目を境界と呼び,その遺伝子座を  $s=\min\{h:\sum_{i=1}^h a_i>b\}$  として定義する.また,染色体表現において境界を基準に荷物が格納されている側を境界左側,荷物が格納されてない側を境界右側と呼ぶことにする.

この解法は単純な手法のため短時間で結果が求まるが,必ず最適解が求まるとは限らない.しかし,この手法で用いられている荷物の価値密度に従って並べ替える方法は,各荷物の重要度を判断する上で非常に有効であると考えられる.このため,提案手法  ${
m ATGA}$  の染色体表現においては,すべての荷物を価値密度  $c_i/a_i$  の高い順に並べるものとする.

貪欲解法では,得られた解に対し,

$$\sum_{i=1}^{n} a_i x_i = b \tag{4}$$

が成り立つとき,最適解であることが保証される.

しかし,多くの場合

$$\sum_{i=1}^{n} a_i x_i < b \tag{5}$$

となる.このことは,許容重量bであるナップサックに

$$d = b - \sum_{i=1}^{n} a_i x_i \tag{6}$$

で表すような容量の空き d が存在していることを意味 し,この空きをベースに,得られた解において格納されている荷物と格納されていない荷物を交換することにより最良解が更新される(以下,エラーと呼ぶ)ことも十分考えられることになる.

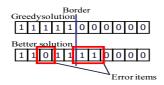


図 1: エラーを引き起こした遺伝子

一般に対象となる問題の規模の大きさに比例して,探索コストは高くなる.よって大規模な問題においては,探索コストを削減することが効率よく優れた解を探索するための方法の一つとして考えられる.そこで本論文では各荷物のエラーを引き起こす度合に注目し,それを探索コストの削減に繋がる遺伝子であるかどうかを判断するための一つの基準として使用することで探索コストの

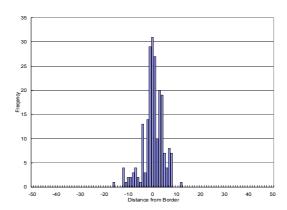


図 2: 境界からの距離とエラーの頻度の関係

削減を図る.最初に,各荷物でエラーを引き起こす度合 を実験的に回帰式で再現することを試みる.

#### 3.1 予備実験

各荷物でエラーを引き起こす度合を回帰式で再現するために、予備実験によりエラーを引き起こす荷物の特徴を調査する.この予備実験では、ランダムに問題を 10 個生成し、各問題の貪欲解法で得た解と貪欲解より良い解を比較することで各荷物のエラーを引き起こした頻度を測定する.

予備実験により,エラーを引き起こしやすい荷物として次のような特徴を確認した.

- 境界 s の周辺の荷物
- 境界左側  $(1 \le i < s)$  で重い荷物
- 境界右側  $(s \le i \le n)$  で軽い荷物

#### 3.2 起因レベルの設定

この結果から,本論文では各荷物(遺伝子)のエラーを引き起こす度合を起因レベル  $R_i(i=1,\dots,n)$  として定義し,以下のように設定する.ただし,価値密度を  $e_i=c_i/a_i(i=1,\dots,n)$  とする.

$$R_{i} = \max \left\{ 0, 1 - \frac{|e_{i} - e_{s}|}{\min \left\{ e_{1} - e_{s}, e_{s} - e_{n} \right\}} \right\} + \frac{r_{i} - \min r_{j}}{\max r_{j} - \min r_{j}} \qquad (j = 1, \dots, n)$$
 (7)

$$r_{i} = \begin{cases} (s-1)a_{i} \left[ \sum_{j=1}^{s-1} a_{j} \right]^{-1} & (1 \leq i < s) \\ \frac{n-s+1}{a_{i}} \left[ \sum_{j=s}^{n} \frac{1}{a_{j}} \right]^{-1} & (s \leq i \leq n) \end{cases}$$
(8)

である

この式は、各荷物と境界sの荷物の価値密度の差に基づいて、境界からの距離が近い荷物の起因レベルを上げるように作用する第一項、境界左側で平均より重い荷物、境界右側で平均より軽い荷物の起因レベルを上げるように作用する第二項の2つの項から構成されており、2つ

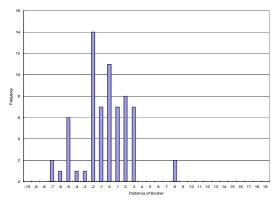


図3: 境界からの距離とエラーの頻度の関係

の項の和が起因レベルとなる.また,各項で標準化を行うことで,各項の基準のスケールが異なる場合,起因レベルへの各項の値による重要性に偏りができてしまうことを回避している.

### 4 起因レベルの実験的検証

設定した起因レベルの式が,実際に各荷物でエラーを引き起こす度合を再現することができているかを検証するための実験を行う.この実験では,特徴の異なる2種類の問題を対象として実験を行うことで,各問題に対する式の有効性について検証する.対象となる問題はランダムに生成した問題と,相関性のある問題を用意し,予備実験同様に各荷物のエラーを引き起こす頻度を測定する.尚,今回は総当り法を使用することで,貪欲解より良い全ての解に関して各荷物のエラーを引き起こした頻度を測定している.そのため,各問題の荷物数は総当り法でも実時間内に解くことが可能な範囲である 30 個とする.

この実験では総当り法を使用しているため,エラーの出現が確認された荷物については,どの荷物においても最適解の一部を構成する可能性が存在する.また,エラーの出現頻度が高い荷物についてはそれだけ最適解を構成する一部となっている可能性も高いことが予測される.それに対し,エラーの出現が一度も確認できなかった荷物については貪欲解より優れた解の一部を構成するでは,探索コストの削減が不十分だと解の探索に長時間費やすこととなるが,極端に削減してしまうと最適解の一部を構成するような荷物まで探索が疎かになってしまい最適解を得るに至らない結果となりうる.よって,得られる起因レベルのグラフの形状はエラーの頻度を示したグラフを包含すべきであると考えられる.

ランダムに生成した問題において,境界からの距離とエラーを引き起こした頻度の関係を表したものを図3に,起因レベルとの関係を表したものを図4に示す.また,相関性のある問題においては,境界からの距離とエ

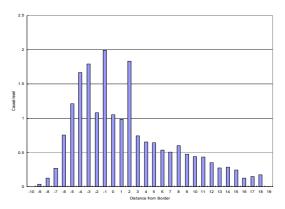


図 4: 境界からの距離と起因レベルの関係

ラーを引き起こした頻度の関係を表したものを図 5 に , 起因レベルとの関係を表したものを図 6 に示す .

図3,4のグラフを比較すると,起因レベルの式から得られた図4のグラフが実際にエラーの頻度を測定した結果を示す図3のグラフを包含していることが確認できる.ここで境界からの距離が8の値に注目する.図3では境界からの距離が,8の荷物がエラーの頻度が高いことがわかる,これに対し図4のグラフでは一見境界からの距離3を境に起因レベルの値は徐々に減少しているように見えるが,距離8の荷物に関しては周囲の起因レベルに比べ比較的高い値が割り振られていることに気づく.この結果より,設定した起因レベルの式はエラーが起きる頻度の高い荷物を判断する能力を有していると言える.しかし,相関性のある問題で得た図5,6のグラフでは必ずしも包含しているとは言えない.

相関のある問題は一般的に各荷物の価値密度に極端な差がないため、どの荷物も最適解の一部となる可能性を持つ、図 5 においても、どの荷物もエラーを引き起こす頻度は 300000 を超えており、この図からは各荷物の安定性を判断することは不可能である、相関のある問題の特性を考慮した場合、今回の実験で用いた貪欲解より良い全ての解に関して各荷物のエラーを引き起こした頻度を測定するという条件では、相関のある問題にとって解空間が広すぎたと考えられる。

よって追加実験として,エラーが起こった頻度を測定する基準を貪欲解ではなく,貪欲解より最適解に近い値である基準値 a を用いて,解空間を狭めた上で実験を行うことにした.ランダムに生成した問題では,すでに包含していることが確認できたため,再実験は相関性のある問題のみ対象とする.

(9) 式で表す基準値 a より,良い全ての解に関して各荷物のエラーを引き起こした頻度を測定した結果を図 7 に示す.

$$a = greedy + (opt - greedy) * 0.9$$
 (9)

ここで a の値はグラフの特性が最も顕著に表れたものを 設定している. また opt, greedy はそれぞれ最適解, 貪

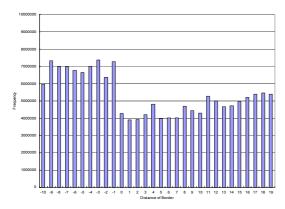


図 5: 境界からの距離とエラーの頻度の関係

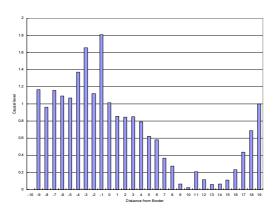


図 6: 境界からの距離と起因レベルの関係

#### 欲解を表す.

追加実験で頻度を測定する空間を狭めたことにより,各荷物でのエラーの出現頻度の特徴が顕著に表れており,図7は起因レベルの値を示す図6と明らかな類似性が確認できる.双方とも境界からの距離が1の値で最大値を得ており,図7で周囲の荷物に比べ極端に高い値を得ている境界からの距離11に関しても,図6で再現できていると言える.この結果から,設定した起因レベルの式は相関性を持つような問題に対しても,各荷物でエラーを引き起こす度合を再現できたといえる.

以上の結果から、本論文で提案した回帰式によって算出した起因レベルは、大規模な問題においても探索コストを十分に削減することができ、解の探索を効率よく行えることが期待できる. さらに性質の異なる問題においても対応可能である点は特筆すべきである.

本提案手法ではストカスティックな手法である GA をベースとして採用している.GA は比較的単純な構造をしているため,起因レベルの導入が容易である.また起因レベルの導入により,GA での探索を効率的に行うことができ,問題の特性に合わせた探索を行うことが可能となる.

#### 5 改良点と提案アルゴリズム

上記の起因レベルの式を用いることで、探索効率の向上を目指した提案手法 ATGA の具体的な改良点とその

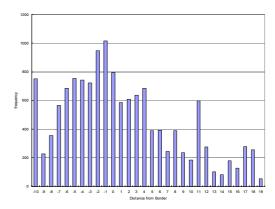


図 7: 境界からの距離とエラーの頻度の関係

アルゴリズムを示す.

#### 5.1 改良点

#### ● 突然変異

各荷物の安定度を意識した探索を可能とするため, 起因レベルを突然変異率として各荷物ごとに設定する.また突然変異率に対するパラメータ設定の簡易 化も目的の一つである.

#### ● 局所探索の導入

ナップサックの容量に空き d が存在し,かつ探索範囲内でその空きより軽い荷物が 1 つ以上存在するような個体に対して,その空きを埋めることで解の改善を図る局所探索法を導入する.ここで空きを埋める対象となる荷物は,安定した荷物が高い確率で選択されるように起因レベルを変形した  $R2_i$  を用いて確率的に選択する.

$$R2_i = 2 - R_i \quad (0 \le R_i \le 2) \tag{10}$$

● 起因レベルによる探索範囲の調節

以下の手順を GA に組み込むことで,探索を段階的かつ効率的に行うことが可能となる.

- 1. GA での探索範囲を境界に隣接する遺伝子を含む範囲まで縮小し、これを初期探索範囲とする.
- 2. 起因レベルによって定めた世代ごとに探索範囲を徐々に拡大させる.
- 終了条件を満たすまで探索を行う.このとき, 最良解が更新された場合は,1.に戻る.

### 5.2 提案アルゴリズム

Step1: データの入力

対象とする問題の各要素を入力する.

Step2: 個体の遺伝子型の決定

荷物を表す変数を価値密度  $c_i/a_i$  の高い順に整列し, これを個体の遺伝子情報とする記号列で表す.

Step3: 貪欲解法による初期個体群の生成

貪欲解法を適用して初期解を生成する.この解を集団サイズだけ複製し,これを初期個体群とする.

Step4: 起因レベルの計算

式(7)を用いて各荷物の起因レベルを計算し,その

表 1: 各手法のパラメータ

	SGA	VEA	ATGA	SA
Population size	500	500	500	
Crossover rate	0.70	0.75	0.7	
Mutation rate	0.05	0.05		
Initial temperiture				1000000
Cooling parameter				0.90

結果を遺伝子情報の一つとして格納する.

Step5: 探索範囲の調節

前述の探索範囲の調節を行う.

Step6: 解の探索

交叉と突然変異を行い,解の探索を行う.

Step7: 局所探索

探索範囲を拡大する直前に前述の局所探索を実行する。

Step5-7を設定した終了条件を満たすまで繰り返す.

#### 6 数值実験

ナップサック問題の有効な解法の一つとして動的計画法(dynamic programming: DP)[9]が広く知られている.

DP とは,問題を段階的に解く過程で,ある段階で得られた最適解をもとに,次の段階の最適解を求めるという操作を繰り返し行う手法であり,実用的なほとんどのインスタンスに対して最適解を求めることができる厳密解法である.しかし,問題の性質によっては実時間内に解を得ることが困難な場合も存在する.

そのため近年においても,困難な問題に対して効率的に解を得ることができるように,DP に関する様々な研究が行われてきた.その中で,現在最も有効である手法として Martello,Pisinger と Toth が提案したCombo[10] と呼ばれる手法がある.しかし,この手法においてもある種の性質を持つインスタンスに対して実時間内に解くことが困難な場合があることを Combo の提案者の一人である David Pisinger が 2003 年の文献中[1] で指摘している.

数値実験では Pisinger の文献で紹介されている困難なインスタンスに対して提案手法を適用し,従来手法と比較することでその有効性を検証する.

#### 6.1 既存手法との比較

既存の比較対象手法として,本提案手法のベースとなっている単純 GA ( SGA ) [5] ,ウィルス進化論に基づき中谷らにより提案されたウィルス進化型アルゴリズム ( VEA ) [7] ,物質のエネルギー極小状態となる原子配列への遷移をヒントにしたシミュレーテッド・アニーリング ( SA ) [5] の 3 種の近似解法と,一時的に解を保証する意味で線形計画法の一つである貪欲解法 ( Greedy ) [8] の計 5 手法を取り上げる.ただし,ここでの SA は初期解の獲得に貪欲解法を用いている.

実験は特性の異なる次の2つのインスタンスついて

表 2: 大きな係数を持つ問題の実験結果

	Solution					
Algorithm	Best	Worst	Average	Time(s)		
Greedy	33682846	-	-	0.016		
SGA	33407839	33275975	33330572.6	31.38		
VEA	33780615	33744886	33752031.8	27.81		
SA	33744886	33744886	33744886.0	0.109		
ATGA	33780615	33780615	33780615.0	0.31		

表 3: 多数の荷物を持つ問題の実験結果

<b>,</b>	21 0 2 XX 10 1 3 1 3 2 1 3 2 1 3 XX 10 1 3 1						
		Solution					
Algorithm	Best	Worst	Average	Time(s)			
Greedy	3149281	-	-	0.016			
SGA	2793873	2771940	2779251.0	383.64			
VEA	3149389	3149281	3149302.6	20.73			
SA	3149649	3149649	3149649.0	2.42			
ATGA	3149668	3149668	3149668.0	10.22			

行う.

Large coefficients: n=100, c=1000000 とする 大きな係数を持つ問題

Large items: n=10000, c=1000 とする多数の 荷物を持つ問題

ここで n は荷物数 , C は係数の値の幅を表しており , 各問題の要素である価値  $c_i$  と重量  $a_i$  は [1,C] の範囲でランダムに生成する .

大きな係数を持つ問題,多数の荷物を持つ問題の実行結果をそれぞれ表2,表3に示す.

表 2 より , VEA 以外の手法では ATGA と同じ最良解を得ることができなかった . また , ATGA は安定した解を高速に得ていることも確認できる . 多数の荷物を持つ問題を扱った表 3 からも ATGA の有効性を確認できる .

以上の結果より,主に近似解法を中心に行った比較実験において,ATGA はその有効性を証明することができたと言える.

#### 6.2 厳密解法との比較

提案手法と厳密解法である DP との比較実験を行う. 実験は前項で使用した 2 つのインスタンスと,大きな係数を持つ問題に対してより性質を特化させた問題である Very large coefficients を加える.

Very large coefficients: n=10, c=10000000 とするより大きな係数を持つ問題

各インスタンスに対して,ランダムに生成した問題と, より困難であると言われている相関性を持つ問題を生成 する.ランダムに生成する問題は前項で行った実験と同

表 4: ランダムに生成した問題の実験結果

		Algorithm	
Problem	Solution	DP	ATGA
	Best	33780615	33780615
Large coefficients	Worst	-	33780615
$(n=10^2, C=10^6)$	Average	-	33780615.0
	Time(s)	36110.4	0.311
	Best	20398959	20398959
Very large coefficients	Worst	-	20398959
$(n=10, C=10^7)$	Average	-	20398959.0
	Time(s)	3392.28	0.328
	Best	3149668	3149668
Large items	Worst	-	3149668
$(n=10^4, C=10^3)$	Average	-	3149668.0
	Time(s)	5614.89	10.22

表 5: 相関性を持つ問題の実験結果

		Algo	Algorithm		
Problem	Solution	DP	ATGA		
	Best	26800000	26800000		
Large coefficients	Worst	-	26799996		
$(n=10^2, C=10^6)$	Average	-	26799997.6		
	Time(s)	38040.9	26.44		
	Best	34668223	34668223		
Very large coefficients	Worst	-	34668223		
$(n=10, C=10^7)$	Average	-	34668223.0		
	Time(s)	3135.86	0.174		
	Best	3541500	3541500		
Large items	Worst	-	3541500		
$(n=10^4, C=10^3)$	Average	-	3541500.0		
	Time(s)	8058.34	4.21		

条件で価値と重量をそれぞれ生成し,相関性を持つ問題は価値を [1,C] の範囲で生成し,重量は  $a_i=c_i+C/10$  で生成する.尚,パラメータ設定等の条件は前項の実験と同様とし,問題の規模を表す n と c の値は,使用した実験環境で  $\mathrm{DP}$  が動作可能な範囲のものを用いる.

ランダムに生成した問題と相関性を持つ問題の実験結果をそれぞれ表4,表5に示す.

表 4 より,提案手法は 10 回試行した全ての解で DP と同様に最適解を得ていることが確認できる.また短時間で解を得ていることからもその有効性が窺える.より 困難な性質を持つ表 5 からも同様な結果を得ることができた.また,全ての問題で最適解を得ることができたことは特筆すべき点である.

ここで Very large coefficients で得た結果に注目する.これは非常に大きな係数を持つインスタンスであるが荷物数が 10 という非常に小規模な問題である.この問題に対しても  $\mathrm{DP}$  は解の探索に大変時間がかかっていることが確認できる. $\mathrm{DP}$  はその構造上,荷物数が小規模な問題であっても大きな係数を持つようなインスタンスであれば実時間内に解を得ることが困難な手法に変貌する可能性を併せ持つ. $\mathrm{Combo}$  に対しても文献 [1] で同様の指摘を受けている.それに対して  $\mathrm{GA}$  を主体とした提案  $\mathrm{ATGA}$  は,係数の規模による影響を受けないため,様々な性質を持つ問題に対しても短時間で精度の高い近似解を求めることが期待できる.

#### 7 おわりに

本論文では,起因レベルを用いることで最良解を更新する可能性の高い荷物に重点をおいて探索することで,

短時間で精度の高い近似解を求めることを目的とする ATGA を提案し,実験によりその有効性を確認することができた.

ATGA の中核をなす要素である起因レベルは,実際にGA に導入する際に問題に適したスケーリングを行う必要があり,その傾向については詳しく調査する必要がある.また,本提案手法は貪欲解法を用いることができるような問題であれば,どのような問題に対しても応用可能であると考えており,今後は他の組合せ最適化問題に対しても適用を試みる必要がある.

## 参考文献

- [1] D. Pisinger, "Where are the hard knapsack problems?", Technical Report, DIKU, University of Copenhagen, Denmark, pp.1–14, 2003.
- [2] 玄光男, "遺伝的アルゴリズムとその工学的応用", 足利工業大学研究集録第27号, pp.13-39, 1998.
- [3] 林芳男, "0-1 ナップザック問題の数理とアルゴリズム", 近畿大学商経学会, 2000.
- [4] 井田憲一,菅良平,玄光男,"遺伝的アルゴリズムによる多目的ナップサック問題の一解法",平成15年電気学会電子情報システム部門大会講演論文集,pp.370-372,2003.
- [5] 北野宏明,"遺伝的アルゴリズム 1",産業図書, 1993.
- [6] K. Ida, R. Suga, M. Gen, "Multi-objective Knapsack Problem Using Improved Genetic Algorithm", Proc. of APSIES, pp.263–267, 2003.
- [7] 中谷直司,金杉昭徳,近藤邦雄,"ウイルス進化論に基づく進化型アルゴリズム",情報処理学会論文誌, Vol.40, No.5, pp.2346-2355, 1999.
- [8] G. Ausiello, P. Crescenzi, G. Gambosi, V. Kann, A. Marchetti-Spaccamela, and M. Protasi, "Complexity and Approximation", Springer-Verlag, pp.40–43, 1999.
- [9] 加瀬正喜,"ナップサック問題のメタ戦略に関する実験的性能分析", http://tdweb.am.chs.nihon-u.ac.jp/semi4/2001/kase.htm, 日本大学文理学部平成 13 年度卒業研究, 2001.
- [10] S. Martello, D. Pisinger, P. Toth, "Dynamic Programming and Strong Bounds for the 0-1 Knapsack Problem", Management Science, Vol.45, No.3, pp.414–424, 1999.

連絡先: 〒808 - 0135 北九州市若松区ひびきの 2 - 7 早稲田大学大学院情報生産システム研究科 玄 光 男 E-mail: gen@waseda.jp

TEL: 093-692-5273 FAX: 093-692-5021

# GA による JSP のための遊休時間短縮アルゴリズムの提案

The Proposal of the Idle Time Shortening Algorithm for JSP by GA

井田 憲一 大澤 明 Kenichi Ida Akira Osawa

#### 前橋工科大学大学院システム情報工学専攻

Department of Systems and Information Engineering, Maebashi Institute of Technology

#### Abstract

Job-shop scheduling problem (JSP) is one of problems that are especially difficult in NP-hard combinatorial optimization problems. The purpose of the problem is to find schedule that makes the makespan the minimum. We think it effective to reduce idle time of a machine, in order to improve the makespan effectively. The shortening method of the existing idle time arranges work with processing time shorter than idle time to idle time. That is why the existing method can not arrange work with processing time longer than idle time. We propose algorithm of arranging work with processing time longer than idle time to idle time. We think that makespan can be improved efficiently by proposed algorithm. Using genetic algorithm with proposed algorithm, we experiment and examine the validity of proposed algorithm.

#### 1 はじめに

ジョブショップスケジューリング問題 (Job-shop Scheduling Problem: JSP) は身近に非常に多く存在し、計画、設計、生産などの各段階で、大規模かつ複雑な組合わせ最適化問題として現れることが多い [1].この種の問題の解法としては、これまで多くの手法が提案されてきたが、従来の数理計画法などを適用した場合、実時間内に解を得られないなどの問題点が指摘されていた。また、現実問題では必ずしも最適解を得る必要はなく、それに近い値をより早く得ることや、制約時間内に処理を完了させるといったことの方が重要視される場合も多い、そのため、JSP の解法として近年では遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) などの近似解法の適用が注目されている。

JSP を解くための GA における染色体のコーディング法としては,有向グラフを用いる手法,ガントチャートへの仕事の配置順序をそのまま表現する手法,作業順序の入替え情報を表現する方法など,様々な手法が提案されている [2].

その中でも平野 [3] が提案した仕事番号による表現方法は,取り扱いが容易で,解が必ずアクティブスケジュールになるなどの利点がある.しかし,この手法によりコーディングされた染色体はガントチャートと 1 対1 対応でないため,既存の交叉や突然変異を用いて遺伝子を変化させても,ガントチャート上の作業配置が変化していないことにつながりかねない.このことは,解を変化させて最適解の探索を行う GA では好ましいとはいえない.また,JSP において,効果的に総作業時間を改

善するには,機械の遊休時間を減らすことが有効である と考えられる.

そこで本研究では、遊休時間を効率的に短縮させるために、既存の手法では作業を配置することができない遊休時間に作業を配置したガントチャートを作成し、そのガントチャートから平野により提案された染色体表現の解を生成するアルゴリズムを提案する.さらに、数値実験によりその有効性を検証する.

### 2 ジョブショップスケジューリング問題

### 2.1 JSP の概要

複数の仕事を複数の機械で加工することを考える.このとき,各仕事を加工する機械の順序,つまり技術的順序と各仕事の各機械上での加工時間は与えられているものとする.JSP は,すべての仕事を加工し終えるまでの総作業時間 (makespan) を最小にする各機械上での各仕事の加工順序,つまりスケジュールを決定する問題である.ただし,一つの仕事は同時に一つの機械でのみ処理され,一つの機械は同時に一つの仕事のみを処理するものとし,作業の中断は考慮しない.

# 2.2 問題の定式化

JSP は以下のように定式化される.N 個のジョブ  $J_i(i=1,2,\cdots,N)$  を,H 台の機械  $M_j(j=1,2,\cdots,H)$  で処理する工程を考える.各ジョブ  $J_i$  には H 個の作業  $o_{i,j}(j=1,2,\cdots,H)$  が存在し,総作業時間を  $Q=N\times H$  とする.

作業  $o_{i,j}$  の処理時間  $p_{i,j}$  は既知であり,作業  $o_{i,j}$  が使う機械での先行作業を作業  $o_{h,l}$  で表すとすると,処理開

始(可能)時刻  $s_{i,j}$  と処理終了(可能)時刻  $c_{i,j}$  は,それぞれ以下のようになる [4] .

$$\begin{split} s_{i,j} &= \max \{\, s_{i,j-1} + p_{i,j-1}, s_{h,l} + p_{h,l} \,\}, \\ c_{i,j} &= s_{i,j} + p_{i,j} \,\,. \end{split}$$

これより,最小にすべき目的関数は次のように表される.

 $c_{max} = \max\{c_{i,m} | 1 \le i \le n\}.$ 

#### 3 遊休時間

#### 3.1 2種類の遊休時間

JSP のスケジュールには,機械がどの作業の処理も行っていない時間帯である遊休時間が存在する.遊休時間は,ある作業の処理を開始することができる遊休時間と処理を開始することができない遊休時間に分けることができる.その例を図1に示す.

図 1 の M1 の遊休時間では , j1 の作業の処理を開始することができ , M3 の遊休時間では j3 の作業の処理を開始することができる .

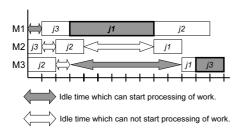
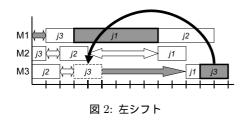


図 1: 2 種類の遊休時間

#### 3.2 既存の遊休時間短縮方法

既存の遊休時間の短縮方法として,左シフトがある.左シフトの例を図 2 に示す.この手法は,図の M3 の遊休時間のように作業の処理時間よりも大きな遊休時間に作業を配置するというものであるため,図の M1 の遊休時間のように作業の処理時間よりも小さな遊休時間に作業を配置することができない.そのため,左シフトでは最適解に到達できない場合があると考えられる.



#### 4 提案アルゴリズム

ここでは,作業の処理時間よりも小さな遊休時間に処理を開始することができる作業を配置することにより,

遊休時間を効率的に短縮させるアルゴリズムの提案を行う. 提案アルゴリズムを加えた GA を図 3 に示す.

提案アルゴリズムは,集団内のすべての染色体に対して, $0\sim1$  の一様乱数を発生させ,その値が確率 Pn 以下である場合に適用する.

提案アルゴリズムは,アクティブスケジュールのガントチャート上で遊休時間に処理を開始することができる作業を配置し,そのガントチャートから 2 種類の方法で 2 つの染色体を作成する.その染色体に渡部らが提案した asol[5] を適用し,アクティブスケジュール生成可能な解に変換する.その染色体をもとに,制約条件を満たしたガントチャートを作成し,総作業時間を求める.そして,その親と子の中で最も総作業時間が短いものを集団に残す.

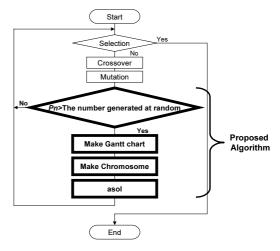


図 3: 提案アルゴリズムを加えた GA

#### 4.1 ガントチャート作成アルゴリズム

Step1: i 番目の遺伝子を読み込み , その作業を作業 W , 使用する機械を機械 M と呼ぶ .

Step2: 作業 W が最も早く処理可能な時間帯のガントチャートへ配置し, k=0 とする.このとき,再配置された作業で機械 M を使用するものは,この作業の開始時間に影響しないものとする.

Step3: このガントチャート上で機械 M に k - 1 番目 に処理される作業が存在する場合は,次のステップ へ進む.そうでない場合は,Step6 へ進む.

Step4: 機械 M に k 番目と k-1 番目に処理される作業の間の遊休時間を遊休時間 K と呼び , その時間を T とする

Step5: この作業が,遊休時間 K で処理を開始することができ, $0\sim 1$  の範囲でランダムに発生させた値が,作業 W の処理時間  $\div T$  以下である場合,遊休時間 K に再配置して,次のステップへ進む.そうでない場合は,k=k+1 として,Step3 へ戻る.

Step6: i = i+1 とし,i <  $N \times H$  の場合は,Step1 へ 戻る.

Step2 のガントチャートへの作業の配置と Step5 の作業の再配置の例を図 4 に示す .

Step2 の作業の配置において,配置する作業が再配置された作業と同じ機械を使用する場合(図の場合,M1 の j2)は,再配置された作業を考慮しない.つまり,再配置された作業と重なる時間に配置してもよいとする.また,違う機械を使用する場合(図の場合,M2 の j1)は,再配置された作業を考慮し,重ならない時間に配置する.また,Step5 での作業の再配置は図の M1 の j1 のように,配置された作業と重なる時間に配置する.

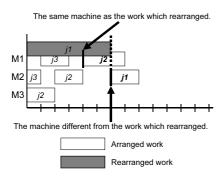


図 4: ガントチャートへの作業の配置と再配置

#### 4.2 染色体生成アルゴリズム

Step1: i=0 とする.

Step3: 子 2 の染色体に格納されていない作業の中で,各機械で最も開始時間が早い作業をそれぞれ選ぶ.その中で,最も早く処理を終了することができる作業の仕事番号を子 2 の染色体の i 番目の遺伝子に格納する.

Step4: i=i+1 とし, $i< n \times m$  の場合は, ${\rm Step2}$  へ 戻る.

#### 5 数値実験

ここでは,まず提案アルゴリズムの有効性を検証するために,渡部らの  $\mathrm{GA}[5]$  に提案アルゴリズムを加えた  $\mathrm{(PGA)}$  場合とそうでない場合を検討する.次に,他手法との比較を行う.インスタンスは JSP の難問として知られる 10 tough problem[6] を用いる.

実験は、Pentium  $2.26 {
m GHz}$  の PC 上の Microsoft Visual C++6.0 で 100 回試行した.また、各パラメータは、集団サイズ  $50{\sim}300$  個体、交叉確率 0.8、突然変異確率 0.2、提案アルゴリズムを行う確率 0.2、終了条件

は解が十分に収束するまでとする.これらのパラメータは予備実験の結果に基づき決定した.

#### 5.1 提案アルゴリズムの有効性の確認

提案アルゴリズムの有効性を確認するために,渡部らの GA に提案アルゴリズムを加えたものと加えないものの比較を行う.実験結果を表 1 に示す.Best,Worst,Ave,Time(s),Opt/LB は,それぞれ最良解,最悪解,最良解の平均値,最良解が得られるまでの時間 (秒),最適解または下限である.

表 1 より,提案アルゴリズムを加えたものは,la21 以外の問題で加えないものより優れた最良解を得ることができた.このことより,提案アルゴリズムは総作業時間の改善に有効であると考えられる.

提案アルゴリズムを加えたものは,遊休時間への作業の再配置を行っているため,実行時間が増加しているが最大でも 1 時間以内であるので実時間内であるといえる.これに対し,1a21 以外の問題での製品 1 個当たりの製造時間(解)は  $1\sim9$  ポイントの改善である.これは 1 %にも満たない改善であり数値的には微々たるもののようにみえるが,実際にはこの製造時間に製品の製造数が掛けられるので,このわずかな改善により製造時間の大幅な短縮が可能となる.

#### 5.2 他手法との比較

PGA の有効性を確認するために,PGA と佐久間らの手法 (EDX+JOX)[7] 及び,同文献内で報告されている山田らの手法 (YN97)[8],小野らの手法 (Ono96)[9], Mattfeld らの手法 (Matt), Nowicki らの手法 (Nowi), Aarts らの手法 (Aarts), Appleegate らの手法 (Appl),山田らの手法 (YN96) との最良解の比較を行う、実験結果を表 2 に示す、また,他手法の実験結果は [7] より引用した.

表 2 より,PGA は YN96 以外の手法と比較して,優れた解を多くの問題で得ることができた.また,YN96 に対しては,abz8,la40 において,優れた解を得ることができた

PGA が他の手法より優れた結果を得られたことより,提案アルゴリズムは総作業時間の効率的な改善に有効であるといえる.また,提案アルゴリズムのように,機械の遊休時間の短縮を目的としたアルゴリズムの研究を行うことは価値があると考えられる.

#### 6 おわりに

本研究では,遊休時間に作業を配置するアルゴリズムの提案を行い,数値実験により,その有効性を確認した. 提案アルゴリズムは,突然変異としてのアプローチであるが,新しく生成した個体すべてに適用することで,

表 1: 提案アルゴリズムの有効性の確認

	提案アルゴリズムあり			提案アルゴリズムなし					
Problem	Best	Worst	Ave	Time(s)	Best	Worst	Ave	Time(s)	$\mathrm{Opt}/\mathrm{LB}$
abz7	667	704	681.6	888	668	708	684.1	286.6	656
abz8	674	716	689.2	3156.5	678	710	689.5	1728.3	669
abz9	689	747	712	1987.7	694	737	711.7	839.9	679
la21	1046	1100	1066.3	50.8	1046	1095	1065.9	14.9	1046
la24	935	980	958.9	31.1	939	975	951.6	16.3	935
la25	977	1023	1000.8	30.2	980	1016	998.8	9.79	977
la27	1235	1295	1264.3	721.2	1242	1283	1262.8	192	1235
la29	1167	1244	1203.9	510.4	1168	1230	1203.5	164.6	1153
la38	1201	1243	1225.6	893.5	1205	1246	1225.8	79.5	1196
la40	1224	1268	1245.4	261.2	1233	1262	1245.2	27.7	1222

表 2: 他手法との比較

			1 2.	15 1 74 C 0.	PUTA				
Problem	PGA	EDX+JOX	YN97	Ono96	Matt	Nowi	Aarts	Appl	YN96
abz7	667	670	678	680	672	-	668	668	665
abz8	674	683	686	685	683	-	670	687	675
abz9	689	686	697	702	703	-	691	707	686
la21	1046	1046	1046	1050	1053	1047	1053	1053	1046
la24	935	935	935	944	938	939	935	935	935
la25	977	977	977	984	977	977	983	977	977
la27	1235	1236	1235	1258	1236	1236	1249	1269	1235
la29	1167	1167	1166	1189	1184	1160	1185	1195	1154
la38	1201	1196	1196	1202	1201	1196	1208	1209	1198
la40	1224	1224	1224	1235	1228	1229	1225	1222	1228

さらに優れた結果を得ることができると期待される.ただし,ある遊休時間に作業を配置することで他の時間に,より大きな遊休時間ができてしまう可能性があるという欠点がある.

今後の課題として,提案アルゴリズムのこのような欠点の改善と得られる解の精度を安定させるための改良を 行いたい.

#### 参考文献

- [1] Gen , M. and Cheng , R. , "Genetic Algorithm
   & Engineering Optimization" , pp.235–296 ,
   J.WILEY , 1999.
- [2] 北野宏明, "遺伝的アルゴリズム", 産業図書株式会社, 1993.
- [3] 平野広美,"クラスタ平均化法を組み込んだ遺伝的 アルゴリズムによるジョブショップスケジューリング問題の解法",人工知能学会誌,Vol.27,No.5, pp.769-777,1995.
- [4] 松井正一,渡部勇,所健一,"パラメータフリー遺伝的 アルゴリズムによるジョブショップスケジューリン グ問題の解法",電学論 C, Vol.123, No.1, pp.130– 137, 2003.

- [5] 渡部正人, 井田憲一, 玄光男, "ジョブショップスケジューリング問題におけるアクティブソリューション空間と探索", 電学論 C, 投稿中, 2002.
- [6] Mattfeld , D.C . and Vaessens , R.J.M. , OR-Library , http://mscmga.ms.ic.ac.uk/jeb/orlib/
- [7] 佐久間淳,小林重信,"JSP のための外挿的交叉 EDX の提案と交叉 JOX との融合",第 27 回知能システムシンポジウム,pp.49-54,2000.
- [8] 山田武士,中野良平,"遺伝的局所探索によるジョブショップスケジューリング問題の解法",情報処理学会誌論文誌, Vol.38, No.6, pp.1126-1138, 1997.
- [9] Ono , I. , Yamamura , M . and Kobayashi , S. , "A Genetic Algorithm for Job-based Order Crossover" , Proceedings of 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation , pp.547–552, 1996.

連絡先:  $\mp 371\text{-}0816$  群馬県前橋市上佐鳥町 460-1 前橋工科大学大学院工学研究科 井田 憲一

E-mail: ida@maebashi-it.ac.jp

TEL: 027-265-7360 FAX: 027-265-7360

# T形単鉄筋コンクリート梁の終局強さにおける断面積最適化問題 のGAによる解法

GA-based Method for a Single Reinforced Concrete Beam Optimal T Cross Section Design Problem Using the Ultimate Strength

> 横田孝雄, 和田昇三<sup>†</sup>, 田口雄章, 玄 光男<sup>††</sup> 足利工業大学 経営情報工学科,建築学科<sup>†</sup> 早稲田大学大学院情報生産システム研究科<sup>††</sup>

Takao YOKOTA, Shozo WADA<sup>†</sup>, Takeaki TAGUCHI and Mitsuo GEN<sup>††</sup>
Dep. of Industrial and Systems Engineering, <sup>†</sup>Dep. of Architecture
Ashikaga Institute of Technology, Ashikaga 326-8558

<sup>††</sup>Graduate School of Information, Production and Systems Engineering,
Waseda University

#### Abstract

In this paper, we formulate an optimal T cross section design (OTCD) problem with single reinforced concrete beams for a constrained ultimate strength in the concrete/steel and solve it directly by keeping the constraints based on an improved genetic algorithm (GA). We discuss the efficiency between the proposed method and the traditional method.

Keywords: Reinforced concrete, Ultimate strength, Genetic Algorithm (GA)

# 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の設計計算方法は弾性設計法と塑性設計法の2種に大別される.前者は許容応力度設計法とも呼ばれるもので,部材断面の応力度をある仮定のもとに弾性理論を用いて算出し,これが許容応力度以下となるように断面を決定する方法である.

また,後者の1つに終局強さ設計方法がある.これは,部材の破壊荷重を塑性理論を用いて求め,設計荷重がこの破壊荷重に対して十分な安全率をもつかを検討するものである.

他方,一般に構造物の設計方針は重厚長大から 軽薄短小を第1目的とし,さらに各種の機能的条件をも満たすような,きわめて厳しい条件下で進 められてきている.このような最適化問題は一般 に非線形計画問題として定式化され,組合せ最適 化問題として扱われることが多い.しかも,この 種の問題は従来法では最適解を得ることが難しい. 近年,遺伝的アルゴリズム(GA)が組合せ最適化 問題の解法として注目されている[1].

前報では遺伝的アルゴリズムによる矩形単鉄筋 コンクリート梁の終局強さにおける断面積最適化 問題の解法を試み提案アルゴリズムの有効性を確 認した[2].

本論文では、T 形単鉄筋コンクリート梁の終局 強さにおける断面積最適化問題を定式化し、遺伝 的アルゴリズムを用いた組合せ最適化手法による 解法を試みる. さらに数値実験により提案アルゴ リズムの有効性を検討する.

- 2. 曲げモーメントを受ける部材の終 局強さ
- 2.1 設計断面耐力の計算上の仮定 ここでは終局強さの検討は以下の仮定を基にす る[3][4].
- 1. コンクリートの引張応力は無視する.
- 2. 繊維ひずみは中立軸よりの距離に比例する.
- 3. 鉄筋応力度  $\sigma_s$  は,降伏点以下ではそのひずみ  $\epsilon_s$  の  $E_s$  倍,降伏点に相当する大きさ以上の ひずみに対しては,ひずみに関係なく降伏点 応力度  $\sigma_{sy}$  に等しいとする (図 1).
- 4. コンクリートの圧縮応力度の分布は,圧縮側の 断面の幅が一定と見なせる場合,図2に示す 長方形換算応力分布とする.断面が長方形,I 形,T形,箱形以外の特殊な形状については,

図3の応力度 - ひずみ曲線により圧縮応力度 を計算する.

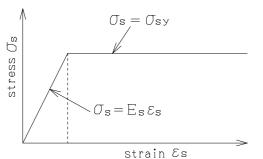


図 1: 鉄筋の応力度-ひずみ曲線

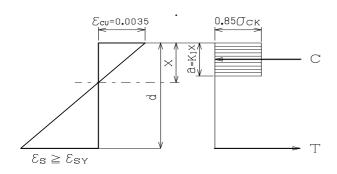


図 2: コンクリートの圧縮応力度分布

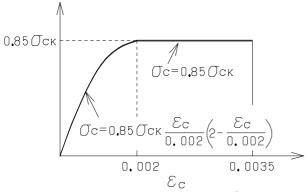


図 3: コンクリートの応力度-ひずみ曲線

## 2.2 曲げ部材の終局強さ

#### 2.2.1 单鉄筋長方形断面

図4に示す単鉄筋長方形断面の破壊抵抗曲げモーメント (断面耐力) $M_U$  は,長方形換算応力分布の高さをa,鉄筋比をp,鉄筋/コンクリート応力比をmとすると,

$$a = \frac{A_s \sigma_{sy}}{0.85 \sigma_{ck} b} = pmd, \tag{1}$$

$$\exists \, \exists \, \overline{C} \, , \, p = \frac{A_s}{bd}, \, m = \frac{\sigma_{sy}}{0.85\sigma_{ck}}$$
 (2)

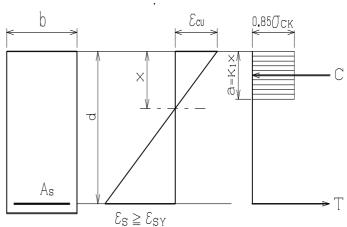


図 4: 単鉄筋長方形断面の圧縮応力度分布

$$M_u = A_s \sigma_{sy} \left( d - \frac{a}{2} \right) = b d^2 \sigma_{sy} p \left( 1 - \frac{pm}{2} \right)$$
 (3)

ここで,図 1 から図 4 での記号は,d と b は断面積の有効高さと幅, $A_s$  は鉄筋の断面積,x は中立軸 N-N と上縁間の距離, $\epsilon_s$  は鉄筋のひずみ, $\epsilon_{sy}$  は鉄筋の幸福点ひずみ, $\epsilon_{cu}$  はコンクリート断面上端の終局ひずみ, $k_1=0.8$  は [ 平均/ 最大] 応力度と [ 上縁より圧縮合力 C までの距離/ 中立軸までの距離 x] との係数, $\sigma_{ck}$  は円柱供試体圧縮強度である.

式 (3) が成立するためには,まず,引張鉄筋が降伏し,ついで上縁コンクリートが圧壊しなければならない.よって,終局釣合い鉄筋比を  $P_b$  とすると, $p \leq 0.75 p_b$  で与えられ.

$$p_b = 0.68 \left[ \frac{\epsilon'_{cu}}{\epsilon_{cu} + \sigma_{sy}/E_s} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{ck}} \right]$$
$$= \frac{0.8}{m} \cdot \frac{7350}{7350 + \sigma_{sy}}$$
(4)

ここで, $\epsilon'_{cu}$ :コンクリートの終局ひずみ=0.0035, $E_s$ :Young 係数= $2.1\times 10^6 [{\rm kgf}/cm^2]$ .

#### 2.2.2 単鉄筋 T 形断面

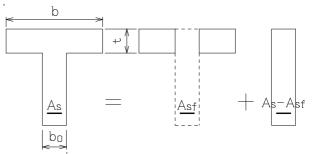


図 5: 単鉄筋 T 形断面

単鉄筋  $\Tau$  形断面の破壊抵抗曲げモーメント (断面耐力) $M_U$  は ,

 $t \leq pmd$  の場合:

 ${
m T}$  形断面として扱い, $p=A_s/(b\cdot d)$  として検討する.長方形換算応力分布の高さ a とフランジ部に対応する鉄筋  $A_{sf}$  は

$$a = \frac{(A_s - A_{sf})\sigma_{sy}}{0.85\sigma_{ck}b_0}, \quad A_{sf} = \frac{0.85\sigma_{ck}(b - b_0)t}{\sigma_{sy}}$$
 (5)

破壊抵抗曲げモーメント (断面耐力) $M_U$  は,

$$M_u = (A_s - A_{sf})\sigma_{sy}\left(d - \frac{a}{2}\right) + A_{sf}\sigma_{sy}\left(d - \frac{a}{2}\right)$$
(6)

式 (6) が成立するためには,鉄筋量の条件 長方形部の鉄筋比  $p_{s-sf} \leq$  終局釣合N鉄筋比  $P_b$ 

長方形部の鉄筋比 $p_{s-sf} \leq$ 終局釣合い鉄筋比 $P_{t}$ を満たさなければならない.すなわち,

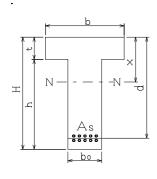
$$\frac{As - A_{sf}}{b_0 d} \le 0.75 p_b \tag{7}$$

 $t \ge pmd$  の場合:

長方形断面として扱い, $p=A_s/(b\cdot d)$  として検討する.

# 3. T形単鉄筋コンクリート梁の終局 強さにおける断面積最適化

図 6 に示す T 形単鉄筋コンクリート梁について,終局強さにより制約した断面積  $F(q,\phi,d,b,t)$  最小化問題を定式化する.



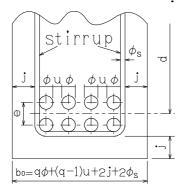


図 6:

$$\min \quad F(\phi,q,\phi,d,b,t) = A \tag{8}$$

s. t. 
$$G_1 = b_0 \ge b_1$$
 (9)

$$G_2 = t < b_2$$

$$G_3 = p_b \ge b_3 \tag{11}$$

$$G_4 = M_u \ge b_4 \tag{12}$$

 $q^{L} \leq q \leq q^{U}$ , integer,  $\phi^{L} \leq \phi \leq \phi^{U}$ , integer,  $d^{L} \leq d \leq d^{U}$ , integer,  $b^{L} \leq b \leq b^{U}$ , integer,  $t^{L} \leq t \leq t^{U}$ , integer,  $A = Hb_{0} + (b - b_{0})t$ ,  $b_{0} = q\phi + (q - 1)u + 2j + 2\phi_{s}$ ,  $A_{s} = 2q\pi\phi^{2}/4$ ,  $p = A_{s}/(bd)$ ,  $m = \sigma_{sy}/(0.85\sigma_{ck})$ ,  $b_{2} = pmd$   $A_{sf} = eq.(5)$ ,  $P_{b} = eq.(4)$ , a = eq(5),  $b_{3} = (A_{s} - A_{sf})/(0.75b_{0}d)$ ,  $M_{u} = eq(6)$ ,  $b_{4} = M_{ud}$ ,  $H = (d + e/2 + \phi/2 + \phi_{s} + j)$ ,

ここで, $F(\phi,q,d,b,t)$  は面積関数, $\phi$  は鉄筋の直径,q は 1 列の鉄筋数(モデルは 2 列配筋),d は T 断面の有効高さ,b と t はフランジ幅と厚さ, $b_0$  は ウエッブ幅, $p_b$  は終局釣合い鉄筋比, $M_{ud}$  は設計曲げ耐力である,

# 4. 評価関数

ここでは,横田等 [5] が提案する制約条件に次式の尺度  $d_i$  を導入した IGA(改良 GA) を用いる.

$$d_i = \begin{cases} 0; & G_i \le b_i, (i = 1 \cdots n) \\ (G_i - b_i)/b_i, & \text{otherwise} \end{cases}$$
 (13)

この尺度  $d_i$  を用いて評価関数を次のように定義する.

$$eval(V_k) = F(A)\left(1 - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^n d_i\right)$$
(14)

ここで定義した  $d_i$  は,i 番目の制約条件式の左辺が右辺に対してどのくらい大きいか,すなわち制約式を満たさない度合を示す尺度である.これをすべての制約式に対して求め,その平均値を求め,そのオーバーした分をそのときの重量関数値から減じることにより,評価関数値を計算するという一種のスケーリングの考え方を用いている.

次式により最もよい染色体を選ぶ、

$$V^* = \underset{V_k}{\operatorname{argmin}} \{eval(V_k)\}$$
 (15)

$$mineval = min\{eval(V_k)\}$$
 (16)

ここで, $\operatorname{argmin}$  の  $\operatorname{arg}$  は  $\operatorname{argument}$  の省略形であり,関数  $\operatorname{eval}(V_k)$  の最小値の引数  $V_k$  を採用することを意味する.

(10)

# 5. アルゴリズム

GA による T 形単鉄筋コンクリート梁の終局強 さにおける断面積最適化の解法は以下のアルゴリズムとする.

Step 1: 各種パラメータの設定

集団サイズ  $pop\_size$ , 交叉確率  $P_C$ , 突然変異確率  $P_M$ , 最大世代数 maxgen, 世代数 gen=0, 初期評価関数値 maxeval=0.

Step 2: 初期の染色体集団の作成

制約条件を満たす染色体  $V_k (k=1,\ldots,$ 

pop\_size) をランダムに生成する.

Step 3: 適合度の計算

制約条件を満たす染色体  $V_k(k=1,\ldots,pop\_size)$  をランダムに生成する.

もし,制約条件を満たす染色体が見つからない場合は,実行可能解が存在しないものとして終了する.

Step 4: 遺伝的操作

親の染色体  $V_k(k=1,\dots,pop\_size)$  と交叉および突然変異によって新しく生成された子供の染色体  $V_l(l=1,\dots,ccnt+mcnt)$  を生成する.ただし,ccnt と mcnt はそれぞれ交叉と突然変異によって生成された子供の染色体の数.

Step 5: 次世代の生成

生成された子供の染色体  $V_l$  のなかから適合度 の高い順に  $pop\_size$  の数だけ選択し,次世代 の  $V_k$  とする . gen < maxgen ならば,Step 3 へ戻り,そうでなければ  $V^*$  および maxeval を出力して終了する.

# 6. 数值実験

図 6 および表 1 から断面積最適化問題を GA により解く . GA パラメータは次のように設定する .

表 1: 変数と係数

$\phi = \{3.49, 3.18\}$	8, 2.86, 2.54, 2.22, 1.9	$01, 1.59$   $3 \le q \le 10$
$80 \le b \le 200$	$8 \le t \le 20$	$50 \le d \le 100$
$b_1 = 20$	$b_4 = M_{ud} = 199[tfm]$	e = 4, u = 4, j = 4
$\phi_s = 1.27$	$\sigma_{ck}$ =240[kgf/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{sy}$ =3000[kgf/cm <sup>2</sup> ]

集団サイズ  $(pop\_size)$  20 交叉確率  $(P_C)$  0.4 突然変異確率  $(P_M)$  0.1 世代数 (maxgen) 500

# 7. 実験結果

IGA のアルゴリズムにより断面積最適化問題を 世代数 500 として計算したところ, 258 世代で次 の結果を得た.

 $V_{1-5}^* = [3.49, 5, 56, 41.5, 14]$ 

この値は GA による T 形単鉄筋コンクリート梁の終局強さにおける断面積最適化問題の最良解である. また,評価関数値 (最小断面積) は $F(A)=3740.9[cm^2]$  を得た.

# 8. 評 価

GA による T 形単鉄筋コンクリート梁の終局強 さにおける断面積最適化の解法で表 2 に示す設計 変数を得た.

表 2: 設計変数と係数

終局強さ	$F(\phi, q)$	(d,b,t)	$b_0$	$M_u \ge b_4$
従来法	3.18, 6, 5	6, 120, 15	60	$199 \ge 199$
IGA	3.49, 5, 5	6, 111, 14	41.5	$200 \ge 199$
終局強さ	$A_s[cm^2],$	$A_{sf}[cm^2]$	Н	$A[cm^2]$
従来法	95.3,	53.6	70	4550
IGA	95.6,	49.7	67	3741

ここで,提案手法で得られた断面積は従来法と 比較し17.8%改善されていることが判った.

また,表3は許容応力度設計法と終局強さ設計 法の比較である.

表 3:

設計法	$\sigma_{ck/ca}$	$\sigma_{sy/sa}$	$b \times t$	$b_0 \times H$	$A[cm^2]$
終局強さ	$\sigma_{ck} =$	$\sigma_{sy} =$	$170 \times 5$	$33 \times 52$	2383
	240	3000			
応力度	$\sigma_{ca} =$	$\sigma_{sa} =$	$173 \times 10$	$37 \times 60$	3916
	80	1800			

表3ではフランジ幅をほぼ同寸法とした弾性と 塑性強度検討の比較で,設計荷重が破壊荷重のと きの寸法形状を予測でき,弾性強度に対して断面 積比ではおよそ60%となった.

単鉄筋 T 形断面での強度検討は  $t \leq pmd$  の場合 T 形断面として扱い ,  $t \geq pmd$  の場合は長方 形断面として扱うので の条件を組合せ最適化手 法に組込むことで , 常時 T 形断面の寸法形状を得られた .

# 9. まとめ

数値実験から次の事柄が明らかとなった.

- 1) 提案手法で得られた設計変数により T 形断面積を改善でき有効性が確認された.
- 2) 弾性と塑性強度検討の比較で,設計荷重が破壊荷重のときの寸法形状を予測できた.

# 参考文献

- [1] Gen, M. and R. Cheng: Genetic Algorithms and Engineering Design, John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [2] T. YOKOTA, S. WADA, T. TAGUCHI, M. GEN: "GA-based Method for a Single Reinforced Concrete Beam Optimal Rectangular Cross Section Design Problem Using the Ultimate Strength", Proc. of the 33th Inter. Conf. on Computers & Industrial Eng., Jeju, Korea, 2004
- [3] 赤尾親助,水野俊一:演習鉄筋コンクリート工学, オーム社,1984.
- [4] 岡田 清,伊藤和幸,平澤征夫,不破 昭:改訂版 鉄筋コンクリート工学演習,鹿島出版会,1988.
- [5] 横田孝雄,玄光男,井田憲一,田口雄章:改良遺伝的アルゴリズムによるシステム信頼性設計の最適化,電子情報通信学会論文誌(A),Vol.J78-A,No.6,pp.702-709,1995.

# 巡回セールスマン問題に対する遺伝的操作の提案

A Proposal of Genetic Operations for TSP

遠山 宏明,井田 憲一,阿部 直子 Hiroaki Tohyama, Kenichi Ida, Naoko Abe

#### 前橋工科大学情報工学科

Department of Information Engineering, Maebashi Institute of Technology

#### Abstract

Traveling salesperson Problem (TSP) is a typical combinatorial optimization problem that is known to be NP-hard. Genetic algorithm (GA) has been applied to TSP well since the use is easy and a good solution with comparatively high accuracy is obtained for a short time. In this paper, we propose a solution method of TSP using GA. We define the good character of individual as the order which traverses cities, and the good character is used as the guide which designs our solution method. The proposed crossover inherits the good character that parents possess to the children. The proposed mutation is used as the neighboring search because our crossover keeps up diversity of the population well. Moreover, we verified the effectiveness of our method by a numerical experiment.

#### 1 はじめに

巡回セールスマン問題は NP 困難であることが知られている典型的な組合せ最適化問題である.インスタンスとして無向グラフでかつ三角不等式をみたすように制限した対称 TSP を用いても,未だ効率的なアルゴリズムは発見されていない.そのため,TSP に関してさまざまな近似アルゴリズムが研究されている.中でも,遺伝的アルゴリズムは短時間かつ比較的高い確率で良い解を得られることから,TSP に良く適用されている.

GA は多くの解候補を同時に探索する多点探索を特徴としている.GA の遺伝的操作である交叉は二つの解候補(親)の近傍を探索する操作である.以上の点から,一般的に次のことが要求される.

- 1. 親の持つ良い形質を子に継承させる.
- 2. 個体集団の多様性を維持する.

しかしながら , これら二つの要求は互いに相反するので , このトレードオフが重要であると指摘されている [3][6] .

TSP に対する GA の手法の多くは,巡回路を構成する辺を良い形質と定めている.そして,それら手法の交叉では親の持つ辺を子に継承させている.辺を継承させる最初の交叉は Grefenstette によって提案された [1]. Whitley が提案した交叉 EX[5] は Grefenstette の交叉を改善したものである.EX は Grefenstette の交叉よりも辺の継承率を増加させている.

 $\mathrm{SXX}[7]$  および  $\mathrm{EXX}[2]$  は親の辺を完全に継承させる 交叉である.しかも, $\mathrm{SXX}$  と  $\mathrm{EXX}$  においては生成され る巡回路の長さは親の巡回路長とほとんど同じであるこ

とが保証されている. しかし , SXX と EXX は個体集団 の多様性を維持することができない [3] .

 $\mathrm{EAX}[3]$  は辺の継承率と生成される個体のバリエーションの 2 つのバランスを考えて開発された、しかしながら, $\mathrm{TSP}$  の解空間のほとんどが交差する辺を持っている。この点で  $\mathrm{EAX}$  によって生成された巡回路は交差する辺を全く持たないため, $\mathrm{EAX}$  は解空間を十分に探索できないと考えられる.

本論文では、GA の遺伝的操作を提案する. 我々は都市を巡回する順番を個体の良い形質と定め、この良い形質を解法の設計指針として用いる. 提案手法では生成された個体は交差する辺を持つかもしれないが、これは集団の多様性を維持するための助けになるであろう. そして、交差する辺を持つ解候補は 2-opt 法 [2] で改善される.

我々の交叉は解空間を大域的に探索するため,局所的な近傍探索とは言えない.この点を補うために,我々は近傍探索として働く突然変異を提案する.これは,いくつかの都市の中からランダムに都市を一つ選び,より良い解を得られる場所にこの選んだ都市の巡回する順番を変える.このように我々の手法は交叉と突然変異のバランスによって良い解が得られる.さらに,ベンチマーク問題を用いて数値実験を行うことで我々の手法の有効性を検証した.

#### 2 巡回セールスマン問題

 $G=(V,\,E)$  を n 頂点完全グラフとし, $d:E o {f Z}^+$ を任意の 2 頂点  $c,\,c'\in V$  に対して,

d(c,c') = d(c',c)

をみたす距離関数とする .G 上の巡回路とは ,

$$i_j \neq i_k \ (1 \leq j, \ k \leq n, \ j \neq k)$$

をみたす頂点の列  $t:c_{i_1},\cdots,c_{i_n}$  のことである.巡回路 t の長さ l は次のように定義される.

$$l = \sum_{j=1}^{n-1} d(c_{i_j}, c_{i_{j+1}}) + d(c_{i_n}, c_{i_1}).$$

巡回セールスマン問題とは,G と d が与えられたとき,G 上の長さが最小となる巡回路を求める問題である.以下では,グラフの頂点を都市と呼ぶ.

# 3 本論

本論文では,GAの遺伝的操作である交叉と突然変異を提案する.

#### 3.1 交叉

 $t:c_{i_1},\cdots,c_{i_n}$  を巡回路とし, $c_s(=c_{i_j}),c_k(=c_{i_l})$  を都市とする. $c_s$  に対する都市  $c_k$  の巡回順位  $r_t(c_s,c_k)$ は,次のように定義される.

$$r_t(c_s,\ c_k) = \left\{ egin{array}{ll} l-j, & i_l > i_j \ \mathfrak{O}$$
とき、 $n-j+l, &$  そうでないとき.

すなわち,巡回順位  $r_t(c_s, c_k)$  は巡回路 t において  $c_s$  を出発点としたとき,都市  $c_k$  が訪問される順番を表す.

たとえば ,  $V=\{c_1,c_2,\cdots,c_n\}$  を都市集合とし , 巡回路を  $t:\ c_6,c_4,c_2,c_5,c_1,c_9,c_3,c_{10},c_8,c_7$  とすると , それぞれ  $r_t(c_2,c_8)=6,\ r_t(c_3,c_4)=5$  となる .

次に,親1を $t_1$ :  $c_{i_1},\cdots,c_{i_n}$ ,親2を $t_2$ :  $c_{j_1},\cdots,c_{j_n}$ とする.提案する交叉の手順は以下のとおりである. Step1 任意に出発点となる都市 $c_s$ を選択する.

 ${f Step 2}$  各都市  $c_i$  について巡回順位  $r_{t_1}(c_s,\,c_i)$  および  $r_{t_2}(c_s,\,c_i)$  を計算する .

 ${f Step 3}$  各都市  $c_i$  について次の  $R_{s,i}$  を計算する .

$$R_{s,i} = r_{t_1}(c_s, c_i) + r_{t_2}(c_s, c_i).$$

 ${f Step 4} \ R_{s,i}$  が昇順になるように,都市を並べ替えることによって構成される巡回路  $t_c$  を生成する.

Step5 生成した巡回路  $t_c$  に 2-opt 法を適用し,生成された巡回路  $t_{c'}$  を子とする.

たとえば,親 1 を  $t_1$ :  $c_3,c_5,c_4,c_2,c_1,c_6$ ,親 2 を  $t_2$ :  $c_3,c_6,c_5,c_4,c_2,c_1$  とし,出発点として  $c_s=c_3$  が 選ばれたとする.このとき,各都市  $c_i$  に関する  $R_{s,i}$  は それぞれ次のよう求められる.

$$R_{3,1} = r_{t_1}(c_3, c_1) + r_{t_2}(c_3, c_1) = 4 + 5 = 9,$$

$$R_{3,2} = r_{t_1}(c_3, c_2) + r_{t_2}(c_3, c_2) = 3 + 4 = 7,$$

$$R_{3,3} = r_{t_1}(c_3, c_3) + r_{t_2}(c_3, c_3) = 0 + 0 = 0,$$

$$R_{3,4} = r_{t_1}(c_3, c_4) + r_{t_2}(c_3, c_4) = 2 + 3 = 5,$$

$$R_{3,5} = r_{t_1}(c_3, c_5) + r_{t_2}(c_3, c_5) = 1 + 2 = 3,$$

$$R_{3,6} = r_{t_1}(c_3, c_6) + r_{t_2}(c_3, c_6) = 5 + 1 = 6.$$

求められた  $R_{s,i}$  が昇順になるように各都市  $c_i$  を並べ替えると,新たな巡回路  $t_c$ :  $c_3,c_5,c_4,c_6,c_2,c_1$  を得ることができる.この巡回路に対して 2-opt 法を適用すると,巡回路  $t_{c'}$ :  $c_3,c_2,c_1,c_6,c_5,c_4$  を得る.この巡回路  $t_{c'}$  を子とする.

#### 3.2 突然変異

巡回路 t において都市 c の直前の都市を  $P_t(c)$  ,都市 c の直後の都市を  $N_t(c)$  により表す.都市 c の近隣のm 個の都市の集合を  $N_m(c)$  とする.このとき,提案する突然変異は次の手順を repN 回繰り返す(以下,図 1 参照).

Step1 任意に都市  $c_s$  を選択する.

 ${f Step 2}$  都市  $c\in N_m(c_s)-\{P_t(c_s),\,c_s,\,N_t(c_s)\}$  に対して次をそれぞれ計算する.

$$l_t(0,c) = d(P_t(c), c_s) + d(c_s, c),$$
  
$$l_t(1,c) = d(c, c_s) + d(c_s, N_t(c)).$$

 $\mathbf{Step3}\ l_t(i,\,c)$  を最小にする i と c に対して ,

(i) i = 0 かつ,  $l_t(0,c) + d(P_t(c_s), N_t(c_s))$   $< d(P_t(c_s), c_s) + d(c_s, N_t(c_s)) + d(P_t(c), c),$ 

ならば, $P_t(c)$  から  $c_s$  を経由して c に,そして, $P_t(c_s)$  から直接, $N_t(c_s)$  へ巡回するように巡回路 t を変更する.

(ii) i=1 かつ ,  $l_t(1,c) + d(P_t(c_s), N_t(c_s)) < d(P_t(c_s), c_s) + d(c_s, N_t(c_s)) + d(c, N_t(c)),$ 

ならば,c から  $c_s$  を経由して  $N_t(c)$  に,そして, $P_t(c_s)$  から直接, $N_t(c_s)$  へ巡回するように巡回路 t を変更する.

#### 3.3 提案手法

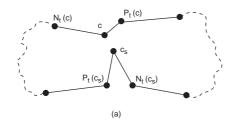
提案手法の処理の主要部分を以下に示す.

[初期解生成] popN 個の巡回路をランダムに生成し, すべてに 2-opt 法を適用し, 初期集団 C とする.

[複製選択] popN/2 個の親の対を , C からランダムに選択する .

[子個体の生成] 各両親に対して交叉を行い,それぞれ 2 個の子を生成する.生成された子すべてに 2-opt 法 および突然変異を適用する.

[生存選択] 両親と生成された子のすべてを合わせた集団から,エリート選択により popN 個選択し,次世代集団 C とする.



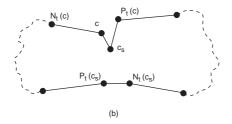


図 1: 突然変異の前 (a) と後 (b) の巡回路

#### 4 性能評価

#### 4.1 実験設定

TSP ベンチマーク問題 eil101 と kroA200 を用いて,提案手法(以下,pGA)と既存手法との比較を行った.比較対象は,前川らの手法(以下,MGA)[2],永田らの手法(以下,NGA)[3] である.個体数を,eil101 は 100,kroA200 は 200 とし,popN で表す.世代数は 300 とした.pGA においては交叉確率を 1.0,近隣都市数 m は 20,repN は popN とした.

#### 4.2 実験結果

実験結果を表 1 に示す.表 1 の Best, Worst, Ave., Freq. は,それぞれ試行回数 100 回で得られた巡回路長  $b_i$  の最小値,最大値,平均値( $\sum b_i/100$ ),最適解を得た回数である.ただし,MGA についての結果は文献 [2] より引用した.また,図 2,図 4 は世代毎の最小巡回路 長の推移を試行回数 100 回の平均で表した.表 1 から,pGA は MGA と比較すると最適解を得る回数が多く,最大値および平均値については最適解に近い値を得た.しかし,NGA と比較すると,kroA200 において精度的に追いつくことができなかった.そして,図 3,図 5 は,提案手法で得られた最適解を視覚化したものである.

# 5 まとめ

既存手法の多くは親からの良い形質遺伝として辺に着目していたが、本論文では、都市を巡回する順位に着目し、従来とは異なる手法を提案した、MGAと比較するとpGAは高い精度をもつといえるが、NGAの精度には追いつくことができなかった、以上を改善点として、今後の課題とする、解決のひとつの方法として、分割統治法を用いる手法が考えられる。

表 1: 実験結果 (\*印は最適解)

_	Instance		Compared Method			
Insta			NGA	pGA		
	Best	629	629	629		
eil101	Worst	630	629	629		
629*	Ave.	629.02	629.00	629.00		
	Freq.	98	100	100		
	Best	29368	29368	29368		
kroA200	Worst	29445	29368	29384		
29368*	Ave.	29375.29	29368.00	29369.23		
	Freq.	72	100	89		

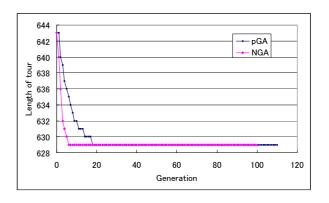


図 2: 世代毎の巡回路長の推移 (eil101)

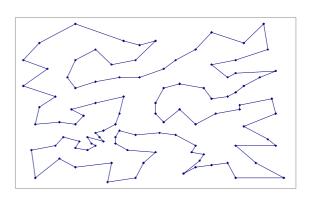


図 3: 最適解の巡回路 (eil101)

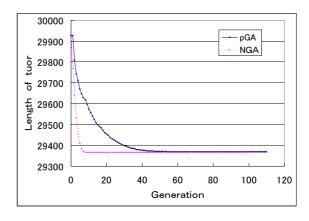


図 4: 世代毎の巡回路長の推移 (kroA200)

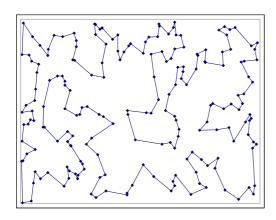


図 5: 最適解の巡回路 (kroA200)

#### 参考文献

- [1] Grefenstette, J., Gopal, R., Rosmaita, B., and Gucht, D.: "Genetic Algorithms for the Traveling Salesman Problem", *Proc. 1st ICGA*, pp. 160–165, 1985.
- [2] 前川 景示, 玉置 久, 喜多 一, 西川 禧一:"遺 伝アルゴリズムによる巡回セールスマン問題の一解法", 計測自動制御学会論文誌, Vol. 31, No. 5, pp. 598-605, 1995.
- [3] 永田 裕一,小林 重信: "巡回セールスマン問題 に対する交叉:枝組み立て交叉の提案と評価",人 工知能学会誌, Vol. 14, No. 5, pp. 848-859, 1999.
- [4] TSPLIB95, http://www.iwr.uni-heidelberg.de/groups.comopt/software/TSPLIB95/index.html(1995).
- [5] Whitley, D., Starkerather, T., and Fuwuay, D.: "Scheduling Problems and Traveling Salesman: The Genetic Edge Recombination Operator", Proc. 3rd ICGA, pp. 133–140, 1989.
- [6] 柳浦 睦憲 , 茨木 俊秀:"順序問題における遺伝的 交叉方法に対する一考察", 電気学会論文誌 C, Vol. 114, No. 6, pp713-720, 1994.
- [7] 山村 雅幸,小野 貴久,小林 重信:"形質の遺伝を重視した遺伝的アルゴリズムに基づく巡回セールスマン問題の解法",人工知能学会誌,Vol. 7, No. 6,pp1049-1059,1992.

連絡先: 〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1 前橋工科大学情報工学科 遠山 宏明 E-mail: tohyama@maebashi-it.ac.jp TEL: 027-265-7358 FAX: 027-265-7358

# ハイブリッド GA/IA アルゴリズムによる 多目的非線形整数計画問題の一解法

Method for Solving Multiobjective Nonlinear Integer Programming Problems using Hybrid GA/IA Algorithms

田口雄章\* 横田孝雄\* Takeaki TAGUCHI Takao YOKOTA \*足利工業大学 Ashikaga Institute of Technology

玄光男\*\* Mitsuo GEN \*\* 早稲田大学大学院 Waseda University

#### Abstract

In this paper, we describe an implementation of a hybrid GA/IA algorithm (HGA) which combine a Genetic Algorithm (GA) with the Immune Algorithm (IA) for solving multiobjective nonlinear integer programming problems. This proposed method can find better quality Pareto

Moreover, we apply the HGA for solving the optimal design problem of the system reliability as a numerical example of the multiobjective nonlinear integer programming problem.

We compare the proposed method with the simple genetic algorithm to verify its effectiveness.

Key words: Genetic Algorithm, Immune Algorithm, Multiobjective Nonlinear Integer Programming.

#### はじめに 1

近年,高度情報化社会の評価の多様化や諸資源の 節約を目的とした効率化の要求などにより,単一 の目的関数では補えない多目的計画問題の重要性 が高まってきている.多目的計画問題を解く場合, できるだけ多く(できれば全て)のパレート解を 見つけだす必要がある.

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm:GA) は、さまざまな組み合わせ最適化問題に適用され、せている、横田らは、制約条件を満たさない染色 その有効性が報告されている [1]-[7]. しかし GA は,大域的探索には優れているが,局所探索を行 ことにより,実行可能領域の外からも探索をする

わないため厳密解法に比べ最終的に得られる解の 制度が劣るという問題点がある. そのため GA と 局所探索法組み合わせたハイブリッド遺伝的アル ゴリズム (Hybrid Genetic Algorithm:HGA) が 研究され報告されている.

非線形整数計画問題に GA を適用した場合,遺 伝的操作によって生成される染色体が制約条件を 満たさないことが多く、それが探索効率を悪化さ 体の情報をペナルティーとして評価関数に含める ことができる改良 GA を提案している [8].

一方,GAとは異なる最適化手法として,生体の もつ免疫システムに基づいた手法が提案されてい る. 森らは, 免疫システムに基づいた最適化手法と して免疫アルゴリズム (Immune Algorithm:IA) を提案している[9].このIAは,解の初期収束を 避け多様性を維持するとともに、複数の準最適解 得ることが可能である.

本研究では,多目的非線形整数計画問題を解く ために , GA と IA を組み合わせたハイブリッド GA/IA アルゴリズムを提案する.提案する手法 は,解の多様性を維持することで,より精度の高 いパレート解を見つけだすことができる.更に. 多目的非線形整数計画問題の数値例としてシステ ム信頼性の最適設計問題を取り上げ, GAと HGA の比較実験を行う.

# 多目的非線形整数計画問題

n 個の決定変数,m 個のシステム制約条件 q 個の 目的関数を伴う多目的非線形整数計画問題は(m-NIP)は,次のように定式化される.

m - NIP:

$$\min z_t = f_t(\boldsymbol{x}), \ t = 1, 2, \cdots, q$$
 (1)ここで, $\kappa$ , $p$  は定数, $gen$  は世 s.  $\mathrm{t.}g_i(\boldsymbol{x}) \leq b_i, \ i = 1, 2, \cdots, m$  は最大世代数, $\bar{f}_t$  は 番目の目的 表し, $d_i$  は次のように定義する.

ここで, $x = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]$ で, $f_t(x)$ はt番目 の非線形な目的関数 ,  $g_i(x)$  は i 番目のシステム制 約条件, $b_i$ はi番目のシステム制約条件における 右辺定数である.

# ハイブリッド GA/IA アルゴリズ

#### 3.1 遺伝子表現

n 要素かなる一つの染色体  $v_k(k)$ 

目の解集合として表現する.ここで,pop\_sizeは 集団サイズとする.

$$v_k = [x_{k1} \ x_{k2} \ \cdots \ x_{kn}]$$

#### 3.2評価関数

#### 3.2.1ペナルティーの定義

GA は, 本来ヒューリスティックアルゴリズムで あり,生成された染色体がシステム制約条件を満 たさないことがあるため,そのような染色体には, ペナルティーを与える.本稿では,

$$P_t(v_k) = \kappa \left(\frac{gen}{maxgen}\right)^p \bar{f}_t \sum_{i=1}^m d_i,$$
  
$$k = 1, 2, \dots, pop\_size, \ t = 1, 2, \dots, q(3)$$

のようなペナルティー項を与えることにより、 各目的関数値を次のように定義する.

$$z_{kt} = f_t(v_k) + P_t(v_k),$$
  
 $k = 1, 2, \dots, pop\_size, t = 1, 2, \dots, q(4)$ 

(1)ここで, $\kappa$ ,p は定数,gen は世代数,maxgenは最大世代数, $ar{f}_t$  は t 番目の目的関数値の平均を

$$d_{i} = \begin{cases} 0 & ; g_{i}(v_{k}) \leq b_{i} \\ \frac{g_{i}(v_{k}) - b_{i}}{b_{i}} & ; g_{i}(v_{k}) > b_{i} \end{cases}$$
 (5)

#### 目的関数値の評価と評価関数 3.2.2

ここでは,目的関数値を評価する方法として,ここ では,目的関数値を評価する方法として,MDI法 (Methd of Displaced Ideal)を使う[11]. MDI法 は,各解の目的関数値とその最大値との最長,最 短,およびチェビシェフ距離を計算し,その和が = 最小となる解を最良な妥協解として採用するもの  $1,2,\cdots,pop\_size)$  を n 個の決定変数の k 番 である.ここで,現世代(gen)までの各目的関

数値の最大値,最小値をそれぞれ次のように定義 3.3.2 する.

$$z_{t}^{*(gen)} = \min_{k} \{z_{t}^{*(gen-1)}, z_{kt} | \forall k \},$$

$$z_{t}^{-(gen)} = \max_{k} \{z_{t}^{-(gen-1)}, z_{kt} | \forall k \},$$

$$t = 1, 2, \dots, q$$

MDI法 (Lp-metric の計算)

$$L_{rk} = \left\{ \sum_{t=1}^{q} \left( \frac{z_{kt} - z_{t}^{*(gen)}}{z_{t}^{-(gen)} - z_{t}^{*(gen)}} \right)^{r} \right\}^{\frac{1}{r}},$$

$$r = 1, 2, \ k = 1, 2, \cdots, pop\_size$$

$$L_{rk} = \max_{t} \left\{ \frac{z_{kt} - z_{t}^{*(gen)}}{z_{t}^{-(gen)} - z_{t}^{*(gen)}} | t = 1, 2, \cdots, q \right\},$$

$$r = \infty, \ k = 1, 2, \cdots, pop\_size$$
(8)

上式より得られた  $L_{rk}$  から評価関数  $eval(v_k)$  を次のように定義する .

$$eval(v_k) = L_{1k} + L_{2k} + L_{\infty k},$$
  
$$k = 1, 2, \cdots, pop\_size \qquad (9)$$

#### 3.3 遺伝的操作

#### 3.3.1 交叉

ここでの交叉は,次のような算術交叉を用いる. 交叉を行う親の染色体を  $v_1,v_2$  としたとき,新 しい染色体  $v_1',v_2'$  の各要素は,次のように生成される.

$$\begin{array}{rcl} x'_{1j} & = & \min\{x_{1j}, x_{2j}\} + r \\ x'_{2j} & = & \min\{x_{1j}, x_{2j}\} + (|x_{1j} - x_{2j}| - r) \\ & & j = 1, 2, \cdots, n \end{array}$$

ここで,rは区間  $[0,|x_{1j}-x_{2j}|]$  内の整数の乱数.

#### 3.3.2 突然変異

ここでの突然変異は,突然変異をする遺伝子  $x_{kj}$  が選ばれたとき,区間  $[l_j,u_j]$  内の整数の中からランダムに選ぶ.

# 3.4 免疫アルゴリズム

(6) 免疫アルゴリズム (IA) は , 免疫システムの抗体 生産機構とその自己調節機構を工学的にモデル化 したものである . より多くのパレート解を得るため GA の選択に IA を導入する . そのアルゴリズムを以下に示す .

Step 1: 抗原の認識抗原をシステムに認識させる. 最適化問題において抗原は目的関数と制約条件にあたる.したがって,目的関数および制約条件をシステムに組み込み,それらを制御するパラメータがあれば入力情報として与えることにより抗原を認識させる.ここでは, GAの評価関数  $(eval(v_k))$  を用いる.

Step 2: 抗体間の親和度の計算全抗体について他の全ての抗体との親和度 (類似性)を計算する. 抗体間の親和度  $ay_{i,j}$  は次式により得られる.

$$ay_{i,j} = 1/(1 + H_{i,j})$$
 (10)

ここで , H は抗体 i と抗体 j との距離であり , H=0 のばあい , 抗体 i と抗体 j は完全に一致する . ここでは , 情報エントロピーを用いる .

Step 3: 抗原と抗体間の親和度の計算全抗体について抗原との親和度(解の評価値)を計算する.抗原と抗体間の親和度は次式により得られる.

$$ax_i = opt_i (1 \le opt_i \le 1) \tag{11}$$

ここで, $opt_i$ は抗原と抗体iとの結合力の強 さの評価値であり,0から1で規格化したも のである.したがって,親和度の値が1のと き,抗原の排除に成功した(これ以上最適な 解は存在しない)と考える.

Step 4: 記憶細胞とサプレッサー細胞への分化探 索過程で得られた抗体は記憶細胞とサプレッ サー細胞として生成される.その記憶細胞が 最適解の候補となる.

まず,全ての抗体の濃度を計算し,抗体の濃 度  $c_i$  が閾値 ( $T_c$ ) を超えた抗体 i を記憶細胞 に分化される.ただし,全ての記憶細胞とそ の抗体の親和度を計算し,記憶細胞との親和 度があらかじめ決めておいた閾値( $T_{ac3}$ )を 越えた場合に入れ換えを行う.また,記憶細 胞の数には限りがあり,記憶細胞の総数が上 限に達したばあい,保存された記憶細胞と分 化した記憶細胞の親和度を計算し,最も親和 度の高いものに入れ換える.ここでは,抗原 との親和度が選択した記憶細胞よりも分化し た記憶細胞の方が高い場合入れ換える.

次に,新しく分化した記憶細胞と同じ遺伝子 を持つサプレッサー細胞を分化させる.ただ し,同世代に分化させる記憶細胞は1つ以下 とし,候補の中で最も期待値の大きい抗体と

抗体 i の濃度は次式で与えられる.

$$c_i = rac{\sum_{j=1}^{pop\_size} ac_{i,j}}{pop\_size}$$
  $(0 \le c_i \le 1)(12)$  ここでは,多目的非線形整数計画問題の例として,次のような  $15$  個の決定変数, $1$  個のシステム制約  $ac_{i,j} = \begin{cases} 1 & ay_{i,j} \ge T_{ac1} \\ 0 & otherwise \end{cases}$   $(13)$  為件, $2$  個の目的関数を伴うシステム信頼性の最適設計問題を取りあげ,数値実験を行った.

ここで, $T_{ac1}$ は類似度の閾値であり, $pop\_size$ は抗体の総数である.したがって,抗体iと 抗体jがある程度の類似性を持っている場合, 同一種類の抗体と見なすことを示している.

Step 5: 抗体生成の促進と抑制

- 1) 抗原との間の親和度が低い抗体の中から  $pop\_size/2$  個を消滅させる.
- 2) 1) で生き残った各抗体について, サプレッ サー細胞との親和度を計算し,親和度が閾値 を超えた抗体を消滅させる.この操作により 同じ記憶細胞の生成を回避することができる.
- 3) 次世代に残る抗体の期待値は次式により 与えられる.

$$e_{i} = \frac{ax_{i}\Pi_{s=1}^{S}(1 - as_{i,s}^{k})}{c_{i}\sum_{j=1}^{pop\_size'}ax_{j}}$$

$$as_{i,s} = \begin{cases} 1 & ay_{i,s} \geq T_{ac2} \\ 0 & otherwise \end{cases}$$
(14)

$$as_{i,s} = \begin{cases} 1 & ay_{i,s} \ge T_{ac2} \\ 0 & otherwise \end{cases}$$
 (15)

ここで, $T_{ac2}$  は類似度の閾値であり,  $pop\_size'$  は生き残っている抗体数,S は サプレッサー細胞の総数, k は産生抑制力 (Suppress power) である.

式 (14) により期待値を与えることで, 抗原と の親和度が高い抗体ほど次世代に残る確率を 高く、サプレッサー細胞との親和度が高く濃 度が高いほど次世代に残る確率が低くする. サプレッサー細胞に反応する抗体の生成を抑 制することにより,同種類の記憶細胞の生成 を防ぎ、複数の解の探索効率を高める、

#### 数值実験例 4

次のような15個の決定変数,1個のシステム制約  $ac_{i,j} = \begin{cases} 1 & ay_{i,j} \geq T_{ac1} \\ 0 & otherwise \end{cases}$  (13) 条件,2 個の目的関数を伴うシステム信頼性の最適設計問題を取りあげ、数値実験を行った。 適設計問題を取りあげ,数値実験を行った.

$$\min \quad z_1(\boldsymbol{x}) = 1 - \prod_{j=1}^{15} \{1 - (1 - r_j)^{x_j}\}$$
 $\min \quad z_2(\boldsymbol{x}) = \sum_{j=1}^{15} c_j x_j$ 

$$\min \qquad z_2(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{15} c_i x_i$$

s. t. 
$$g_1(\boldsymbol{x}) = \sum_{j=1}^{15} w_j x_j \le 414$$
  
  $1 \le x_j \le 10$ : integer,  $j = 1, 2, \dots, n$ 

ここで,この問題の各係数は表1に示す.

この数値例に対し,集団サイズを 10, 交叉確率 を 0.4, 突然変異確率を 0.05, 最大世代数を 100 として実験を行ったところ,次のような結果が得られた.

#### [実行結果]

実行可能解より求められた  $z^*$  および  $z^-$ 

$$\begin{array}{cccc} z^* & z^- \\ z_1 & 0.0615 & 0.8742 \\ z_2 & 177.0000 & 395.0000 \end{array}$$

#### 最良解

*gen*: 98

 $v^*$ : [2 4 2 3 2 2 3 3 3 2 3 3 3 2 3]

 $eval(v^*)$ : 1.53086

#### 目的関数

$$z_1 = 0.322827, \ z_2 = 256.000000$$

図1は、提案した HGA と従来 GA で得られたパレート解を示したものである。また、それぞれのパレート解を TOPSIS 法 (Technique for the Order Preference by Similarity to Ideal Solution)による正の理想解とのユークリッド距離を計算し平均を求めると従来 GA が 0.7002 であるのに対し提案手法は 0.7397 であった。このことにより従来 GA に比べ提案 HGA の方がより理想解に到達していることがわかる。また、表 2 は、計算時間を同一にして得られたパレート解の数を比較している(100 回試行)。表 2 から、提案 HGA は従来 GA に対して 14% 救解効率が向上していることがわかる。

Table 2: パレート解の数

Las	·	1 101 02 22	
		GA	HGA
n	ıax	60	76
n	nin	35	36
a	vg	46.22	52.69

# 5 おわりに

本研究では,遺伝的アルゴリズムにペナルティーを導入した評価関数と免疫アルゴリズムを組み合わせたハイブリッド GA/IA アルゴリズムを多目的非線形整数計画問題適用し,そのための手法を提案した.提案した手法は,制約条件をペナルティーとして評価関数に含めたことにより,実行科の領域の外からも探索することができた.また,免疫アルゴリズムを GA の選択に導入したことで,従来 GA に比べてより精度の高いパレート解を多く取得でき,その中からよい妥協解を得ることができた.

#### References

- [1] Gen, M. & R. Cheng: Genetic Algorithms & Engineering Design, John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [2] Gen, M. & R. Cheng: Genetic Algorithms & Engineering Optimization, John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [3] Goldberg, D.: Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
- [4] Michalewicz, Z.: Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Springer-Verlag, 1992.
- [5] 安居院,長尾:ジェネティックアルゴリズム,昭 晃堂、1993.
- [6] 北野宏明編:遺伝的アルゴリズム, 産業図書,1993.

Table 1: 数値例の係数

$\overline{j}$	1	2	3	4	5	6	7	8
$r_j$	0.90	0.75	0.65	0.80	0.85	0.93	0.78	0.66
$c_{j}$	5	4	9	7	7	5	6	9
$w_{j}$	8	9	6	7	8	8	9	6
$\overline{j}$	9	10	11	12	13	14	15	
$r_j$	0.78	0.91	0.79	0.77	0.67	0.79	0.67	<u>.</u>
$c_{j}$	4	5	6	7	9	8	6	
$w_{j}$	7	8	9	7	6	5	7	

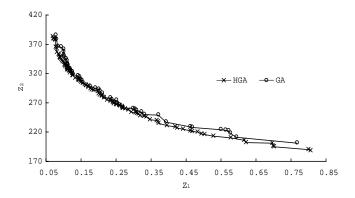


Figure 1: パレート解

- [7] 田口雄章,玄 光男,井田憲一:"遺伝的アルゴリズムによる多目的整数計画問題の一解法",信学論 A, Vol.J79-A, No.6, pp.1221-1223,1996.
- [8] 横田孝雄,玄 光男,井田憲一,田口雄章:"改良遺伝的アルゴリズムによるシステム信頼性最適化",信学論 A, Vol.J78-A, No.6, pp.702-709,1995.
- [9] 森 一之,築山 誠,福田豊生:"免疫アルゴ リズムによる多峰性関数最適化",電子学会論 文誌, C117, No.5, pp.593-597, 1997.
- [10] 中村秀明,宮本文穂,松本 剛:"改良免疫アルゴリズムによる構造設計支援に関する研究",

ファジィ学会誌, Vol.11, No.6, pp1105-1117, 1999.

[11] 玄 , 井田:BASIC による線形計画 , 共立出版 , 1988.

# 連絡先:

田口 雄章

足利工業大学経営情報工学科

〒 326-8558 栃木県足利市大前町 268-1

Phone: 0284-62-0605 Fax: 0284-64-1071

E-mail: taguchi@ashitech.ac.jp

# ラフニューラルネットワークによる医療診断支援システム

The medical diagnostic support system using extended rough neural network

新井理誉 田崎栄一郎

Masataka Arai Eiichiro Tazaki 桐蔭横浜大学 桐蔭横浜大学

Toin university of Yokohama Toin university of Yokohama

**Abstract:** A medical diagnostic support system is built using the neural network that is excellent in data pattern discernment. And it becomes possible to take into consideration the error included in data by defining a rough neuron using rough aggregate theory.

# 1.はじめに

最近、コンピュータを利用したデータ分析の応用例として、医療データ分析が数多く行われている。一般に医療データなどは複雑で計算式を用いての診断は難しい。そこでデータパターン識別に適し適しているニューラルネットワーク(NN)回を用いて、このような問題の解決を目指す。さらに同研究室ではラフ集合と、ニューラルネットワークを組み合わせた、ラフニューラルネットワーク(RNN)回を用いての医療診断支援システムの構築を行っている。本研究は、この医療診断支援システムに入力されるデータを改良し、プログラムの修正を行い、さらに精度の向上を図ることを目的とする。

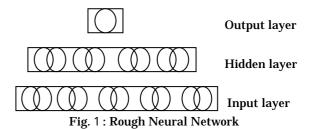
### 2. ラフ集合

ラフ集合[2]の基礎概念は、「類別」と「近似」である。「類別」は対象物を属性に従って類別する。「近似」は可能性を示した「上近似」と確実性を示した「下近似」からなる。データ分析で使用する場合、上近似を上限値、下近似を下限値として、誤差を考慮した値ととらえるため不確実なデータも取り扱うことが可能な方法論である。ラフ集合は値を含む上限値と下限値をとり誤差範囲と与えるため、誤差のある場合

や変数などを有効に扱うことができる。今回の 研究では、上限値と下限値をラフ集合での上限 値と下限値とする。

# 3.ラフニューラルネットワーク

ラフニューラルネットワークとは、ラフ集合理論を用いて、入力にラフニューロンを持つことで、誤差を考慮した値をとらえることできるものである。これにより、不確実なデータを取り扱うことが可能となる。ラフニューラルネットワークでのラフニューロンはニューロンのペアのように考えることができる。そこで、ラフニューロンとしてラフ集合を取り入れて、二つの通常ニューロンを一つのラフニューロンと定義し、ラフニューロンの入力として片方の入力に誤差を含んだ入力の上限値を、他方に入力の下限値をとる。



一般的に医療データには誤差を含むものが多

く、その上限値と下限値を入力することにより、 通常のニューラルネットワークに対して、ラフ ニューラルネットワークの方がより高い診断 精度が得られる。

ラフニューロンの出力値は次のような式で 計算される。

# Output(upper)

=max{f(input(upper)),f(input(lower))} output(lower)

=min{f(input(upper)),f(input(lower))}

通常のニューロンの出力値は次のような式 で計算される。

#### Output = f(input)

ここでの f はシグモイド関数を指す。

$$f(u) = \frac{1}{1 + e^u}$$

上式において、内部ポテンシャル  ${\bf u}$  は重み付入力総和 ${\bf w}$   $\times$  を指す。

#### 4.実験方法

通常のニューラルネットワークとラフニューラルネットワークの精度比較、デシジョンテーブル(決定表)を用いて入力因子数を変更した場合の精度比較を行う。

実験データには北里大学より提供された前立 腺癌と腎癌の医療データを用いて、癌の再発診 断システムを構築する。

学習方法にはニューラルネットワークで一般的に使われる誤差逆伝播(BP)を使用し、出力関数にはシグモイド関数を使用する。

# 5.実験結果

前立腺癌のデータを使用するシステムにおいて実験をした結果、ラフニューラルネットワークは通常のニューラルネットワークと比較した場合、Fig.2 から出力誤差は少ないことがわかる。同様に腎癌のデータを使用するシステムも構築したが、使用したラフニューロンが1つのため通常のニューラルネットワークと比較して出力誤差の差は小さかった。

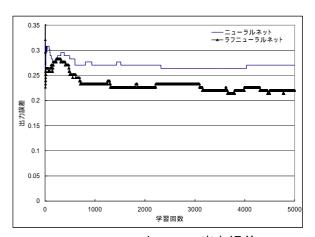


Fig.2 RNN と NN の出力誤差

# 6.まとめ

実験の結果より、ラフニューラルネットワークは通常のニューラルネットワークと比較して、その出力誤差が小さいことがわかり、ラフニューロンによる精度の向上を確認することができた。今後の課題としては、学習方法に遺伝的手法である GA や GP、出力関数にウェーブレットや RBF といった関数の使用を検討し、さらなる精度の向上を目指す。

#### 参考文献

- [1] 高野 猛:遺伝的アルゴリズムによるニューラルネットワークの学習と推論,桐蔭 横浜大学工学部大学院制御システム工学 科,平成7年工学修士論文
- [2] 中村 昭,津本 周作,田中 博,小林 聡:ラフ集合とその応用,人工知能学会誌 vol.11, No.2, 1996
- [3] Pawan Lingers: Rough Neural Network, Department of Computer Science, Algoma University College Sault Ste. Marie, Ontario, Canada, P6A 2G4

#### 連絡先:

田崎 栄一郎

桐蔭横浜大学工学部電子情報工学科

〒225-8502 神奈川県横浜市青葉区鉄町1614

Phone + Fax: 045-974-5070

E-mail: tazaki@intlab.toin.ac.jp

# 棋譜の盤面の複雑さの分類と計測

Classification of the complexity on the board in Shogi game and its measurement

江崎 朋人

橋山 智訓

塚本弥八郎

Tomohito Esaki 名古屋市立大学 Tomonori Hashiyama

Yahachiro Tsukamoto 名城大学

電気通信大学

Meijo University

Nagoya City University University of Electro-Communications

Abstract It made a great impact that the computer program defeated the champion of the chess players. Chess was one of the main benchmarks to measure the performance of computer intelligence. Once the champion was defeated, Shogi replaced it as one of the main benchmarks. In Shogi, the searching space is much larger than that of chess. We need to develop the techniques to evaluate the situation of the game roughly which human beings are good at. To handle these situations, we use three uncertainty

is much larger than that of chess. We need to develop the techniques to evaluate the situation of the game roughly, which human beings are good at. To handle these situations, we use three uncertainty based on Dempster-Shafer theory, named degrees of nonspecificity, dissonance and confusion uncertainty, respectively. To show the feasibility of using these uncertainties, we measured them using the records of professional Shogi players.

#### 1. はじめに

将棋はチェスと同様に二人・零和・有限・確定・完全情報ゲームである。チェスにおいては、ゲームに勝つことを探索問題ととらえ、探索法を工夫することで、人間と互角に勝負できるシステムが作られている[1][2]。将棋も同様に探索問題としてとらえられるが、チェスと比較して探索空間が膨大なため、現実的な時間で解を得ることは困難である。現実的な時間で解を求めるには、探索空間をさらに効果的に構成する必要がある。例えば何らかの条件の下、探索範囲を限定したり最適化すべき目的関数を工夫する必要がある。

将棋では、序盤・中盤・終盤と局面を分けることが効果的であると言われている。以前の研究 [3] では、現実的な時間での解探索を実現するために戦況の分類が必要であると考え、証拠理論に基づく指標を用いて、序盤・中盤・終盤に分類することを試みたが、序盤と中盤のは、人間の判断とほぼ半数の一致にとどまった。そこで、本稿では将棋で重要視されている利きのみでどの程度定量化できるのかを調べることとした。そのために、利きに注目したときの盤面の複雑さを不特定度・不一致度・混迷度の3つに分類し、この3つの指標の計測をした。

### 2. 証拠理論

証拠理論は、1976年にShaferによって提案された 理論で、Dempsterの上下界確率を基にしてることか ら Dempster-Shafer Theory と呼ばれている。日本語 では Shafer の著書 [4] の題名からとった「証拠理論」と呼ばれている。この理論は基本確率割当と呼ばれる集合関数を基に構成されている。具体的には、有限集合を X としたとき、式 (1) で表される集合関数によって基本確率割当 (Basic Probability Assignment:BPA)  $m(\cdot)$  が与えられる。BPA は全体集合 X のべき集合に対して割り当てられる。m(A) は、ある要素  $x \in X$  が集合 A に属するという主張に対する信頼の度合いを示す。m(A)>0 を満たす  $A\subset X$  を焦点要素とよび、焦点要素の集合を  $\mathcal F$  で表す。焦点要素  $\mathcal F$  と m の組  $(\mathcal F,m)$  を証拠と呼ぶ。

$$m: 2^X \to [0, 1], \quad m(\emptyset) = 0$$
 
$$\sum_{A \subset X} m(A) = 1 \tag{1}$$

証拠理論により BPA が与えられたとき、その状態に対して 3 つの不確実さの指標が定義できることが [5][6] により議論されている。3 つの不確実さの指標は、不特定度 (N)、不一致度 (E)、混迷度 (C) と呼ばれる。これらは、式 (2) ~ (5) で定義される。

$$N = \sum_{A_i \subset \mathcal{F}} m(A_i) \log_2 |A_i| \tag{2}$$

$$E = -\sum_{A_i \subset \mathcal{F}} m(A_i) \log_2 Pl(A_i)$$
 (3)

$$C = -\sum_{A_i \subseteq \mathcal{F}} m(A_i) \log_2 \left(\frac{m(A_i)}{Pl(A_i)}\right) \tag{4}$$

$$Pl(A_i) = \sum_{B \cap A_i \neq \emptyset} m(B)$$
 (5)

それぞれの指標は一般的に、次のように意味づけられる。

#### 不特定度 N

不特定度は、ある要素 x が集合 X の部分集合  $A_i$  のどれに属するか特定ができない度合いを表す。

#### 不一致度 E

不一致度は、 $x \in X$  が異なる部分集合  $A_i \subset X$  に属するという意見のばらつき具合を示す。 つまり意見の不一致を示し、矛盾の度合いを表す。

#### 混迷度 C

混迷度は、証拠から要素 x の所属すべき集合  $A_i \subset X$  を選択するとき、どの集合  $A_i$  に属する度合いも確からしく、どの意見を信用してよいのか分からないという混乱の度合いを表す。

すべての指標は、値が大きくなればなるほど不確かになる。逆に指標の値が減少しすべての不確かさがなくなるとき、証拠から要素  $x \in X$  が一意に決定づけられることとなる。

#### 3. 不確実さの指標の将棋への適用

## 3..1. 将棋における不確実さ

前項の指標は集合の定め方により、意味が変わってくる。本研究では、将棋盤のマス目を集合の要素とする。 すなわち全体集合 X を

$$X = \{ 将棋盤のマス全体 \}$$
  
=  $\{1-,1-,\cdots,1-,2-,\cdots,9-,1-\}$ 

とし、X の部分集合に対して BPA を割り当てる。 このように定めたとき将棋における不確実さと、前 項の指標は以下のように対応づけられる。

### 不特定度:

どこに注目するかを判断することに伴う不確実 さ。

#### • 不一致度:

どの駒に注目するかを判断することに伴う不確 実さ。

#### ● 混迷度:

複数の駒がある部分に集中した時に生じる不確 実さ。



図 1: 将棋の初期状態

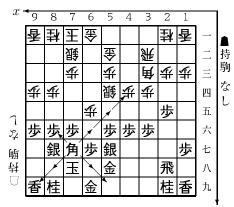


図 2: 将棋の1局面

#### 3..2. 变数定義

まず、将棋を簡単に説明する。将棋は 9 × 9 のマス目を持つ盤と歩香桂銀金角飛王の 8 種類 40 枚の駒を使う 2 人のプレーヤによる対戦ゲームである。初期状態 (図 1) から駒を交互に 1 つだけ動かしてゲームを進め、相手の王を取ると勝ちである。将棋を行うことを「将棋を指す」といい、駒を一回動かすことを「一手指す」という。最初に指す方を「後手」と呼ぶ。先手を ■、 後手を ○ で 表現する。図 1 において先手は下側、後手を上側で、「■持 駒 なし」は先手の持駒がないことで表している。持駒とは相手から取った駒のことで、盤上に打つことで使うことができる。プレーヤは必ず駒を動かさなければならず、駒の動かし方は駒の種類によって決まっている。また禁じ手と呼ばれる指してはいけない手がある。

指標を計算するにあたり以下の定義を導入する。本研究では、盤の右から x 列目、上から y 行目のマスを xy と表現する。例えば図 1 において、先手の飛車のあるマスは 28 である。全体集合を  $X=\{xy|1\leq x,y\leq 9,x,y\in {\bf N}\}$  とし、マス xy に利いている駒全体の集



図 3: 将棋の1局面

合を  $S_{xy}$  とする。マス xy に利いている駒とは、マス xy に駒がないときは、マス xy へ移動可能な駒のことを表し、またはマス xy に駒があるときは、その駒が無い場合にマス xy へ移動可能な駒のことを表す。そして駒 k の利きを、集合  $A_k = \{xy|a \in S_{xy}\}$ で定義する。例えば図 2 において 77 のマスにある先手の角の利きは  $\{44,55,66,68,59,88,86,99\}$  である。集合  $A_k$  は X の部分集合である。

#### 3..3. BPA の決定法

駒 k の利き  $A_k$  に注目して BPA を定めた。盤面上の駒の利きだけでは持ち駒を考慮に入れられないため、今回は 1 手先の駒の利きの集合に対して BPA を割り当てた。具体的には、全ての可能な指し手に対して利きの集合 B を求め、その出現回数を  $\mu(B)$  とし、

$$m(B) = \mu(B) / \sum_{k} \mu(A_k) \tag{6}$$

と定めた。例えば、図 3 において先手が指せる手は多い。仮に $\blacksquare$  8八銀 と指したとすると、動かした銀 の利きは、 $A_{8848}=\{77,79,87,97,99\}$  である。また、 $\blacksquare$  8八銀打 と指したとすると、打った銀 の利きも  $A_{8848}$  である。従って  $\mu(A_{8848})=2$  となる。

#### 4. 結果

プロ同士の対局を記録した棋譜データベースである将棋年鑑 2001, 2002 から戦形が偏らないように 20 の棋譜を選んで各指標を計測した。その一例を示す。図 5, 6, 7 は第 13 期竜王戦本戦、先手:谷川九段、後手:羽生五冠の結果である。羽生五冠が勝った棋譜の結果で、横軸に手数、縦軸にそれぞれ N, E, C の値をとったものである。またこの棋譜において 29 手目までは定跡であった。先 N は先手側から測定した

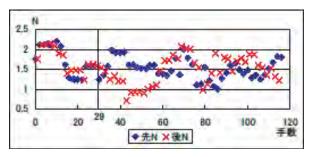


図 4: 不特定度 N のグラフ

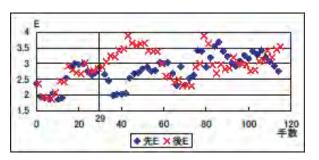


図 5: 不一致度 E のグラフ

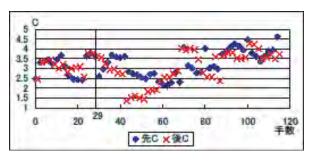


図 6: 混迷度 C のグラフ

N であり、後 N は後手側から測定した N である。 E,C も同様である。3 つのグラフから、次の共通点があげられる。

- (i) 歩以外の駒を取ったとき及び取られたとき、また は歩以外の駒を打ったとき値が大きく変動する 傾向が見られる。特に大駒による影響が大きい。
- (ii) 定跡の終わりの方で先手と後手における N, E, C の値の差がかなり小さくなる。

他の 19 の棋譜においても同様の結果が得られた。また、図 4,5,6 のように先手のグラフと後手のグラフが何度も交差する棋譜では攻めと守りが何度も入れ替わる傾向が見られた。これはある程度接戦していることを示していると考えられる。しかし、どちらが攻めているかをグラフから見ることはできなかった。

表 1: 指標の相関

	先 N	先 <i>E</i>	先 C	
先 N	1			
先 <i>E</i>	-0.88	1		
先 C	0.52	-0.21	1	
	後 N	後 E	後 C	
後 N	1			
後 E	-0.85	1		
後 C	後C 0.44		1	
	先 N	先 <i>E</i>	先 C	
後 N	後 N 0.31		0.08	
後 E	-0.33	0.50	0.14	
後 C	0.07	0.15	0.54	

表 2: N と E の最小値・最大値・レンジ

	最小値	最大値	レンジ
先 N	0.59	2.49	1.90
先 <i>E</i>	1.62	4.27	2.65
後 N	0.61	2.42	1.81
後 E	1.70	4.06	2.36

また、先手・後手のどちらにおいて、 N が増加すると E は減少し、 N が減少すると E が増加する傾向が見られた。そこで、3 つの指標の相関を調べてみた。 20 棋譜における N, E, C の相関係数を表 1 に示す。先手・後手ともに N と E に強い逆相関の関係が見られる。これから N か E のどちらかを扱えばよいことが分かる。また、図 4,5 のグラフから N より E の方が値の変動が大きい。実際に 20 棋譜における最大値、最小値及びレンジを表 2 に示す。表 2 から N に比べて E のレンジが大きいことが分かる。従って N を扱うよりも E をあつかった方がより多くの情報が得られると考えられる。他には強い相関関係は見られなかった。

#### 5. まとめ

将棋において重要とされている利きのみを用いて どの程度定量化ができるかを調べるために、プロ棋 士の棋譜を用いて証拠理論に基づく指標の計測をし た。大駒の影響、定跡の効果、ある程度接戦している ことをグラフからみることができた。また不特定度 か不一致度のどちらか一つを扱えばよいことが分か り、不特定度を扱うよりも不一致度を扱う方がより 多くの情報が得られることが分かった。しかし、優劣 やどちらが攻めているか等については分からなかっ た。これらは今後の課題である。

#### 参考文献

- [1] 松原仁, 竹内郁雄編, ゲームプログラミング「bit 別冊」, 共立出版, 1997.
- [2] 松原仁, 滝沢武信, コンピュータ将棋はどのよう にしてアマ 4 段まで強くなったのか, 人工知能 学会誌 Vol.16, No.3, pp.378-383, 2001
- [3] 江崎朋人,橋山智訓,証拠理論を用いた将棋の 進行状況の分類,第8回ゲームプログラミング ワークショップ,pp.39-43,2003
- [4] Shafer, G., A Mathematical Theory of Evidence, Princeton Univ. Press, Princeton, N.J., 1976
- [5] Klir,G.J. and Folger,T.A., Fuzzy Sets, Uncertainty and Information, Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, 1988. (本多中二 訳、ファジィ情報学、日刊工業新聞社, 1993).
- [6] Yahachiro Tsukamoto, Three Type Entropy in the Evidential Theory with their Applications, The Fourth Asian Fuzzy System Symposium, pp645-650, 2000.

#### 問い合わせ先

**∓** 467-8501

名古屋市瑞穂区瑞穂町字山の畑 1 名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科 江崎 朋人

E-mail: t.esaki@nsc.nagoya-cu.ac.jp

# 投票力分析における"一票の重み"

# Proposal of the "dignity of one vote" by voting power analysis

三輪 尚志,田崎栄一郎 Hisashi Miwa,Eichiro Tazaki 桐蔭横浜大学 Toin University of Yokohama

**Abstract:** The word "dignity of one vote" has raised various problems socially, and the problem has also occurred now involving the validity. The background that this problem occurred is in 2 stage vote systems based on parliamentary democracy. The purpose of this research is investigating "the dignity of one vote" in 2 stage vote systems. Therefore, it checks by introducing the concept of the "vote power" known for the field of vote theory or game theory, and verifying evaluation of "dignity of one vote."

#### 1. はじめに

"一票の重み<sup>[1]</sup>"という言葉は、以前から社会的に様々な問題を提起している。この問題の発端の背景は議会制民主主義に基づく、二段階投票方式にある。本研究の目的は、この二段階投票方式のおける有権者の一票の重みや議案の可否決を左右することのできる確立(投票力<sup>[2]</sup>)を調査し、検討することである。そして、その両者の一票の重みの関係について考察するのが本研究の目的である。

# 2. 二段階投票方式

二段階投票方式は、各選挙区における議員の 選出を目的とする「単記投票方式」、議会における議案の採決を目的とする「重み付投票法式」から構成されている。「単記投票方式」は、選挙において有権者が、各選挙区の最も選好する候補者を当選させるために投票をするというものである。「重み付投票方式」は、議会において、ある議案が提出されたとき、それぞれの政党に所属する議員が全員そろって、賛成・反対・破棄のいずれかを投票するというものである。

上記のような投票方式における一票の重みには、主に二つの意味がある。一つは、「単記投票方式」において、"各選挙区の議員定数をその有権者数で割った値"を"一票の重み"とするものである。もう一つは、「重み付投票方式」において、"議案の可否を左右することのできる程度を各政党の重み(議席数)で割った値"を"一票の重み(一議席の重み)"とするものである。

# 3. 投票力

投票力は、議会などで投票による決定を行う際、各投票主体が決定にどれだけの影響力を持つかを評価する尺度のひとつである。影響力は、持っている票数に対応すると一般的に思われがちだが、実際はそれほど簡単ではない。

投票力は、票数からだけでは見えない影響力

を測るために提案されたものである。現在まで に、いくつかの投票力指数が提案されている。

本研究では、Shapley-Shubik 指数を用いて、 投票力を算出する。

# 4. Shapley-Shubik 指数

Shapley-Shubik 指数において、重み付投票力は、その投票者が「軸員(pivot)」にどの程度なりえるかによって評価される<sup>[3]</sup>。例えば、ある議案に対して、賛成投票をするという投票者の部分集合があるとする。その投票者が賛成に投票して初めてその議案を可決させることができるときに、その投票者は「軸員」と呼ばれ、その部分集合に対して投票力を持つということになる。数学的に定式化すると次のようになる。

投票者の集合を N ={1,2..,n},とする。単純多数決によって、とある議案の可否決がなされるとすると、|S| > n/2となる提携 S が形成されれば、 S は多数派となって選択対象の選択権をもつことになる。このような意味で、提携 S を勝利提携という。もし、投票者 i が $\omega_i$  票をもっていて、過半数を得ることによって決定することができるとすれば、

$$\sum_{i \in S} \omega_i > \frac{1}{2} \sum_{i \in N} \omega_i$$

となるS が勝利提携となる。一般に投票者の集合N、各投票者のもつウェイト $\omega=(\omega_1,\omega_2...\omega_n)$ ,決定ルールが与えられることによって、投票ゲームが定められることになる。そのとき勝利提携の全体をWとする。勝利提携の集合W が与えられたとき、特性関数を次のように定める。

$$v(S) = \begin{cases} 1 & \text{if} & S \in W \\ 0 & \text{if} & S \notin W \end{cases}$$

以上ような特性関数を持つゲーム  $(N, \nu)$  を一般に単純ゲーム (simple game) という。 投票によって選択権を争う問題は単純ゲームとして表現されることになる。 単純ゲームの特性関数は提

携の持つ投票力を示しているとみることができ るから、各投票者のもつ投票力を求めることが できる。各投票者の投票力を示すものとして、 単純ゲームの Shapley-Shubik 指数を求める。 (N,v) を単純ゲームとすると、このとき

$$\phi_{i}(v) = \sum_{\substack{S \in W \\ S-(i) \notin W}} \gamma_{n}(S) = \sum_{\substack{T \in B \\ T-(i) \notin B}} \gamma_{n}(t)$$

以上の Shapley-Shubik 指数が投票者の投票力 を示すと考えられるのは次のような理由による。 とある投票者が一列に並んで、投票をするとす る。その順序はさまざまであって、総数は n! で ある。ここで 1 つの勝利提携 S(i) を固定し、 S は投票者i の参加によって勝利提携になるこ とができるとする。この意味でiが軸員となる。 上の投票順序において $S-\{i\}$ のつくり方が全部 で (s-1)! 通り、 S 以外の投票者の並び方が (n-s)!通りあるから、iが軸員となる頻度は、 (s-1)!(n-s)!通りである。したがって

$$\gamma_n(S) = \frac{(s-1)!(n-s)!}{n!}$$

は、i が S の軸員となる相対度数である。すべ てのS についてこの値を加えたものが、投票者iの Shapley-Shubik 指数であり、それは*i* が軸員 となる確立を表しており、iの投票力となる。

# 5. 実験

選挙のシステムにおいて有権者が、どの候補 者に投票をしたかというデータを調査するのは 困難である。よって、2003年に世論調査で作成 された既存の標本[4]をもとに、有権者達の動向 を調査し、どの候補者に投票をしたかを予測す しかし、母集団と標本の比率では、選挙 データとして不都合なため、標本を母集団とほ ぼ同じ大きさに拡大する。その拡大された標本 を参考にし、ある選挙区では、どの政党がどれ ほどの支持を得ているかなどを調査する。そし て、2003年に行われた、衆議院議員選挙の東京 選挙区の選挙データと比較し、作成したデータ にどれほど信憑性があるのかを検討する。そし て、それらのデータをもとに仮想選挙を行う。 最後に、仮想選挙のデータに Shap I ey-Shubik 指 数を用い、議員の一票の重みと投票者の一票の 重みの関係を調査する。

仮想選挙を行うシステムとして、投票者、候 補者にパラメータを与える。投票者は自分の持 つパラメータと候補者の持つパラメータを比較 し、最も評価できる候補者に投票を行う。

投票者の一票の重みは、その政党の議員の一 票の重みを、その政党に投票した投票者の数で 割ったものとする。

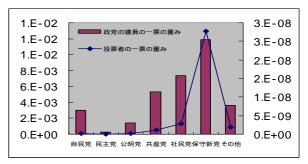


図1 2003年衆議院選挙における一票の重み

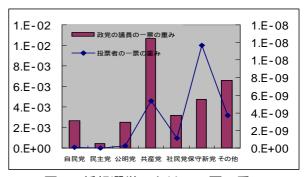


図2 仮想選挙における一票の重み

以上のように、仮想選挙において各政党の一票 の重み、投票者の一票の重みの値がやや短縮し たため、この実験は妥当であったと思われる。

# **6.** おわりに

今回使用したのは、東京都のデータのみであ ったので、投票力に大きな変動が見られなかっ た。このため、調査地域をさらに拡大すること は大きな課題である。そして、ニューラルネッ トワークを利用しエージェントを使った投票モ デルを構築することが今後課題である。

# 参考文献

- [1] 田崎栄一郎、富山慶典:投票力分析による "一票の重み",数理科学,No263,pp74-82, 1985
- [2] 中山幹夫、武藤滋夫、舟木由喜彦:ゲーム理 で解く,有斐閣ブックス,2000,
- [3] 鈴木光男:ゲーム理論入門,共立出版株式会
- [4] 日本経済新聞:日経電話世論調査,(URL) http://www.nikkei-r.co.jp/nikkeipoll/ ,2004/03/15/

#### 連絡先:

田崎 栄一郎

神奈川県横浜市青葉区 1614 番地 桐蔭横浜大学 工学部 電子情報工学科

Phone:045-974-5070

Fax: 045-978-1311

E-mail: tazaki@toind24.intlab.toin.ac.jp

# アルキメデス的 t-ノルムに基づく論理系の諸性質

Characteristics of Logical Systems Based on Archimedean t-Norms

河口 万由香<sup>†</sup> 亘理修<sup>†</sup> 宮腰 政明<sup>†</sup> 中戸川孝治<sup>††</sup>
Mayuka F. KAWAGUCHI<sup>†</sup> Osamu WATARI<sup>†</sup> Masaaki MIYAKOSHI<sup>†</sup> Koji NAKATOGAWA<sup>††</sup>

<sup>†</sup>北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻 <sup>†</sup>Division of Systems and Information Engineering Graduate School of Engineering, Hokkaido University ††北海道大学大学院文学研究科思想文化学専攻 ††Division of Philosophy and Cultural Science Graduate School of Letters, Hokkaido University

**Abstract**: This report treats the relation between substructural logics and fuzzy logics, especially focuses on the aspect of fuzzy logics as concrete models of some of substructural logics. It has been already clarified that fuzzy logics based on left continuous t-norms form the models of intuitionistic substructural logic  $\mathbf{FL}_{ew}$ . The authors show some additional conditions to the class of left continuous t-norms so that they could constitute the logical systems as models of classical system  $\mathbf{CFL}_{ew}$ . Moreover, we pick up uninorm aggregation operators which are less restricted functions than t-norms; and construct fuzzy logical systems based on uninorms, which form models of substructural logics  $\mathbf{FL}_e$  and  $\mathbf{CFL}_e$ .

#### **1. はじめに**

部分構造論理は Relevant Logic、Lukasiewicz の多値論理、BCK 論理や線形論理など、いくつ かの非古典論理の体系を包含する一般概念であ る [6], [7]。一方、1965 年にファジィ集合が提案 されたのに伴って登場したファジィ論理は70年 代後半に t-ノルムという数学的成果を取り入れ、 飛躍的に発展してきた。近年、Ono[8]によって、 左連続な t-ノルムを用いたファジィ論理が部分 構造論理 FLew のモデルとなることが示された。 本稿では、この t-ノルムを用いたファジィ論理に ついて、直観主義的な体系 FLew の部分クラスで ある古典的部分構造論理 CFLew のモデルを構築 する。 さらに Yager et al. [9] によって提案された ユニノルムを用いてファジィ論理体系を構築す ることにより、FLewおよび CFLew より弱い論理 体系である FL。および CFL。と呼ばれる部分構造 論理のモデルが得られることを示す。

# 2. 部分構造論理

古典論理および直観主義論理のシークエント計算による形式体系はそれぞれLKおよびLJと呼ばれる。シークエント計算は始式、構造に関する推論規則、論理演算子に関する推論規則からなり、このうち構造に関する推論規則はweakening、contraction、exchange(以上はそれぞれ左右2種)cutの7種類である。部分構造論理とは、LKやLJにおいて構造に関する推論規則のうちいくつか、あるいは全てを制限することによって得られる論理体系の総称である。例えばRelevant Logic はweakeningを欠いており、Lukasiewiczの多値論理とBCK論理はcontractionを欠き、線形論理はexchangeのみを備えている。本稿では論理記号として以下の物を用いる。

**命題変数**:  $p_0, p_1, ...$  **論理定数**: **t**, **f** 

**二項演算子**: ∧ (連言、かつ)

∨(選言、または) ⊃(含意、ならば)

**単項演算子**: ¬(否定)

また論理式を表すメタ変数として *A,B,C,...*を用いる。

直観主義論理の形式体系 LJ から cut 以外の構造に関する推論規則 6 種類を全て除去して得られる形式体系は full Lambek Calculus FL と呼ばれ、これが部分構造論理の基礎となる。FL の代数構造は次節で述べる full Lambek 代数 (FL 代数)である。

FL | weakening, contraction, exchange

$$\frac{\Gamma, \Gamma' \to \Delta}{\Gamma, A, \Gamma' \to \Delta} \text{ (w left)} \qquad \frac{\Gamma \to \Delta, \Delta'}{\Gamma \to \Delta, A, \Delta'} \text{ (w right)}$$

$$\frac{\Gamma, A, A, \Gamma' \to \Delta}{\Gamma, A, \Gamma' \to \Delta} \text{ (c left)}$$

$$\frac{\Gamma, A, B, \Gamma' \to \Delta}{\Gamma, B, A, \Gamma' \to \Delta} \text{ (e left)}$$

を部分的に付加するこで直観主義部分構造論理 の諸体系 FL<sub>e</sub>, FL<sub>ec</sub>, FL<sub>ew</sub>, FL<sub>ecw</sub> (=LJ), FL<sub>c</sub>, FL<sub>w</sub>, FL<sub>cw</sub> が得られる。

また、LK から構造に関する推論規則を除いた体系(古典的部分構造論理)として  $CFL_{ex}$ ,  $CFL_{ex}$ ,  $CFL_{ex}$ ,  $CFL_{ex}$  (=LK)が得られる。古典論理から導入される部分構造論理では exchange を除去することはできない。

# 3. full Lambek 代数と residuated lattices

FL の代数的解釈である full Lambek 代数(以下、FL代数と呼ぶ)は以下のように定義される。

**[定義 1]** 代数  $\langle V, \cup, \cap, \circ, \rightarrow, \rightarrow', 1, 0, \top, \bot \rangle$  は以下の条件を満足するとき full Lambek 代数である。

- (FL1) ⟨V,∪,∩,⊤,⊥⟩は束 (最大元⊤、最少元⊥)
- (FL2)  $\langle V, \circ, \mathbf{1} \rangle$  はモノイド (単位元 1)
- (FL3)  $\forall x, y, z, w \in V$ :  $z \circ (x \cup y) \circ w = (z \circ x \circ w) \cup (z \circ y \circ w)$
- (FL4)  $\forall x, y, z \in V$ :  $x \circ y \le z \iff x \le y \to z$
- (FL5)  $\forall x, y, z \in V$ :  $x \circ y \le z \iff y \le x \rightarrow' z$
- (FL6)  $\mathbf{0} \in V$

ここで、連言演算子が $\cap$ と。の 2 種類、含意演算子が $\rightarrow$ と $\rightarrow$ 'の 2 種類に分離していること、および単位元 1 と 0(任意の固定元)が束Vの最大元  $\top$  と最少元 $\bot$  に必ずしも一致しないことに、注意を要する。また否定演算子は含意演算子から定義されるのでこれも 2 種類現れる( $\neg A = A \supset f$ ,  $\neg A = A \supset f$ )。

付値関数はブール関数と同様に定義される。ただし、 $\upsilon(\mathbf{t})=\mathbf{1}$  ,  $\upsilon(\mathbf{f})=\mathbf{0}$  ,  $\upsilon(\top)=\top$  ,  $\upsilon(\bot)=\bot$  である。

FL における構造に関する推論規則と FL 代数の性質は以下のように対応する。

exchange

(Fle) ∘ は可換である。

weakening

(FLw1)  $\mathbf{0} = \perp$ 

(FLw2)  $x \circ y \le x$ ,  $y \circ x \le x$ 

contraction

(FLc)  $x \le x \circ x$ 

また古典的部分構造論理に関しては以下の条件を付加する。

(CFL) 
$$(x \rightarrow \mathbf{0}) \rightarrow' \mathbf{0} = x = (x \rightarrow' \mathbf{0}) \rightarrow \mathbf{0}$$

前節で述べたように、古典的部分構造論理は常に exchange を備えているので、含意演算子→と → は一致し、条件(CFL)から二重否定律を満足することが導かれる。

FL 代数の定義のうち(FL1)~(FL5)を満足する 代数系は residuated lattice と呼ばれる。従って、 FL 代数は任意の固定元 0 を備えた residuated lattice とみなすことができ、residuation 理論に関 する多くの知見を利用することができる[8]。

# 4. 部分構造論理と t-ノルム

FL 代数が residuation 理論と密接な関係を有することから明らかなように、論理体系の代数構造を論じる際の最も基本的な枠組みは、真理値集合V上の二項演算である連言演算\*と含意演算 $\rightarrow$ の間に次の residuation が成立することである。

$$\forall a, b, c \in V : a * b \le c \Leftrightarrow b \le a \rightarrow c$$

真理値集合V が完備束であり、かつ $a*_{\bot=\bot}$  を満足するとき residuation は次式に示す無限分配性と同値である。

$$a * \bigcup_{\lambda \le \Lambda} b_{\lambda} = \bigcup_{\lambda \le \Lambda} a * b_{\lambda}$$

ファジィ論理で通常用いられる真理値集合は V = [0,1]であり、このとき上の無限分配性は第二 変数に関する左連続性に他ならない。従って、ファジィ論理を体系化するに際して第二変数に関して左連続な連言演算を採用することは、含意演算との整合性をとるために不可欠である。

ファジィ論理の連言演算として第一に考慮されるべき関数族は t- ノルム[5]である。

**[定義2]** 二変数関数 $T:[0,1]^2 \rightarrow [0,1]$  は以下の条件を満たすとき t- ノルムと呼ばれる。

- (T1) T(a, 1) = a
- (T2)  $a \le b \Rightarrow T(a,c) \le T(b,c)$
- (T3) T(a,T(b,c)) = T(T(a,b),c)
- (T4) T(a,b) = T(b,a)

Goguen[3]は完備束順序モノイドに基づくL-ファジィ論理を提案しているが、これは真理値集合が完備束である場合への左連続な t-ノルムの拡張概念に他ならない。なお、完備束順序モノイドは、単位元 1 および 0 (この場合は零元になる)がそれぞれ束の最大元と最小元に一致する residuated lattice に相当する。すなわち、左連続な t-ノルムは full Lambek 代数における乗法的連言。のモデルとみなす事ができる。さらに条件 (FLe)可換性、(FLw1)、(FLw2)を満足するので exchange と weakening に関する推論規則が成り立つことになる。従って、Ono [8]が指摘したように、左連続な t-ノルムに基づくファジィ論理は直観主義的部分構造論理  $FL_{ew}$ のモデルとなる。

以下、本節では、左連続なt-ノルムに基づくファジィ論理がより条件の厳しい古典的部分構造論理 CFLew のモデルとなる条件を考察する。

連続な t- ノルム T が ∀x ∈ (0,1) に対して

T(x,x) < x を満たすとき、T はアルキメデス的であるという。このとき T(x,y) は、狭義単調減少で f(1) = 0 となるような関数  $f:[0,1] \to [0,\infty]$  が存在して、

$$T(x,y) = f^{-1}(\min(f(0), f(x) + f(y)))$$

となる(このとき f を加法的生成関数と呼ぶ)。 このようなT に対する residual operator (T と対になって residuation を満足する演算子)  $R_T(x,y) = \sup\{z | T(x,z) \le y\}$  は、

$$R_T(x, y) = f^{-1}(\min(0, f(y) - f(x)))$$

で表される。否定演算子は $R_T$ を用いて

$$\neg x = R_T(x,0) = f^{-1}(f(0) - f(x))$$

となる。

また、アルキメデス的 t-ノルムT が $\forall x \in (0,1)$  に対して狭義単調増加であるとき厳密 (strict) であるといい、それ以外の場合べき零 (nilpotent) であるという。 厳密な場合の生成関数 f は  $f(0) = \infty$  であり、べき零な場合には  $f(0) < \infty$  (この場合、一般性を失わずに f(0) = 1 とすることができる) である。

**[定理1]** べき零なアルキメデス的 t-ノルムT に基づくファジィ論理 $\langle [0,1], \sup,\inf,T,R_T,\neg,1,0\rangle$  は  $\mathbf{CFL}_{\mathrm{ew}}$  上の部分構造論理を成す(すなわち  $\mathbf{CFL}_{\mathrm{ew}}$  のモデルとなる)。

(証明) f(0) = 1 であるから以下の式が成り立つ。

$$\neg \neg x = R_T(R_T(x,0),0)$$

$$= f^{-1} \Big( f(0) - f \Big( f^{-1} \Big( f(0) - f(x) \Big) \Big) \Big)$$

$$= f^{-1} \Big( 1 - f \Big( f^{-1} \Big( 1 - f(x) \Big) \Big) \Big)$$

$$= f^{-1} \Big( 1 - \Big( 1 - f(x) \Big) \Big)$$

$$= f^{-1} \Big( f(x) \Big)$$

$$= x$$

すなわち、条件(CFL) を満足するので古典的部分構造論理  $\mathbf{CFL}_{\mathrm{ew}}$  のモデルとなっている。 (証明終)

上の定理ではべき零の場合を取り上げたが、 厳密な場合には  $f(0) = \infty$  から  $\neg x = f^{-1}(\infty) = 0$  $(x \neq 0)$  となり、条件(CFL) を満足し得ない。

# 5. 部分構造論理とユニノルム

本節では Yager et al. [9]によって提案されたユニノルムを考察する。

**[定義3]** 二変数関数 $U:[0,1]^2 \rightarrow [0,1]$  は以下の条件を満たすときユニノルムと呼ばれる。

- (U1)  $\exists e \in [0,1] : U(a,e) = a$
- (U2)  $a \le b \Rightarrow U(a,c) \le U(b,c)$
- (U3) U(a,U(b,c)) = U(U(a,b),c)
- (U4) U(a,b) = U(b,a)

ユニノルムの最大特徴は単位元eが最大元1に必ずしも一致しないことである。さらに定義域 $[0,1]^2$ の部分集合 $[0,e]^2$ において、ユニノルムは t-ノルムを線形縮小変換した状態になっており、同様に $[e,1]^2$ では t-コノルムを線形縮小変換したものになっている[2]。すなわちe=1のときユニノルムは t-ノルムとなり、e=0のときユニノルムは t-フルムとなる。

ユニノルムU がU(0,1)=U(1,0)=0 を満足するとき連言的 (conjunctive) であるといい、U(0,1)=U(1,0)=1 を満足するとき選言的 (disjunctive) であるという[2]。

ユニノルムU が連言的であるとき、U に対する residual operator  $R_U(x,y) = \sup\{z | U(x,z) \le y\}$  は、含意演算になる[1]。

**[補助定理]** ユニノルムU が左連続で連言的であるときU と $R_U$  は residuation を満足する。 (略証) U(1,0)=0 とU の単調性より  $\forall a \in [0,1]$  に対してU(a,0)=0 が成り立つ。このこととU の左連続性から証明可能である。

t-ノルムは完備束順序モノイドなる代数構造を有していた。ユニノルムはモノイド(単位元を有する半群)であるが、束順序モノイドではない。ユニノルムUの単位元eと束の最大元である1とが一致するとは限らないからである。しかし、左連続で連言的なユニノルムは residuated lattice の範疇に入るので、FL 代数における。のモデルとみなす事ができる。

**[定理2]** 左連続で連言的なユニノルムU に基づくファジィ論理 $\langle [0,1], \sup, \inf, U, R_U, \neg, e, \mathbf{0} \rangle$  は  $\mathbf{FL}_e$ 上の部分構造論理を成す(すなわち  $\mathbf{FL}_e$ のモデルとなる)。

(証明) ユニノルムは条件(FLe)可換性を満足するので exchange に関する推論規則が成立つ。 しかしユニノルムU は領域 $[e,1]^2$  においては t-コ

ノルムの性質を踏襲しているので条件(FLw2)および条件(FLc)を満足するとは限らない。従って、左連続で連言的なユニノルムU に基づくファジィ論理は  $\mathbf{FL}_e$ のモデルとなっている。 (証明終)

ユニノルムの場合も前節と同様に古典的部分 構造論理を成す条件を考察する。

連続なユニノルムUが、狭義単調増加関数  $h:[0,1] \to \mathbb{R}: h(0) = -\infty, h(1) = \infty, h(e) = 0$ を用いて

$$U(x, y) = h^{-1}(h(x) + h(y))$$

として表されるとき、U は representable であるという。このとき、含意演算は

$$R_U(x, y) = h^{-1}(h(y) - h(x))$$

によって表される。

**[定理3]** representable で連言的なユニノルムU に基づくファジィ論理 $\langle [0,1], \sup, \inf, U, R_U, \neg, e, \mathbf{0} \rangle$ は  $\mathbf{CFL_e}$ 上の部分構造論理を成す(すなわち  $\mathbf{CFL_e}$ のモデルとなる)。

(証明)任意の固定元  $\mathbf{0}(\neq 0)$  に対して  $h(\mathbf{0}) > \infty$  であるから以下の式が成り立つ。

$$\neg \neg x = R_U(R_U(x, \mathbf{0}), \mathbf{0})$$

$$= h^{-1} \left( h(\mathbf{0}) - h \left( h^{-1} \left( h(\mathbf{0}) - h(x) \right) \right) \right)$$

$$= h^{-1} \left( h(\mathbf{0}) - \left( h(\mathbf{0}) - h(x) \right) \right)$$

$$= h^{-1} \left( h(x) \right)$$

$$= x$$

すなわち、条件(CFL) を満足するので古典的部分構造論理  $\mathbf{CFL}_e$ のモデルとなっている。 (証明終)

FL 代数における「任意の固定元 0」は必ずしも束の最小元である必要はない。もし、単位区間 [0,1] における最小元 0 を用いるとすると $\neg x = h^{-1}(\neg \infty) = 0$   $(x \neq 0)$  となり、条件(CFL) を満足し得ない。

以上のように連言的ユニノルムに基づく論理体系は部分構造論理 FL。、CFL。のモデルとなる。ただし、ユニノルムを単純に連言演算子として用いるのは論理的な意味からは適切とは言い難い。ユニノルムは部分的に選言演算子である t-コノルムとしての性質も有しており、本来は統合演算子として導入されたからである。

# 6. むすび

本稿では部分構造論理の代数的解釈であるfull Lambek 代数および residuated lattices について概観し、ファジィ論理によって部分構造論理の代数的モデルを構築した。特に、直観的部分構造論理と古典的部分構造論理の相違点としての否定演算子の導入方法に焦点をあてた。連続な t-ノルムおよびユニノルムのうち加法的生成関数によって表現される関数族は、部分構造論理の観点からも、有益であることが示された。

residuated lattices に関しては 1930 年代に盛んに研究されたが、近年、部分構造論理[8]のみならずファジィ論理の分野からも注目されており[4]、今後の数理論理研究において重要な役割を果たすものと期待される。

# 参考文献

- [1] B. De Baets & J.C. Fodor: Residual operators of uninorms, *Soft Computing*, **3** (1999) pp.89-100.
- [2] J.C. Fodor, R.R. Yager & A. Rybalov: Structure of uninorms, *Int. J. of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, **5** (1997) pp.411-427.
- [3] J.A. Goguen: The logic of inexact concept, *Synthese*, **19** (1979) pp.325-373.
- [4] P. Hájek: *Metamathematics of Fuzzy Logic*, Trends in Logic **4**, Kluwer Academic Publishers, (1998).
- [5] M. Mizumoto: Pictorial representations of fuzzy connectives, part I: Cases of t-norms, t-conorms and averaging operators, *Fuzzy Sets and Systems*, **31** (1989) 217-242.
- [6] H. Ono: Semantics for substructural logics, Substructural Logics (K. Došen & P. Shroeder-Heister eds.), Oxford Univ. Press, (1993) pp.259-291.
- [7] H. Ono: Proof-theoretic methods in non-classical logic an introduction, *Theories of Types and Proofs*, MSJ Memoirs **2**, Mathematical Society of Japan (1998) pp.207-254.
- [8] H. Ono: Residuation theory and substructural logics, *Proc. of 34th MLG meeting*, Echigo-Yuzawa, Japan (2001) pp.15-18.
- [9] R.R. Yager & A. Rybalov: Uninorm aggregation operators, *Fuzzy Sets and Systems*, **80** (1996) pp.111-120.

#### 連絡先:

河口 万由香 北海道大学大学院工学研究科 システム情報工学専攻

〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目

Phone: 011-706-6805 Fax: 011-706-7830

E-mail: mayuka@main.eng.hokudai.ac.jp

# ラフ集合の種々の定義の比較

# Comparison of various definitions of rough set

江本 全志 山口 佑也 向殿 政男

Masashi Emoto Yuya Yamaguchi Masao Mukaidono

# 明治大学

Meiji University

Abstract: Rough set is a technique that expresses any set by lower approximation and upper approximation, by using subsets of objects divided into by equivalent relation. Recently, rough sets using relations weaker than equivalent relation have been researched. It is known that the relation weaker than equivalent relation divides a universal set into subsets that have common parts. And rough set using relation weaker than equivalent relation has different properties from rough set using equivalent relation. Also, some person including us have suggested different definitions of rough sets. In this paper, we clarify the different among properties of those rough sets.

# 1 はじめに

ラフ集合は同値関係などで分類された部分集合である集合を下近似と上近似で表現する技術であり、1980年代に Pawlak によって提案された。最近、同値関係を弱めた関係を用いたラフ集合の研究がされている。関係を弱めた場合、部分集合間において共通部分ができる場合があり、この時の性質は同値関係を用いたラフ集合とは異なる性質を持つ。また、私達を含めた幾人かが、異なるラフ集合の定義をしている。本論文では、ラフ集合の下近似と上近似の定義を条件付の積演算と和演算で表現し、これらの演算の性質を明らかにする。また、異なった定義のラフ集合の性質の違いを明らかにする。

# 2 ラフ集合

ここでは、ラフ集合を定義する上で必要なものを定 義し、ラフ集合における下近似、上近似を定義する。

#### 定義 1 情報システム

情報システムとは、対象の集合 U と属性の集合 A で構成されるデータベースのようなものである。それぞれの対象は各々の属性についてなんらかの値や、情報がある。簡単な例として表 1 の 2 値情報システムが挙げられる。

ラフ集合の近似において、情報システムの対象を 分割する必要がある。分割をするために、次の同値 関係が一般的によく使われている。

表 1: 2 値情報システム

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
x1	0	0	0	0	0	1	1
x2	0	0	0	0	0	0	1
x3	0	1	1	0	0	1	0
x4	0	0	1	1	1	0	0
x5	1	1	0	0	0	0	0

### 定義 2 同値関係

同値関係とは、対象の集合 U の要素の間に、次に 定義する関係 R が成り立つことをいう。

1. 反射律 aRa=1

aRb = bRa

3. 推移律 aRb, bRc ならば、aRc

# 定義 3 同値類

ある対象と同値である対象の集合を同値類と呼ぶ。 そして  $x\in U$  が帰属する同値類を R(x) とすると、 次のように定義される。

$$R(x) = \{ y \in U \mid xRy \} \tag{1}$$

ラフ集合論は、上記で定義した情報システムとある属性から求まる同値類を用い、ある集合を同値類を用いて下近似と上近似で表現する手法である。基本概念として、最初は、人間の識別能力に限界があり、異なった対象を区別できないことがあることから始まった。任意の対象集合  $X \subseteq U$  が与えられたと

き、R による X の上近似、下近似の集合は、次のように定義できる。

#### 定義 4 ラフ集合の下近似と上近似

 $X\subseteq U$ の下近似  $\underline{apr}(X)$ 、上近似  $\overline{apr}(X)$  を次のように定義する。

$$apr(X) = \{x \in U \mid R(x) \subseteq X\}$$
 (2)

$$\overline{apr}(X) = \{x \in U \mid R(x) \cap X \neq \emptyset\}$$
 (3)

図 1 は、ラフ集合の下近似と上近似の例である。格子状に区切られているのが同値類である。下近似 apr(X) は集合 X に完全に含まれる同値類で構成され、また上近似  $\overline{apr}(X)$  は集合 X に少しでも関わっている同値類で構成される。

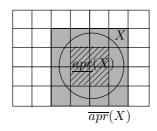


図 1: 下近似と上近似

# 3 ラフ集合の種々の定義

ここでは、ラフ集合の異なった定義を議論する前に、2値論理と多値論理との関係、ラフ集合で使われる部分集合間に共通部分が無い場合と有る場合の関係について議論する。

多値論理において、いくつかの異なった演算が定 義されている。例えば、

論理積  $A \wedge_1 B = min(A, B)$ 

論理和  $A \vee_1 B = max(A, B)$ 

代数積  $A \wedge_2 B = A \times B$ 

代数和  $A \vee_2 B = A + B - A \times B$ 

限界積  $A \wedge_3 B = max(A+B-1,0)$ 

限界和  $A \vee_3 B = min(A+B,1)$ 

などである。

これら多値論理の演算は、 $A,B \in [0,1]$  の場合は違う演算であるが、A,B の値を 0,1 に限った場合は全く同じ計算をする [1]。ラフ集合においても、同様なことが起こる。[3,10] で、いくつかの異なるラフ集合の定義がされている。これらのラフ集合の定義

は、部分集合間に共通部分が有る場合、それぞれの 下近似、上近似の値は異なる。しかし、部分集合間 に共通部分が無い場合(すなわち同値類)は、異な るラフ集合の下近似、上近似は、全く同じ値となる。 以上から、多値論理における2値に限定する場合と しない場合とラフ集合の部分集合に共通部分がある 場合とない場合の関係がとても似ている。

次に異なる3つのラフ集合の定義を紹介する。

#### 定義 5 要素志向近似

$$\underline{apr_1}(X) = \{x \in U \mid R(x) \subseteq X\}, \tag{4}$$

$$\overline{apr_1}(X) = \{x \in U \mid R(x) \cap X \neq \emptyset\}.$$
 (5)

## 定義 6 集合志向近似

$$\underline{apr_2}(X) = \bigcup \{ R(x) \mid R(x) \subseteq X \}, \tag{6}$$

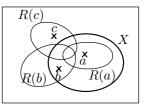
$$\overline{apr_2}(X) = \bigcup \{ R(x) \mid R(x) \cap X \neq \emptyset \}. \quad (7)$$

#### 定義 7 私達が定義した近似

$$apr_3(X) = \{x \in U \mid R(x) \subseteq X\},$$
 (8)

$$\overline{apr_3}(X) = \bigcup \{R(x) \mid x \in X\}. \tag{9}$$

これら 3 つのラフ集合の定義は、R を同値関係とした場合、3 つともそれぞれ下近似、上近似が同じになる。R に同値関係より弱い関係を用いると、同値類にあたる集合間に共通部分ができることがある。次に、同値類にあたる集合間に共通部分が存在する場合に、3 つの定義の異なる近似は、どのような値を取るかを示す。



义 2:

図 2 は、対象 a,b,c とそれらが持つ集合と入力集合 X を示している。これらの要素や集合に着目すると、各近似は次のようになる。

 $apr_1(X) \supseteq \{a\}$ 

 $\overline{apr_1}(X) \supseteq \{X, c\}$ 

 $apr_2(X) \supseteq \{R(a)\}$ 

 $\overline{apr_2}(X) \supseteq \{X, R(b), R(c)\}$ 

 $apr_3(X) \supseteq \{a\}$ 

 $\overline{apr_3}(X) \supseteq \{X, R(b)\}$ 

これらのラフ集合の近似の間には、次のような関 係がある。

#### 定理 1 3つのラフ集合の関係

- $apr_2(X) \supseteq apr_1(X) = apr_3(X)$
- $\overline{apr_2}(X) \supseteq \overline{apr_1}(X)$
- $\overline{apr_2}(X) \supset \overline{apr_3}(X)$

次に、ラフ集合の下近似を2つの集合の積集合、 上近似を和集合とみなし、ラフ集合の定義の式を次 のように変換する。

以下において、 $U = \{x_1, x_2, \cdots, x_n\}, S =$  $\{R(x_1),R(x_2),\cdots,R(x_n)\}$  とする。また、 $\cap,\cup$  は一 般的に使われる集合演算とし、否定 ' は A' = U - Aとする。

#### 定義 8

 $R^{-1}$  を次のように定義する。A を集合とする。

$$R^{-1}(A) = \{ a \mid R(a) = A \} \tag{10}$$

ただし、 $R^{-1}(\phi) = \phi$ とする。

### 定義 9

$$\underline{apr_1}(X) = S \sqcap_1 X \tag{11}$$

$$= \bigcup_{i=1}^{n} (R(x_i) \cap_1 X) \qquad (12)$$

$$\overline{apr_1}(X) = S \sqcup_1 X \qquad (13)$$

$$\overline{apr_1}(X) = S \sqcup_1 X \tag{13}$$

$$= \bigcup_{i=1}^{n} (R(x_i) \cup_1 X) \tag{14}$$

 $\cap_1, \cup_1$  を次のように定義する

$$A \cap_1 B = \begin{cases} R^{-1}(A) \cap B & (A \subseteq B) \\ \phi & (Otherwise) \end{cases}$$
(15)

$$A \cup_1 B = \begin{cases} R^{-1}(A) \cup B & (A \not\subseteq B') \\ B & (Otherwise) \end{cases} (16)$$

### 定義 10

$$apr_2(X) = S \sqcap_2 X \tag{17}$$

$$= \bigcup_{i=1}^{n} (R(x_i) \cap_2 X) \tag{18}$$

$$= \bigcup_{i=1}^{n} (R(x_i) \cap_2 X)$$
 (18)  
$$\overline{apr_2}(X) = S \sqcup_2 X$$
 (19)

$$= \bigcup_{i=1}^{n} (R(x_i) \cup_2 X) \tag{20}$$

 $\cap_2, \cup_2$  を次のように定義する。

$$A \cap_2 B = \begin{cases} A \cap B & (A \subseteq B) \\ \phi & (Otherwise) \end{cases}$$
 (21)

$$A \cap_2 B = \begin{cases} A \cap B & (A \subseteq B) \\ \phi & (Otherwise) \end{cases}$$

$$A \cup_2 B = \begin{cases} A \cup B & (A \not\subseteq B') \\ B & (Otherwise) \end{cases}$$

$$(21)$$

#### 定義 11

$$apr_3(X) = S \sqcap_3 X \tag{23}$$

$$= \bigcup_{i=1}^{n} (R(x_i) \cap_3 X) \tag{24}$$

$$= \bigcup_{i=1}^{n} (R(x_i) \cap_3 X)$$
 (24)  
$$\overline{apr_3}(X) = S \sqcup_3 X$$
 (25)

$$= \bigcup_{i=1}^{n} (R(x_i) \cup_3 X) \tag{26}$$

 $\cap_3, \cup_3$  を次のように定義する。

$$A \cap_3 B = \begin{cases} R^{-1}(A) \cap B & (A \subseteq B) \\ \phi & (Otherwise) \end{cases} (27)$$

$$A \cup_3 B = \begin{cases} A \cup B & (R^{-1}(A) \not\subseteq B') \\ B & (Otherwise) \end{cases} (28)$$

$$A \cup_3 B = \begin{cases} A \cup B & (R^{-1}(A) \not\subseteq B') \\ B & (Otherwise) \end{cases}$$
 (28)

これらの演算を条件が付いた集合演算とみなす事 ができる。

# 性質

ここでは、各ラフ集合の定義の  $\cap_1, \cup_1, \cap_2, \cup_2$ 、  $\cap_3, \cup_3$  の性質について考える。まず、一般的に良く 用いられる公理を示す。

#### 公理一覧

# 1. べき等律:

$$A \cap A = A, \quad A \cup A = A$$

2. 交換律:

$$A \cap B = B \cap A$$
,  $A \cup B = B \cup A$ 

3. 結合律:

$$A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C,$$
  
$$A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$$

4. 吸収律:

$$A \cap (B \cup A) = A$$
,  $(A \cap B) \cup A = A$ 

5. 分配律:

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C),$$
  
$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$$

6. 二重否定:

$$A^{\prime\prime}=A$$

7.ドモルガン律:

$$(A \cap B)' = A' \cup B', \quad (A \cup B)' = A' \cap B'$$

8. 最大元:

$$A \cap U = A$$
,  $A \cup U = U$ 

9. 最小元:

$$\phi \cap A = \phi, \quad \phi \cup A = A$$

10. 相補律:

$$A \cap A' = \phi, \quad A \cup A' = U$$

次に、これらの演算がどの公理を満たすのかを示す。

#### 定理 2

 $(\cap_1, \cup_1, ')$ 、 $(\cap_2, \cup_2, ')$ 、 $(\cap_3, \cup_3, ')$  は、表 2 の性質を持つ。

表 2: 性質

公理	$(\cap_1,\cup_1,')$	$(\cap_2,\cup_2,')$	$(\cap_3,\cup_3,')$
1	× O	00	× O
2	××	××	××
3	××	××	××
4	× O	00	××
5	××	××	××
6	$\circ$	$\circ$	$\circ$
7	××	××	××
8	$\times$ $\bigcirc$	0	$\times$ $\bigcirc$
9	00	00	00
10	$\bigcirc$ ×	$\bigcirc$ ×	$\bigcirc$ ×

 $(\cap_1, \cup_1, ')$  と  $(\cap_3, \cup_3, ')$  は、演算の中で  $R^{-1}$  が関わってくるために、 $S = \{R(x_1), R(x_2), \cdots, R(x_n)\}$  に無い集合が出てくる場合、計算不能で公理を満たさないとしている。

# 5 終わりに

本論文では、これまで定義されている異なるラフ 集合の下近似と上近似の定義を条件付の積演算と和 演算で表現し、これらの演算の性質を明らかにした。 今後、さらにラフ集合の異なる定義に関して様々な 性質を明らかにしていきたい。

# 参考文献

- [1] M. Mukaidono, Fuzzy Logic, The Nikkan Kogyo Shimbun, (1993).
- [2] M. Mizumoto: Fuzzy Set, The Nikkan Kogyo Shimbun, (1992), pp.242-253.
- [3] R. Intan, M. Mukaidono, "Generalized Fuzzy Rough Sets By Conditional Probability Relations", International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Vol.16(7), World Scientific, (2002), pp. 865-881.

- [4] D. Dubois and H. Prade, "Rough Fuzzy Sets and Fuzzy Rough Sets", Intern. J. of General Systems, Vol.17(2-3), (1990), pp.191-209.
- [5] R. Intan, M. Mukaidono, "Conditional Probability Relations in Fuzzy Relational Database", Proceedings of RSCTC'00, LNAI 2005, Springer-Verlag, (2000), pp.251-260.
- [6] R. Intan, M. Mukaidono and Y.Y. Yao, "Generalization of Rough Sets with α-coverings of the Universe Induced by Conditional Probability Relations", Proceedings of RSTGC-2001, (2001), pp.173-176.
- [7] J. Komorowski, Z. Pawlak, L. Polkowski and A. Skowron, "Rough Sets: A Tutorial", (1999).
- [8] Z. Pawlak, "Rough Sets", International Journal Computation Information Science 11, (1982), pp.341-356.
- [9] R. Slowinski and D. Vanderpooten, "A Generalized Definition of Rough Approximations Based on Similarity", IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol.12, No.2, (2000), pp.331-336.
- [10] Y. Yamaguchi, R. Intan, M. Emoto, M. Mukaidono, "Generalization of Rough Sets Using Active and Passive Relations", *Proceeding of Intech* 2003, pp.539-544.

# 連絡先

# 江本 全志

#### 明治大学 経営学部

〒 214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1 6404

Phone: 044-934-7442 Fax: 044-934-7912

E-mail: masashi@isc.meiji.ac.jp

# ファジィモルフォロジカルフィルタによるノイズ画像からのクラック抽出 Crack extraction from noisy image using fuzzy morphological filter

# 菊池 拓男 Takuo Kikuchi

# 職業能力開発総合大学校東京校 Tokyo Institute, Polytechnic University

Abstract: Fuzzy morphology has been proposed as a new method of image processing, especially the analysis of features from an ambiguous image. We proposed a new structuring element for fuzzy morphology, called a fuzzy adaptive structuring element (FASE). The FASE determines shapes and values of structuring elements dynamically from an input image. The FASE shows good performance resulting from crack extraction from noisy image compared with the other filters. We have got experimental results by applying FASE to crack defect testing.

#### 1.はじめに

現在、画像処理技術の応用分野は、幅点に分野に広がっている。しかし、少量生産の工業製品の検査や検査員の感覚量が基準となる分野では、一定の制約が存在し、画像処理システムの開発・導入が進んでいないところが多い。それにも関わらずコストダウンが求められる中、検査の自動化は避けられないものであり、検査作業に対するシステム化(自動化)の需要は大きい

本稿では、焼結金属など雑音の多い表面画像からの雑音除去にファジィ適応型構造要素(FASE を用いたファジィモルフォロジカルフィルタ[1]を用い、雑音中の特徴が効果的に抽出できることを示す。同時に、これを焼結金属表面に生じるクラックの検出へ応用し、画像処理システムへの有効性を示す。

# 2. FASE を用いたファジィモルフォロジによるノイズ除去

ファジィモルフォロジでは、2つの集合A、Bがあるとき、集合Aを処理対象の画像とすれば、演算に用いる集合Bを構造要素(structuring element)と呼ぶ。一般的にファジィモルフォロジ演算では、応用する目的に応じて構造要素のサイズ、形状とその値を予め決定し、どの画素に対しても同一の構造要素を適用するが、雑音と特徴とが重なり合っている場合などは、構造要素の決定の仕方により大きく出力結果が異なってしまう問題点があった。本論文で用いるファジィ適応型構造要素(FASE: Fuzzy Adaptive Structuring Element)は、特徴に対応して構造要素のサイズ、形状とその値が変化するため、曖昧な画像中の雑音等を除去しつつ特徴を保存できる効果がある。

#### 2.1 FASE **の構築**

FASE の構築は5つのステップからなる。

# [STEP1]

FASE の形を構成するため、対象とする特徴を分析するなどして、予め方向性 (角度) d を持ったファジィ適応型構造要素成分 sed を準備する。

## **(STEP2)**

注目画素の座標  $(\mathbf{m},\mathbf{n})$ を中心とした局所領域における各画素  $(\mathbf{I},\mathbf{j})$ のメンバーシップ値 $\mathbf{m}(i,j)$  の標準偏差 $\mathbf{s}_{2k+1}$  を、予め設定したサイズ2k+1  $(\mathbf{k=1,2,3,...,n})$ まで $\mathbf{s}_{2k+1}$  を計算する。

#### (STEP3)

STEP2 で求めた各標準偏差 $s_{2k+1}$  の最大値 $s_{\max}$  を次式で求める。

$$\boldsymbol{s}_{\text{max}} = \max(\boldsymbol{s}_{3}, \boldsymbol{s}_{5}, \dots, \boldsymbol{s}_{2k+1})$$

このとき、最大値を取る特徴検出領域が $DR_{2h+1}$  であるとき、 $(2(h-1)+1)\times(2(h-1)+1)$  の領域内にエッジが存在している可能性が高いとして、そのサイズをファジィ適応型構造要素成分 se のサイズとする。

#### STEP4

FASE の形は次式により構築される。

$$FASE = \bigcup_{i \in D} se_i$$

ここで、D は特徴検出領域における方向性 (角度) i の集合である。

#### [STEP5]

FASE のメンバーシップ値は、特徴対領域 $DR_{2k+1}$  のメンバーシップ値の変化の度合いから式(1)で求められる。

$$\mathbf{m}_{\mathbf{x}_{e_{i}}}(m,n) = \mathbf{a} \sum_{o} \mathbf{m}(i,j) + \mathbf{m}_{\mathbf{x}_{e_{i}}}(m,n)$$
  $(l=1,2,3,\dots h-1)$  (1)

ただし、 $\mathbf{m}(i,j)$  は対象とする画像の注目画素  $(\mathbf{m},\mathbf{n})$ を中心とし、各  $se_i$  を対象画像に重ね合わせたときに対応する領域Q 内のメンバーシップ値である。 は FASE を特徴づける重み系数で  $a\geq 0$  である。

#### 2.2 FASE を用いたファジィモルフォロジ

対象とするファジィ画像をA、ファジィ適応型構造要素をB とする。x,y をユークリッド空間上の座標を表すベクトル $\mathbf{m}_A$ ,  $\mathbf{m}_B$  をそれぞれのファジィ集合のメンバーシップ関数とする。 このとき、FASE を用いた fuzzy dilation D と fuzzy erosion E は次式で定義される。

#### Fuzzy dilation:

$$D(A,B)(\mathbf{m})(x) = \underset{y \in S}{\operatorname{supmax}} \left[0, \mathbf{m}_{B}(y-x) + \mathbf{m}_{A}(y) - 1\right]$$

#### fuzzy erosion:

$$E(A,B)(\mathbf{m})(x) = \inf_{a} \min[1,1+\mathbf{m}_{A}(y)-\mathbf{m}_{B}(y-x)]$$

また、fuzzy openingO、fuzzy closingC は fuzzy dilation, fuzzy erosion を用いて次式で定義される。

Fuzzy opening: O(A,B) = D(E(A,B),-B)

Fuzzy closing: C(A,B) = E(D(A,B),-B)

## 2.3 シミュレーション

FASE を用いたファジィモルフォロジを用いて図1(a)のサンプル画像に対して、ノイズ除去を行った。図1(a)は、焼給金

属表面を模してノイズと、濃度が異なる円形の特徴及びそれを繋く直線状の特徴が存在するサンプル画像である。図1(b)はノイズ除去法として代表的な以縮2川による結果、図1(c)は固定構造要素を用いた fuzzy opening、図1(d)は FASE を用いたfuzzy opening による出力結果である。他の手法はノイズを除去できないとともに特徴を有効に抽出できないが、本手法は効果的に特徴を抽出できることが分かる。

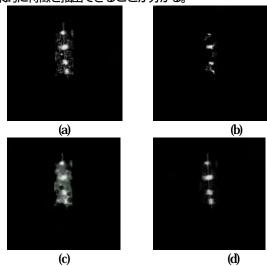


図1 ノイズ画像からの特徴曲出: (a)原画像 (b)収縮 (c)fuzzy opening (d)FASEによる fuzzy opening (本手法)

#### 3. 焼結金属表面のクラック抽出への応用

FASE を用いたファジィモルフォロジによるノイズ除去の画像処理システムへの応用として、焼結金属表面のクラック検出実験をおこなった。

# 3.1 焼結金属表面のクラックの特徴

対象とする/挑結金属表面のクラックは、図2に示すように焼結金属表面が粗であるため、照明光が乱反射し、不良品の学に基準となるクラックが雑音に埋もれてしまう傾向にある。従って雑音とクラックとの学別が難しく、現在画像処理による良否検査は現在行われていない。

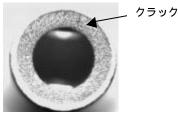


図2 焼結金属表面のクラック例

#### 3.2 実験システム

本実験で用いた検査システムを図3に、検査の流れを図4に示す。

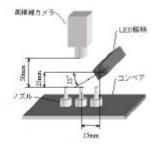


図3 実験システム



図4 検査の流れ

入力画像中のノイズ除去にFASEを用いたfuzzy openingを用いる。次に、2値化及び再2値化によりクラックが存在する候補関域を特定し、その領域に対して線分追跡法を施すことでクラック候補を抽出する。求められたクラック候補がクラックか否かを判断するため、線分より得られる特徴量から、それがクラックとして適当であるかどうかを判断する。

目視検査による検査基準は曖昧で、良否判定の基準となる明確な物理量は示されていない。検査員の言語表別は、聞き取り調査の結果、線分の「角度が大きくない」、「長さが長い」、「曲がりがほとんどない」、「連続性がある」である。本研究ではこの言語表別に基づいて、「角度」「全長」「曲がり」「連続性」の4つの特徴量を抽出し、ファジィ集合で表した基準ラベルを作成した。実際の良否判定には、作成した基準ラベルと入力画像の特徴を比較し数値化し、4つの項目に対して検査員が重視する項目順に重みを付け、閾値により判定する方法3]を用いた。

#### 3.3 実験結果

サンプル数 103 個(内、不良品(クラック有)69 個、良品(クラック無し)34 個)に対して、良否判定を行った。実験の 結果、不良品学に率は98.6%、良品学に率94.12%、総合認識率は97.1%となった。

#### 4.おわりに

焼き金属表面の特徴の抽出を抽出することを目的に、FASEを用いたファジィモルフォロジによるノイズ除去を行った。これによりこれまで困難であった雑音が含まれる領域内のクラックでも安定した検出が可能となり、画像検査装置への応用の可能性を示した。本研究で用いた手法は、焼き金属のような乱反射を生じる面における特徴抽出に有効であると考えられる。今後、他のアプリケーションへの応用を検討していきたい。

## 参考文献

[1] T. Kikuchi, S. Murakami, "Application of Fuzzy Mathematical Morphology with Adaptive Structuring Elements to Seal Defect Testing", Journal of Advanced Computational Intelligence, Vol.6, No.1, pp.62-69, 2002 [2]長尾真、"ディジタル画像処理"、近代科学社、1978 [3]日本ファジィ学会、"ファジィ画像処理"、日刊工業新聞社、1993

#### 連絡先:

#### 菊地拓男

職業能力開発総合大学校東京校 生産電子システム技術科

〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 Phone: 042-346-7477 Fax: 042-347-0340 E-mail: kkikuchi@tokyo-pc.ac.jp

# 視覚特徴と興味度マップによる 注視点遷移モデルの提案

A proposal of transition model of visual attention with visual features and interest maps

伊藤 誠\* 矢野 良和\*\* 大熊 繁\*

Makoto Ito Yoshikazu Yano Shigeru Okuma

## \*名古屋大学大学院工学研究科

## \*\*名古屋大学大学院経済学研究科

Graduate School of Engineering , Nagoya University C

Graduate School of Economics , Nagoya University

**Abstract:** Robot vision system used to process whole input image, which does not distinguish objects and backgrounds. So, it needs a large amount of data processing. On the other hand, a human has a visual attention system to reduce the amount of image processing and realizes high-speed processing with flexibility to vary environment.. This paper shows the method to realize human visual attention system for the robot vision.

Proposed system calculates visual feature maps: intensity, color, orientation, movement and blinking map. This system receives feedback data from recognition step. These data reflect on interest map. Using an interest map, a point of visual attention is changing in whole target.

keyword:visual attention,interest map, visual feature, feature map

# 1 研究背景

近年、多くのペットロボットやヒューマノイドロボットが開発されている。将来のロボットは家庭など日常生活のなかで使われることが期待されている。このため、人間の生活環境に適したロボットビジョンの確立が求められている。

既存のロボットは全画面を走査して画像処理を行っている。用いられている画像処理は全画素の情報を等価に扱い、背景といった不必要な情報と必要な情報に区別することをしていない。そのため、画像データ、特に動画は膨大なデータ量になるため、高速な処理ができない、もしくは十分な解像度で処理を行うことができないという問題点をかかえている。そこで、画像処理法の切口として従来の走査による処理ではなく注視による処理を行う事が考えられている。そのため、注目すべき対象を見つけて注視する選択的注視システムが求められる。

ロボットの使用環境である人間の生活環境は、注目すべき場所に視覚特徴が強くなるようになっている。例えば、注意や禁止を促す道路の標識には赤色や黄色が使われている。つまり、視覚特徴に基づいた選択的注視が行われやすい環境が整っている。そこで、ロボットビジョンにおいて視覚特徴に基づいた選択的注視システムが有効となっている。

従来の研究において視覚特性に基づいたさまざまな注視点選択システムが提案されている [1],[2]。しかし、これら従来システムでは画像から得られた視覚特徴のみによって一意に注視点を選択する。ロボットの視覚システムとしては動画固有の特徴量が考えられるが、動画固有の特徴量に対する検討は行われていない。

そこで、本稿では Itti らの提案するシステムをベースに興味度マップを導入し、認識により表現できる目的・興味を考慮にいれて様々な点に注視点遷移をするシステムを提案する。また、動画に特有な視覚特徴としてオプティカルフローによる移動量、フレーム間差分による明度・色・形の変化量の特徴量を追加したシステムを提案する。

# 2 提案システム

# 2.1 提案する注視システム

Itti 等は人間の視覚特性に基づいた人間の注視点選択モデルを提案した [1]。人間の視覚は明暗に反応する視神経細胞と色に反応する視神経細胞、エッジの方向に選択的に反応する細胞を持っている。そこで入力画像から静止画に対し明度・色・エッジの方向の3つの視覚特徴の大きさを表す特徴量マップを生成し、特徴量マップを線形和することで注視点を選択するモデルを生成した。

本稿ではさらに目的・環境に応じた意図を持って様々な点を注視するために興味度マップを導入した。動画に特有な特徴量マップを追加し、動画に対応した注視点選択システムを提案する(図1)。提案するシステムは次のようにして注視点を決定する。入力画像から各特徴量マップを生成する。特徴量マップに提案する興味度マップを重ね合わせる。興味度マップを重ね合わせた各特徴量マップを単純和することで注視点を選択する。そして、選択注視された対象を認識し、目的・興味に対して有用な対象かどうかを評価する。その評価結果を用いて興味度マップを更新する。更新した興味度マップを用いて次の注視点を選択する。

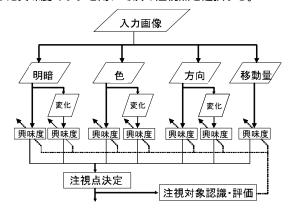


図 1: 提案する選択的注視モデル

# 2.2 興味度マップの導入

#### 2.2.1 認識と注視点選択

人間の視覚は注視点の選択と注視点周辺の認識から構成されると考えられる。以後前者を知覚側、後者を認識側と呼ぶ。網膜や一次視覚野等が知覚側に相当し、頭頂連合野等が認識側に相当する。

人間は知覚側において目から得られた視覚情報だけではなく、 認識側で認識された結果を用いて次の注視点を決定していると言 われている[3]。すなわち、人間は、

- 1. 知覚側で目から得られた情報から注視点を選択する。
- 2. 選択された注視点付近の領域を認識側で認識・評価する。
- 3. 認識側の結果を知覚側に送る。
- 4. 知覚側での視覚情報と認識側からの情報をもとに注視点を 選択する

#### 5. 2~4 を繰り返す

というように注視点選択・認識を繰り返し行い認識側から情報を受け取りながら注視点遷移を行っている。認識側で選択注視された対象を「興味対象なので見るべき対象」、「興味対象でないので見るべきでない対象」等と評価し、知覚側の注視点選択にその評価を用いることによって目的・興味に応じた選択的注視を行うことが出来る。

従来の選択的注視システムにはこのような注視点選択・認識を繰り返し、認識側と情報をやりとりしながら注視点を選択するという枠組みが存在しなかった。そのため、視覚特徴の強い点など同じ点を注視点として選択し続ける。

そこで、認識により表現できる、目的・興味に応じた意図を持って注視点を選択するために注視点選択・認識を繰り返し行い、認識側と情報をやりとりしながら注視点を選択するという枠組みが必要となる。

## 2.2.2 興味度マップ

注視点選択・認識を繰り返し、認識側と情報をやりとりしながら注視点を選択するという枠組みをもったシステムを作成するために興味度マップを導入した。興味度マップは値が大きいところほど興味がある対象、目的にかなう対象が存在するように認識・評価の結果を用いて更新する。興味度マップを認識・評価の結果を用いて更新することによって、更新された興味度マップは認識側の「注目して欲しい対象」「注目して欲しくない対象」という意図を反映する。認識側の意図を持った興味度マップを重みとして注視点選択を行うことにより、提案システムは注視点選択・認識を繰り返し行い、認識側と情報をやりとりしながら注視点を選択することができる。したがって、提案システムは認識側の意図を興味度マップが正しく表現することで一意に同じ点を注視することなく、様々な点へ目的・興味に応じた意図をもって注視点遷移を行うことができる。

人間は、選択した注視対象が興味対象であったり目的に対して 有用な対象であれば、興味が上がり、注視する頻度が高くなる。 逆に興味ない対象であったり、無用な対象であったり、十分に参 照した点であれば興味度が下がり、注視する頻度を低くなる。

意図をもって選択的注視するシステムを構築するために、興味の基準として

- 対象が有用な情報であるかどうか (目的適合度)
- 過去の参照頻度 (参照頻度)

の二つを用いる。興味度マップは、各座標での目的適合度マップ と参照頻度マップの差

(興味度マップ) = (目的適合度マップ) – (参照頻度マップ)

で求める。

#### 2.2.3 目的適合度マップ

目的適合度を対象の有用度と定義し、値が正の場合は有用な対象があることを意味し、負の場合は参照する価値がないことを意味する。そして、0付近の値は不明な領域を意味する。

目的適合度マップは以下のように求める(図2)。選択された 注視点付近の領域に対して認識を行い、有用な情報であるかを評 価する。評価した結果に応じた値を目的適合度マップの注視点付 近に代入する。有用な対象であった場合は注視点付近に正の値を 代入する (図2のA)。注視点で行った認識・評価は注視点付近も 同様な評価を得ることが期待できる。そして注視点から離れるに つれて注視点と同じ評価が得られなくなる可能性が高くなる。そ こで図2のAのように注視点に近いほど大きい値になり、注視 点から離れるにつれて値が0に近付くように目的適合度マップに 値を代入する。このような広がりを表現するためにガウス関数を 用いる。また、有用な対象でなかった場合は、注視点を中心とし た負の値を代入する(図2のB)。有用な時と同様、ガウス関数 に負の値を掛けて、注視点に近いほど小さい値になり、注視点か ら離れるにつれて値が0に近付くように値を代入する。値の大き さは、評価値やその特徴量マップが注視点に与えた影響度により 決定する。すなわち、より有用であれば大きな値で更新し、求め た注視点が例えば明度の特徴量が大きく、色やエッジの方向の特 徴量が小さい場合、明度の興味度を大きく更新するようにする。 また、周辺への広がり度合いを示すガウス関数の分散はちょうど 注視対象を内包するガウス関数となる値に設定できるのが望まし いと考える。

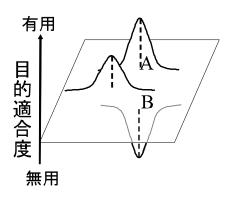


図 2: 目的適合度マップ

#### 2.2.4 参照頻度マップ

強い視覚特徴をもち、有用であると判断された対象であっても、何度も参照された場合は十分な知識が獲得でき、他の未確認な点への興味を起こすため、頻繁に参照した点の興味は薄れる。そこで、参照頻度にあわせて興味度を下げるため、参照頻度マップを導入する。参照頻度マップの値は最近の参照頻度を意味している。

参照頻度マップは以下のようにして求める(図3)。参照頻度は注視点を選択するたびに大きくなる。そこで注視するたびに参照頻度マップの注視点付近に値を加算する。この時広がりを表現するため目的適合度と同じようにガウス関数を用いる。また過去に参照したものほど人間は対象を忘却するので、過去に追加した参照頻度マップの値を徐々に小さくしていく。参照頻度マップの値の減少度は忘却度を意味する。減少度が大きいほど忘却しやすい事を意味する。参照頻度マップの導入により視覚特徴の強さや目的適合度マップの影響で注視をしていた点から、他の点への注視点遷移を可能とする。

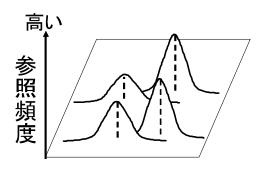


図 3: 参照頻度マップ

# 2.3 動画特徴量マップの追加

実際のロボットの使用環境において周りが静止物体のみであることはほとんどない。動いているものや変化したものは静止しているものより危険性が高い。また、見え方が変わり対象の認識・評価が変化することから重要度が高い場合が多く、注目されやすい。さらに、注目すべき場所には踏切の警告灯が赤く点滅するといったように動きや点滅などの明暗・色の変化を用いるという環境が整っている。このような動画特徴を考慮にして注視点を選択することが必要となる。

そこで、新たに移動量の特徴量マップ、明度・色・方向の変化量の特徴量マップをシステムに追加し、動画特徴を考慮したシステムを提案する。移動量の特徴量マップは物体が移動したときに特徴として抽出し、対象の移動量が大きいほど大きい特徴量の値をもつよう定義した。一方、変化量の特徴量マップでは移動量では抽出できない明るさの変化や青から赤へといったような色の変化を特徴として抽出し、変化の差が激しいほど、更に点滅といったように連続して変化している対象ほど特徴量マップは大きな値をもつよう定義した。

## 2.3.1 移動量の特徴量マップ

人間は移動する物体、なかでも大きく移動する物体に注視しやすい。また、自分の近くで動いているものとほぼ同じ速度で遠くで動いているものがあった場合、危険性が高い等の理由で人間は近くで動いている物の方が注目しやすい。

そこで動画独特の特徴量としてカメラ座標系での移動量を用い、移動量マップを生成する。ここで使う移動量は実空間での対象の移動量ではなくカメラ座標系での移動量である。カメラ座標系での移動量は実空間での移動量とは1対1対応していない。たとえば、実空間において同じ量を移動しても、カメラから遠いほどカメラ座標系の移動量は小さくなる。そしてカメラに近いほどカメラ座標系の移動量は大きくなる。したがって、カメラ座標系での移動量を用いることによって、移動量が大きい対象に注目しやすくなるだけでなく、より近くで動いているものに注目しやすいという奥行きを考慮にいれて移動量の特徴マップを生成することができる。

カメラ座標系での移動量を求める方法としてオプティカルフローが挙げられる。オプティカルフローはフレーム中の各画素間の速度ベクトルを求めたものである。オプティカルフローの検出方法として大きく分けて勾配法とブロックマッチング方の2通りがある。本論文では輝度値の急激な変化等のノイズに強いブロックマッチング法を用いて移動量を求める。ブロックマッチング法は第1フレームと第2フレーム間のパターンマッチングに基づいてオプティカルフローを求める方法である。

オプティカルフローで画像の各座標での移動量を計算する。移動量マップは入力画像の各座標での移動量を用いて生成し、方向成分は用いない。

#### 2.3.2 変化量の特徴量マップ

人間は移動している物の他にも、明るさや色が変化するとそこに注目しやすい。さらに、点滅しているものは、より注目しやすい。ところが、2.3.1 で述べた移動量マップではこのような変化を特徴として抽出できない。変化は移動量を伴わないためである。そこで、移動量とは別に変化の特徴量マップを生成する必要がある。

変化量の特徴量マップはフレーム間差分を用いて次のように求める。対象の変化は第 1 フレームと第 2 フレーム間でフレーム間差分を用いて検出できる。また、点滅といったような連続して変化している対象により大きな特徴量を与えるために、フレーム間差分したものを重み付き積分する (図 2.3.2)。過去の物にいつまでも影響を受け続けないために、過去のもの程重みを小さくする。重み積分して求められた値を変化量の特徴量とし、変化量の特徴量マップに代入して、特徴量マップを生成する。明暗・色・エッジの方向の 3 つの特徴量マップでフレーム間差分と重み付き積分を行い、変化量の特徴マップを生成する。

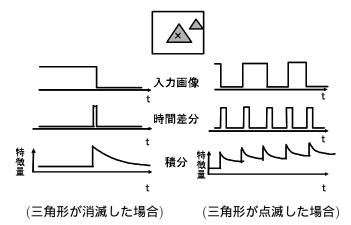


図 4: 変化の特徴量マップの生成

# 3 実験と考察

# 3.1 興味度マップの有効性を示す実験

## 3.1.1 実験方法

最初に、興味度マップの有効性を示す実験を行った。図5を入 力画像とした。認識により表現できる目的・興味を考慮にいれて 様々な点に注視点が遷移することを可能にするために興味度マッ プを導入した。提案手法の検証のため実験を行った。

さらに、2.2.4 で参照頻度の忘却の度合いを変化させることによって選択的注視がどのように変化するかを調べる実験を行った。

今回の実験では、興味対象として丸いものとした。つまり、丸いものを注目しながら、様々な点に注視点遷移を行う事ができるかを検討した。興味対象であるかどうかの評価には円形度を用いた。

#### 3.1.2 結果と考察

選択した点の遷移の様子を図6に示す。図6の出力画像の線が 注視遷移を表した直線である。

興味度マップなしの場合、視覚特徴の最も強い赤い楕円を常に注視点として選択し続け、注視点遷移を行わない。選択した注視点対象を認識した結果を考慮し、次の注視点を決定しないためである。図6が示すように、興味度マップを導入することによって様々な点に注視していることが分かる。すなわち、提案した興味度マップが参照頻度を考慮して更新することにより、注視点を一意に選択することなく、注視点遷移を可能にしている。

次に、各対象の視覚特徴の大きさと円形度、注視した回数を表 1に示した。表1の円形度と注視した回数の関係に注目すると、 円形度の高い対象ほど注視している回数が高いことが分かり、興味対象である丸いものに近いほど多く注視することができている。 導入した興味度マップが評価に応じて更新し、認識側の意図を表現することにより、興味に応じた注視点遷移を行ったため、興味対象に近いほど注視した回数が多くなったと考える。

以上のことから、興味度マップの導入により認識により表現できる目的・興味を考慮にいれて様々な点にに注視点遷移をするシステムが構築できたと考える。

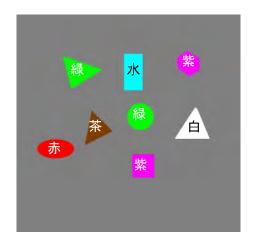


図 5: 実験の入力画像

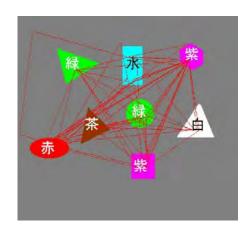


図 6: 注視点遷移の結果

表 1: 円形度と視覚特徴と注視した回数の関係

対象	視覚特徴量	円形度	回数
緑色の丸	336	0.86	23
紫色の正方形	301	0.81	19
紫色の六角形	307	0.79	18
水色の長方形	424	0.75	12
赤色の楕円	453	0.72	11
白色の三角	389	0.56	6
茶色の三角	424	0.5	5
緑色の三角	330	0.5	6

参照頻度の忘却度を変化させたときの注視した回数の変化を図7に示した。忘却度が大きい場合、興味対象である緑の丸に非常に多く注視点として選択するという結果を得た。一方、忘却度が小さい場合、比較的均等に注視点を選択した。これは、忘却しにくくすることで興味ある対象があっても繰り返し何回も注視点として選択する必要がなかったためと考える。

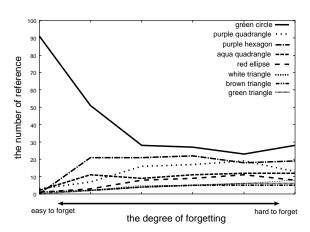


図 7: 忘却の度合と注視した回数

#### 3.2 動画特徴の有効性を示す実験

#### 3.2.1 実験方法

動画特徴を考慮したシステムの有効性を示す実験を行った。固定カメラで室内を撮影した映像を入力とし、動画特徴量マップの有無を比較する実験を行った。ここでは、興味対象を人の肌(顔、手)とし、色(肌色に近いほど有用)で評価した。

#### 3.2.2 結果と考察

実験の結果、動画特徴量を考慮したシステムと考慮しなかったシステムがどのような対象に何回注視したかを表 2 に示す。10 フレームごとの注視点選択結果とその間の注視点遷移の様子を図 8 に示す。

図8の注視点選択結果に注目すると、動画特徴量を考慮しない 場合、動いているものを注視点として選択していない。一方、動 画特徴量を考慮した場合、(a),(f) を除くフレームで動いているも のを注視点として選択している ((b) では右の人の手に、(c) では 投げられたボールに注目している)。また、表2から、動画特徴量 を考慮にいれなかった場合動いているものを 16 回注視している のに対し、動画特徴量を考慮したときは46回注視している。動画 特徴量を考慮にいれたシステムは動いているものを中心に注視点 を選択していることから分かる。図8の注視点遷移の様子も動画 特徴量を考慮にいれることによって動体物を中心に注視点を選択 していることを裏付けている。動画特徴量を考慮しない場合、動 いている動いていないに関わらず、全画面から注視点を選択して いる。一方、動画特徴量を考慮した場合、注視点が動物体に偏っ ていることが分かる。最初の方では選択された注視点が右側に集 まっている。しかし、最後の方では注視点が中央に集まっている。 これは、動いているものが存在した位置と重なっている。このこ とから、動画特徴量を考慮にいれることによって、動いているも のを中心に注視点遷移を行っていることが分かる。

図8の注視点選択結果(f)のように、動画特徴を考慮にいれたシステムが常に動いているものを選択しているという結果を得なかった。(f)では前のフレームでは動いている人を注視していた。しかし、途中から同じ人物に注視しなくなり、他の静止対象物を注視点として選択した。これは、目的適合度マップによって興味が下げられたり、参照頻度マップによって興味が下げられたため

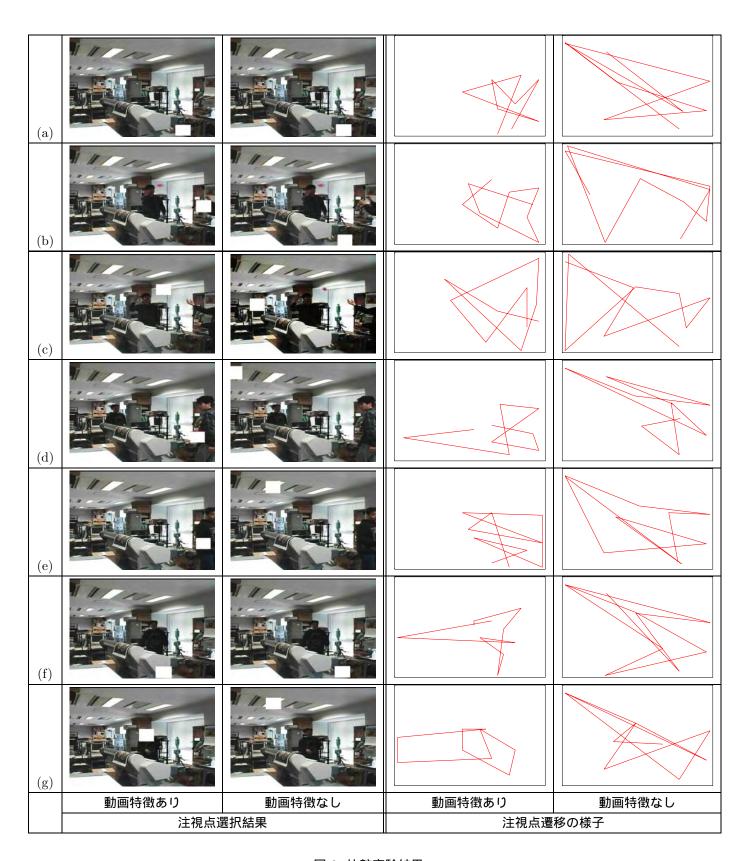


図 8: 比較実験結果

に、他の興味対象を参照しようとしたためと考える。これは、人間が動いているものがあっても興味がなければ、興味ある静止物体を注視しようとする傾向と考えることができる。

次に動いているものが二つあった時の実験結果を述べる。二つ 動いているものがあった場合、最初一つ目の動いているものを選 択する。しかし、数フレーム後には別の動いているものを注視す るという結果を得た。図8の(d)(f)(g)の注視点遷移が左側の対 象を選択しているのは、このとき左側から人が現れ、注視したた めである。このように現在動いているものを選択注視していても 別の動いているものを注視点として選択した。さらに動いている ものが存在し続けた場合、動体物を交互に注視したり、他の静止 物に注視点を遷移した。図8の(b)の注視点遷移の様子が二つの 対象を交互に見ている事を示している。また(c)では、静止対象 を注視していることが分かる。このように、二つ以上動いている 対象が存在しているとき、一つの動体に注視し続けることなく注 視点を遷移するという結果が得られた。これは動画特徴量と視覚 特徴によって一つ目の動体を注視点として選択したが、目的適合 度や参照頻度等により興味が下げられ、他の対象を参照しようと したためである。その結果別の動体を注視点として選択すること が出来たと考える。

このことから動画特徴量マップを追加しても興味度マップによって一つの動体物に注視し続けることなく、注視点を選択していることが分かる。以上のことから、本章の実験において動画特徴量マップを追加することにより動画特徴を考慮した選択的注視点システムを構築できたといえる。

本実験では人の肌を興味対象とし、評価を色のみで判断した。動画特徴を考慮していないときには興味度マップによって、肌色に近い対象に多く注視した。しかし動画特徴を考慮にいれることによって肌色に近い静止物への注目を抑えることが出来た。一方、動体物を注視する回数が増え、興味対象である人間の肌(顔・手)に注視した回数が10回から20回に増加した(表2)。興味度マップを導入した注視システムに動画特徴量マップを考慮することによって、興味対象を注視点選択することがより可能になるといえる。

表 2: 各対象を注視した回数の比較

注視した対象	動画特徴あり	動画特徴なし
人の肌 (顔、手)	20	10
肌以外の動体	26	6
肌色に近い静止物	11	35
肌色以外の静止物	41	47

# 4 まとめ

本稿では、認識により表現できる目的・興味を考慮にいれて様々な点に注視点を移動することを可能にするために興味度マップを導入したシステムを提案した。提案したシステムは導入した興味度マップによって、人間が行っているような注視点選択・認識を繰り返し行い、認識側から情報を受け取りながら注視点を選択するという枠組みを有している。選択された注視点の評価の結果を用いて導入した興味度マップの値を更新し、興味度マップの値が認識側の情報を表現することによって、目的・興味に応じた認識側の意図を組み込んで注視点を選択することを可能にした。本研究で行った実験により、提案したシステムが目的・興味に応じて様々な点に注視点遷移を行うことが示し、提案する興味度マップの有効性を示した。

さらに、動画特徴の特徴量マップを追加したシステムを提案した。動画特徴として対象の移動量や変化量を挙げ、オプティカルフローやフレーム間差分を用いて特徴量を求めた。動画特徴を用

いた特徴量マップを追加したことによって動画独特の特徴量を考慮した選択的注視システムを可能とし、本研究で行った実験によりその有効性を示した。また、動画特徴量を考慮にいれ、興味度マップを追加することで、一つの動体物に注視し続けることなく、注視点遷移を行うことが出来る事を本実験で示した。

# 参考文献

- [1] Itti L, Koch C, Niebur E, "A Model of Saliency-Based Visual Attention for Rapid Scene Analysis", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (PAMI), 1998;20(11):1254-1259.
- [2] 田中 昭二, 井口 征二, 岩舘 祐一, 中津 良平," 画像領域の 物理的特徴に基づく誘目度評価モデル", 信学論 vol.J83A No.5,pp576-588,May,2000
- [3] 日本視覚学会," 視覚情報処理ハンドブック"朝倉書店,2000 連絡先:

〒 464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院 工学研究科 電子情報学専攻 伊藤 誠

電話:052-789-2776 FAX:052-789-3140 Email:itou@okuma.nuee.nagoya-u.ac.jp

# 顔造作データに基づく性別判別と年齢判別

# Discriminant analysis about sex and age based on facial data

三好哲也 Tetuya MIYOSHI 豊橋創造大学 Toyohashi Sozo College

熊沢信幸 Nobuyuki KUMAZAWA 豊橋創造大学 Toyohashi Sozo College

Abstract: In this paper we investigate the correlations of recognizes facial expressions of human faces and gender or age patterns using the linear discriminant analysis, the neural networks and decision tree, and describe the comparisons results about the classification rates and the important contribution for the gender or age classification.

#### 1. はじめに

様々な心理実験より顔造作データと性別や年齢との関連性が指摘されている[1,2]。本研究では、顔画像データから抽出した目や口の位置や形を表す顔造作データに基づく性別と年齢に関する判別問題を取り上げる。判別手法として線形判別手法、ニューラルネットワークによる判別手法、決定木を用いる判別手法を用いる。それぞれの方法による判別率や識別に影響する因子の比較を行い、性別や年齢の判別における判別手法間の良否や相違点を分析する。

#### 2. 顔造作の形状データに基づく性別判別

本節では、目の幅や口の大きさなどの顔造作の形状に関する特徴量に基づいた判別を行う。分析対象は、男女各 100 名合計 200 名の個人撮影写真とした。写真画像より、顔造作の形や位置を表す特徴点を抽出し、その位置座標から文献[3]で有意とされた眉毛の縦幅に対する目の縦幅の比、眉から目までの面積、眉から顎までの距離、眉の離れ具合、眉の曲率、鼻の横幅、目から鼻までの面積、目の縦幅の 8 変量を算出し特徴量とした。この特徴量に基づき線形判別、ニュ・ラルネットワ・クを用いた判別、決定木を用いた判別の 3 手法を用いて性別判別を行った。

図1に3手法のモデル作成時の男女別判別率の平均と汎化能力を評価する男女判別率の平均を示した。また、各判別手法において、判別に重要な要因であると評価された入力項目を表1にまとめた。各モデルにおける変量の重要度は、線形判別モデルでは判別関数における各特徴量に対する係数の絶対値、ニューラルネットワークモデルでは Garson の相対重要度[4]、決定木モデルでは属性選択の順序により判断した。表1では、3つの判別手法に共通した項目には、波線(\_\_\_)、二重線(\_\_\_)を付した。

図1に示した結果から、モデル構築時の判別率と モデルを評価する汎化能力は、共にニュ・ラル ネットワ・クが最も高い判別能力を示した。性別判 別に 重要な要因は、3つの手法に共通して、眉の縦幅に 対する目の縦幅の比と、眉から目までの面積が性別判別における重要な特徴量として選択された。得られた性別判別のための決定木を図2に示す。決定木で表される判別ルールに類似の判別ルールが、線形モデルにおいても確認できた。

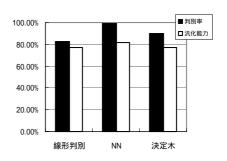


図1 性別判別の判別率と汎化能力

表1 性別判別において判別に重要な要因

手法	抽出された要因
線形	eye height/brow height, brows-e yes
判別	<u>area</u>
NN	eye height/brow height, brows-e yes
ININ	<u>area</u>
	brow separation、 <u>eyes·nose area</u>
決定木	eye height/brow height, brows-e yes
决止小	<u>area</u> , nose width

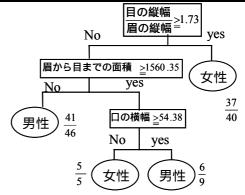


図2 性別判別のための決定木

## 3. 顔造作の形状データに基づく年齢判別

本節では、顔造作の形状デ・タに基 づく年齢判別 分析について述べる。判別対象である年齢に関する 水準として、10代、20代、30代の3群を設定し、10代・20代、10代・30代、20代・30代の3組の2 群判別分析および10代(成人前)と20代以上(成人後)の2 水準を設定した場合の判別分析をおこなった。判別精度の評価には10 fold cy 法を用いた。

分析対象のデータは、10代後半のグル・プ(全員18 才) 20代後半のグル・プ(平均25.5 才、25·30 才) 30代後半のグル・プ(平均36.9 才、35·40 才)のそれぞれ、男女10名ずつの顔画像とした。また、成人前後の年齢判別においてはそれぞれ男女20名ずつの顔画像とした。

72 変量データに対してニューラルネットワークによる判別を行い、相対重要度に基づいて8変量を選択し、その8変量データに対して、線形判別、ニューラルネットワーク、決定木を用いて判別分析を行った。図3に10 fold-cv 法によって算出した3つのモデルの判別精度を示す。また、各判別手法において、判別に重要な要因であると評価された入力項目を表2にまとめた。表2では、共通項目には、波線(\_\_\_)、二重線(\_\_)、一重線(\_\_)、二重波線(\_\_)、点線(\_\_)を付した。

年齢判別に於いてもモデル構築時の判別率とモデルの汎化能力に関して、共にニュ・ラル ネットワ・クが最も高い結果を示した。3 種の判別手法を用いた成人前後の判別問題において、年齢判別に重要であると判断された要因は、顔の横幅および眉の傾きであり3手法で共通していた。最も判別率の高い決定木(図4参照)では、顔の横幅が大きく眉の傾きが小さく、眉の縦幅に対する口の縦幅の比が小さい群は成人前と判別され、顔の横幅が小さく眉の縦幅に対する鼻の縦幅の比が大きい群が、成人後と判別される。線形判別モデルでも類似の判別ルールが確認できた。

## 4. おわりに

本研究では、線形判別モデル、ニューラルネットワークモデル、決定木モデルを用いて顔造作の形状データを用いた性別と年齢の個人特性に対する判別分析を行い、それぞれの手法における判別率や判別に重要な要因について考察した。性別と年齢のどちらに於いても、ニューラルネットワークモデルが高い判別率を示すとともに、3つの手法で類似した判別ルールが抽出できることを確認した。

#### 参考文献

- [1] D.H.Enlow: Handbook of facial growth, 2nd edn. W.B. Saunders Company, Philadelphia, (1982)
- [2] V.Bruce et al.: Sex discrimination: how do we tell the difference between male and female faces, Perception, Vol. 22, pp.131-52, (1993)
- [3]山口 真美, 加藤 隆, 赤松 茂: 顔の感性情報と物理 的特徴との関連について・年令/性の情報を中心に・,電 子情報通信学会論文誌 A, Vol. J79-A, No.2, p.279~287, (1996)
- [4]G.D. Garson: Interpreting neural-network connection weights, Al Expert, pp.47~51, (1991)

#### [問い合わせ先]

〒440-8511 豊橋市牛川町松下 20-1 豊橋創造大学 経営情報学部 メディア・ネットワーク学科 三好 哲也 TEL:0532-54-2111 E· mail: miyoshi@sozo.ac.jp

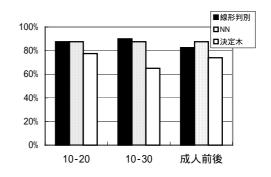


図 3 年齢判別における 10-fold-cv 法による 判別率の比較

表 2 年齢判別において抽出されたル・ル

判別手法	成人前と成人後
線形判別	face width、眉の傾き 、目の傾き
NN	face width、眉の傾き 、
ININ	nose height/brow height
決定木	face width 、眉の傾き 、nose
	height/brow height

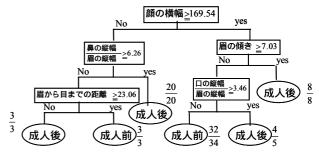


図4 年齢判別のための決定木

# 画像テンプレートマッチングにおけるアフィン変換パラメータの最適調整法

# On optimal adjusting methods for affine transformation parameters in image template matching

○佐藤 明樹 垣内 忍 前田 博 生駒 哲一 Yoshiki Sato Shinobu Kakiuchi Hiroshi Maeda Norikazu Ikoma 九州工業大学 工学部

Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

**Abstract:** It, at present, is difficult for machine to automatically detect small faults on a label pasted on a PET bottle, so that many hands do that in a factory. We are developing a method for the fault detection by a simple image processing. The method uses two-dimensional affine transformation in order to determine a register of a template image and an input image. Then, the parameters of affine transformation are identified by a combinatorial optimization. This paper presents the performances of three combinatorial optimization methods, that is, complex method, Tabu search method, and genetic algorithm.

# 1. まえがき

生産ラインにおいては、製品の外観検査の自 動化が普及してきているが、微妙な欠陥や曲面 に貼られたラベルなどは機械による検出が難し く未だ人間による目視検査などの人海戦術に頼 っているのも現状である。目視による検査も不 良品の混入が許されない全数検査などのように 検査対象が多くなる長時間の検査は持続しにく い。判断基準がばらつく、検査能力に限界があ る等の問題があり自動化が推進されている。[1] そこで本研究では、検査ラインの自動化を目指 して簡単な画像処理によるペットボトルのラベ ル検査法を開発する。本稿では、検査対象がカ メラに正対しているとの前提で、ラベル上に付 着した髪の毛や小片、ラベルのめくれ等の微少 な欠陥を画像テンプレートマッチングにより検 出する方法について述べる。このとき、アフィ ン変換パラメータの最適化に実行時間の大部分 が費やされている。実時間検査を視野に入れる と、この部分の高速化が必要である。そこで本 論文では、3種類の組み合わせ最適化手法につ いて、その性能を比較評価する。

## 2. ラベルの検査方法

本稿ではラインセンサカメラで画像を取り込み、その画像を元に欠陥を発見するための処理 方法として正しい画像をテンプレートとして、 欠陥を有するラベルを比較検査するという考え 方を基に、次の流れで行う。

- ①ラベル部分の抽出
- ②ラベルの小領域への分割
- ③小領域ごとでのマッチング
- ④欠陥判定

- ⑤④により、さらに各小領域を細領域分割
- ⑥細領域ごとでのマッチング
- ⑦欠陥判定

欠陥を微小なものでも検出できるようにする にはラベルを小領域に分解し、それぞれでマッ チングする方が精度が高くなると考えられる。

# 2.1 ラベル領域抽出と小領域分割処理

まず、グレースケールで撮影された画像(図 1) からラベル領域を抽出する。この画像から輝度値に関する度数分布を求め、ヒストグラムを作成する。これをもとに p-タイル法により背景部分とラベル部分が分かれるように閾値を決め 2 値化する。

次に、2値化された画像からラベル領域を抽出する。この画像から垂直方向、水平方向それぞれの軸に白を示す画素を投影した座標値に対する度数分布を求める。度数分布の最高値から求めた閾値以上の度数をもつ範囲がラベル部分の領域となる。

ラベル領域内の輝度値に関する度数分布を求め、ヒストグラムを作成し、p-タイル法によりラベル内の文字やロゴマークなどの抽出を行い2値化画像を作成する。その後垂直方向の軸に白を示す画素を投影した座標値に対する度数分布を求める。細かな凹凸をなくすためガウスフィルタをかけ、3つの山ができるような座標を中心に境界が重なり合うように座標を決める。それが小領域部分の縦幅となる(図2)。





図1 ペットボトル画像

③「製品名部」 図2小領域画像

# 2.2 画像テンプレートマッチング処理

# 2.2.1 テンプレートの画像変換

被検査対象画像は、ラベルの歪みや、撮像時のカメラと対象との距離の微小変化などにより、テンプレートに対して微小な位置ずれや歪みを生じる。本稿ではこのずれを階層的に領域分割したテンプレート画像に対する2次元アフィン変換によって吸収する。

# 2.2.2 変換パラメータの最適化

アフィン変換は垂直軸、平行軸方向それぞれの平行移動 $(d_x,d_y)$ 、拡大縮小 $(\alpha_x,\alpha_y)$ と回転 $\theta$ の5つのパラメータがある。 $\theta$ が微小であるとすれば元座標を(x,y),変換後の座標を(X,Y)とすると 2次元アフィン変換は式(1)で表される。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & \theta \\ -\theta & \alpha_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} \tag{1}$$

パラメータ $\alpha_x$ , $\alpha_y$ , $\theta$ は実数値であるが、ディジタル画像の座標値を表すx,y,X,Y は整数値であるため、5つのパラメータを最適化しても、座標値に戻すときに小数点以下が丸められ最適値と違う値になってしまう可能性がある。そこで、原点から軸方向に一番離れた点での移動ピクセル数(整数値)によって表現したパラメータベクトル $\mathbf{m} = (m_1, m_2, m_3, m_4, m_5)$ を考えこのパラメータをコンプレックス法、タブーサーチ法、遺伝的アルゴリズムの組み合わせ最適化法で探索する。

原点座標が移動するピクセル数の水平軸方向成分を $m_1$ 、垂直軸方向成分を $m_2$ 、拡大縮小で移動するピクセル数の水平軸方向成分を $m_3$ 、垂直軸方向成分を $m_4$ 、回転によるピクセル数を $m_5$ とする。

# (1)コンプレックス法[2]

パラメータ数(n=5)の時のコンプレックス法の処理は大まかに以下の3つのステップになる。Step1) 10(2n)個のパラメータ点群を設定。

Setp2) 二乗誤差(評価関数)が最小となる最優点、最大となる最劣点を求め、最劣点を除く9個の点群の重心点を求める。

Step3) 最劣点と重心点を結ぶベクトル上を 最劣点より二乗誤差が小さい点を探索し、そ の点を最劣点と置き換えて Step2 へ。探索 点が見つからない時は重心点の代わりに最 優点と最劣点のベクトル上を探索する。

# (2)タブーサーチ法[3]

タブーサーチ法のアルゴリズムとしては次のようになる。

Step1) 1 つのパラメータ点を設定し、二乗誤差を求め現在の解とする。

Step2) 現在の解の局所的近傍を探索し、その中での最良解を選択する。ただし、タブーリスト上の遷移をしてはならないとする。この解を新しい解とする。

Step3) 新しい解と現在の解を比較。新しい解が優れていれば新しい解を現在の解としStep2へ。現在の解が優れていれば、タブーリストに遷移を書き込み新しい解を現在の解としてStep2へ。

#### (3)遺伝的アルゴリズム[3]

遺伝的アルゴリズムの処理は次のステップとなる。

Step1) パラメータ点群を作成する。

Step2) ランダムで親を選び1点交叉と突然 変異により子孫を生成する。

Step3) 全体から二乗誤差(評価関数)の悪い ものを淘汰し、Step2 へ。

# 2.3 欠陥の判定

# 2.3.1 平均誤差 E による判定

テンプレートを上記の最適化によって求められたパラメータに従いアフィン変換する。しかし、この時点では、量子化誤差などによる影響で画像のエッジ周辺は欠陥でない微少な誤差が生じてしまう。そこで、この誤差画像を収縮一膨脹処理した画像によりエッジ周辺の微少な誤差を取り除いた平均誤差 $E_1$ を求める。これにより、欠陥部分を見つけやすくする。

式(2)より、 $E_1$ が閾値 $E_{th}$ 以下ならば  $D_1 = OK$ (欠陥無し)と判定する。

$$D_{1} = \begin{cases} OK & E_{1} \leq E_{th} \\ NG & E_{1} > E_{th} \end{cases} \tag{2}$$

# 2.3.2 平均誤差 E, による判定

前提条件でカメラとペットボトルのラベル面 が正対していることになっているが、実際は多 少の傾きが生じてしまう。その影響で若干奥行 き方向の変化があり上下左右で対象物のサイズ が異なってしまう。このような場合、2次元ア フィン変換だけでは対応し切れない。

これに対応するため、 $E_1$ による欠陥判定で $D_1$ = NG となった領域についてさらに領域分割を 行う。ここでは中心位置で上下, 左右各2分割 の計 4 分割  $A_i(i=1,2,3,4)$  する。各分割された 領域ごとに再度最適なアフィン変換パラメータ ベクトル $\mathbf{m}_i$ を求める。そして各領域に対応した m,により変換されたテンプレートと被検査対 象画像とで平均誤差 $E_2$ を求める。 $E_1$ と同様に式  $2 O E_1 & E_2$  に置き換えて判定する。

## 2.3.3 誤差変化率 F による判定

平均誤差 $E_1$ 、 $E_2$ を用いた判定で $D_1 = NG$ と なった場合、これは欠陥による影響なのか、変 形や量子化誤差などによるエッジ周辺の誤差だ けでは判断できない。そこで、ここでは $E_1$ と $E_2$ の関係に着目する。誤差の値が欠陥による影響 なら $E_1$ と $E_2$ ではほとんど変わらないのでその 差は小さく、変形などによる影響なら $E_1$ は $E_2$ よ り小さくなるはずである。 つまり  $E_1$  と  $E_2$  の差が 小さければ欠陥である可能性が高いと考えられ

この関係を誤差変化率として式(3)のように定義 し式(4)を用いて判定を行う。求められた誤差変 化率Fにより判定を行う。

$$F = \frac{\left| E_1 - E_2 \right|}{E_2} \tag{3}$$

$$F = \frac{\left|E_1 - E_2\right|}{E_1}$$

$$D_2 = \begin{cases} OK & F \ge F_{th} \\ NG & F < F_{th} \end{cases}$$

$$(3)$$

#### 3. 実験

本稿では、サントリー㈱社の製品である清涼 飲料水「DAKARA」のペットボトルのラベル検 査について行った。今回の実験では、テンプレ ート作成に利用した正常なペットボトルAとラ ベルに細長い異物として髪の毛が付着した B、

小さな異物が付着した Cと D、ラベルのめくれ た E, テンプレートに使用したものとは違うが 正常な Fについて行った。ラベル小領域はラベ ル上部から順に①会社名部、②ロゴマーク部、 ③製品名部の3つの領域に分けた。今回は前提 条件として、検査対象となるペットボトルはカ メラに対して正対している前提で実験を行った。 今回6つのペットボトルについて原画像から ラベル領域を抽出しさらに抽出された領域から 3つのラベル小領域への分割を行う。次に各小 領域毎にAから事前に作成していたテンプレー トとのマッチング処理を行い、最適化法を用い てマッチングの最適なアフィン変換パラメータ を求める。そのとき探索に要された時間を記録 する。次に求めたパラメータを用いてその領域

の平均誤差を求め、その値から欠陥判定を行い

# 4. 実験結果と検討

欠陥のある領域を見つける。

今回実際のペットボトルの画像(1500× 2000[pixel].グレースケール 256 諧調)を用いて 欠陥検出の実験を行った。テンプレートマッチ ングの際のアフィン変換パラメータの最適化の 方法として、コンプレックス法(CP)、タブーサ ーチ法(TS)、遺伝的アルゴリズム(GA)の3種類 をそれぞれ実行した。検査処理部での画像処理 や判定処理は以下のコンピュータ環境で行った。

> OS :WindowsXP HomeEdition **CPU** :Pentium 4 (2.4GHz) メモリ :512[MB]

各ペットボトルの小領域ごとの平均誤差は表 1のような結果になった。平均誤差による判定 で  $D_1 = NG$  となった領域について誤差変化率 (表2)を求め誤差変化率による判定を行った。 欠陥検出の判定結果は表3に示す。それぞれア フィン変換パラメータの最適化に要した時間を 表4に示す。

表 1 平均誤差 E<sub>1</sub> と E<sub>2</sub> (CP)

		$E_1$		$E_2$			
	1	2	3	1	2	3	
画像 A	0.00000	0.00000	0.00000	-	1	_	
画像B	0.00000	0.00079	0.00000	-	0.00081	-	
画像C	0.00000	0.00071	0.00000	-	0.00071	-	
画像D	0.00000	0.00221	0.00038	1	0.00151	0.00012	
画像E	0.00000	0.00409	0.03397	_	0.00064	0.02922	
画像F	0.00000	0.01911	0.00439	_	0.00270	0.00044	

 $D_1 = NG$ 下線 は、E≦0.0002

表 2 誤差変化率 (CP)

		$E_1 - E_2$		F			
	1	2	3	1	2	3	
画像 A	_	_	_	-	-	_	
画像B	_	0.00002	-	-	0.031	_	
画像C	-	0.00000	-	-	0.000	_	
画像D	_	0.00069	_	-	0.315	_	
画像E	_	0.00345	0.00475	-	0.843	0.140	
画像F	_	0.01641	0.00394	-	0.859	0.899	

 $D_1 = N\overline{G}$ 

<u>下線</u>は、*F*≧0.6

表 3 判定結果

欠阶	るの種類	と場所		$D_1$			$D_2$			
1	2	3	1	2	3	1	2	3		
			ОК	OK	OK	ОК	OK	OK		
	毛髮		ОК	NG	ОК	ОК	NG	OK		
	小片		ОК	NG	OK	ОК	NG	OK		
	小片		ОК	NG	ОК	ОК	NG	ОК		
		めくれ	ОК	NG	NG	ОК	<u>OK</u>	NG		
			OK	NG	NG	OK	<u>OK</u>	<u>OK</u>		
		① ② 毛髪 小片	毛髪 小片 小片	① ② ③ ① OK 毛髪 OK 小片 OK が片 OK がけ OK	欠陥の種類と場所     D1       ① ② ③ ① ②       ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	① ② ③ ① ② ③	欠陥の種類と場所     D1       ① ② ③ ① ② ③ ①       ① ② ⑥ ② ⑥ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	欠陥の種類と場所     D1     D2       ① ② ③ ① ② ③ ① ②     ② ② ① ① ②       ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○		

 $D_1 = NG$ 

<u>下線</u>は、NG→OK

表4 最適化における実行時間(秒)

_			O )(1111b)	(1)
		CP	TS	GA
1	画像 A	11.9	28.9	301.3
	画像B	10.2	29.8	961.1
	画像C	11.2	29.4	963.3
	画像D	8.1	29.3	960.3
	画像E	7.7	27.4	956.6
	画像F	4.7	29.2	971.2
2	画像 A	95.3	126.6	3889.1
	画像B	93.7	117.0	4041.0
	画像C	75.0	148.4	4142.5
	画像D	82.5	140.3	4039.5
	画像E	79.2	125.8	4552.6
	画像F	104.0	133.8	4146.7
3	画像 A	78.6	76.7	1197.4
	画像B	74.1	85.1	2624.7
	画像C	89.4	136.8	2705.7
	画像D	79.2	114.0	2655.2
	画像E	82.6	79.8	2830.1
	画像F	91.5	159.8	2691.9
$\bigcirc \mathcal{O}$	D平均	9.0	29.0	802.3
20	D平均	88.3	132.0	4135.2
30	D平均	82.6	108.7	2450.8

画像 $A \sim D$ では、(2)式を用いた平均誤差による判定 $D_1$ で欠陥有りはNG、正常はOKで正しく判定できていることが分かる。画像E、Fに関して、表1から平均誤差は誤差E1が大きいた

め、判定 $D_1$ では正常部分もNGと判定された。 しかし、誤差変化率による判定 $D_2$ では正しく判定されている。

また、タブーサーチ法、遺伝的アルゴリズムにおいても表3と同様の判定結果を得ることができた。

表4において実行時間は大幅にコンプレック ス法が少ないことが分かる。

# 5. あとがき

本稿では、実際のペットボトルを使用した画像処理によるラベル欠陥検出の手法と実験について述べてきた。本手法は検査対象をカメラに正対させるという条件であれば、ラベル面が少し傾いていても、多少の奥行き方向に変化があってもほぼ有効に欠陥を判定できることは確かめられた。また今回、テンプレートマッチングの際のアフィン変換パラメータ最適化の方法として3種類(コンプレックス法、タブーサーチ法、遺伝的アルゴリズム)の最適化法の比較を行った。この中でコンプレックス法が最も有用であることが確かめられた。

今後は、検査対象をより実環境に近づけていくため、ラベル面がカメラに必ずしも正対しない、カメラの奥行き方向へも変化が起こるなどの条件でも判定可能になるように本手法を拡張していく。

将来的には、ライン上の検査対象を画像取り 込みから欠陥検出の判定まで一連の流れで自動 的にできるようにしていきたいと考えている。

#### 铭樵

最後に実験画像は、マイクロエンジニアリング㈱から の提供によることを記し、ここに謝意を示します。

#### 参考文献

- [1] 奥水大和 監修: "目視検査の自動化技術", ㈱テクノシステム(1995)
- [2] Box, M.J.(1965). A new method of constrained optimization and a comparison with other methods. Computer Journal, Vol.8, pp.42-52
- [3] Sadiq M. Sait and Habib Youssef, 組合せ最 適化アルゴリズムの最新手法 基礎から工学 応用まで、丸善(2002)

## 連絡先:

前田 博

九州工業大学 工学部 電気工学科 〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1

Phone + Fax: 093-884-3248

E-mail: hmaeda@comp.kyutech.ac.jp

# 健常腕から動作を推定する筋電義手制御システム

# Control system to estimate the movement of myoelectric upper limb prosthesis by opposite arm

魚井 孝則 Takanori UOI 横井 博一

Hirokazu YOKOI

九州工業大学大学院 生命体工学研究科

Kyushu Institute of Technology Graduate School of LifeScience and Systems Engineering

Abstract: Myoelectric upper limb prosthesis marketed became very easy to handle the present with the advance on the technology. However, degree of freedom is limited. Then, the operation of both arms was noticed. In the case of the work the human, both arms are cooperatively operated. It is meant that there is the relation on this in the movement of both arms. The movement required in the artificial arm can be estimated, if the movement of the sound arm is measured that is. In addition to the myoelectric signal, the control which increased degree of freedom by the fact of both arms in which the relationship between operations is estimated becomes possible. On the other hand, the relation during operations of both arms is not simple. Because, the solution method by the fact of both arms in which the relationship between operations was learned using neural network was considered. As a result of learning experiment of the neural network, it became clear to reappear almost, even if the others does it, if it is an identical operation.

## 1. 緒言

現在市販されている筋電義手は、技術の進歩に伴い操作性がかなり向上した。しかし利用できる筋電信号の種類には限りがあるので、切断面が上位に及ぶにつれて義手の自由度は減した。そこで「両腕の動作」に着目した。付業を行う際に、両腕を協調させて動作する。これは両腕の動きの間には何らかの関係があることを意味しており、健常腕の動きを計測できる。すなわち筋電信号に加え、健常腕の動作をも考慮することにより、多自由度の義手が可能となる。即ち、本研究の目的は健常腕の動作をもある。

ところが、両腕の動作間の関係は線形化できるほど単純なものではない。そのため、ニューロンネットワークを用いて両腕の動作間の関係を学習させることを考えた。これにより健常腕の動作から義手の動作を推定するシステムが構築でき、計算機シミュレーションによりその有効性を確かめた。

# 2. 健常腕による義手動作推定システム

義手の自由度を増やすためには、義手に与える情報を必然的に多くせねばならない。その一つの方法が健常腕による義手動作推定システムである。本研究では右前腕切断を考慮している。すなわち肘、手首の可動軸を義手で再現することを考える。この場合、図1に示すように切断者は右腕に前腕機能を持つ義手を取り付ける。左腕には健常腕の動きをトレースするためのモーショントレーサを装着する。モーショントレ

ーサは左腕の動きを読み取り、その動きを基に して、義手を制御する。

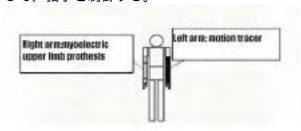


図1 システムの概略

# 3. ボルテラニューロンネットワーク

ニューロンネットワークに両腕動作間の関係を学習させたとき、未学習データに対しても妥当な動作が可能となる汎化機能が期待できる。本研究では、ネットワークの学習能力を高めるためにボルテラニューロンネットワークを使用する。図2はボルテラニューロンを示す。

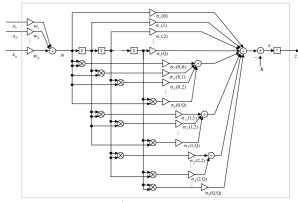


図2 ボルテラニューロン

ニューロンネットワークの入力ベクトルは図3に示すように左腕の関節における各回転軸周りの回転角を成分とするベクトルである。また、

ターゲットベクトルは右腕の関節における各回 転軸周りの回転を成分とするベクトルである。

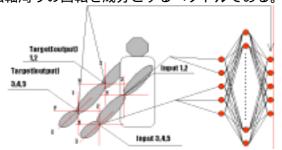


図3 入力ベクトルとターゲットベクトル

# 4. 計算機シミュレーション

計算機シミュレーションは、4種類の両腕の動作を学習させ、その後にニューロンネットワークが学習動作を再現可能か調べる。最後に別の被験者が同じ動作を行った際に対応する動作が発言するかどうかという汎化性を調べる。動作は 箱を持ち上げて下ろす動作、 両手を前に 突き出した状態で両腕を交互に上下させる動作、

人が歩く際の無意識な両腕を振る動き、 自動車のステアリングの操作である。

図 4 と 5 は箱の持ち上げ動作を学習した結果である。図 4 は学習後のニューロンネットワークに同一信号を入力したときの出力とターゲットベクトルを示す。図 5 は学習後に別人の同じ動作を入力した際の出力を示す。いずれの場合も出力はターゲットに近い波形を示している。

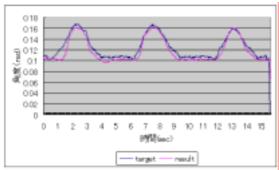


図 4 学習結果

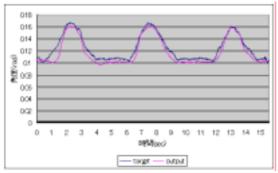


図 5 別人が入力した際の出力

# 5. 結論

ニューロンネットワークに両腕動作間の関係

を学習させた結果、学習データに対しても未学習データに対しても、ターゲットに近い動作が得られた。但し、今回の検証は他人が行ったとはいえ、あくまでも同一の動作に対する出力の結果である。今後の課題として学習時とは全く異なる動作を入力した際に望ましい結果が得られるかということも検証せねばならない。

# 参考文献

- [1] S.Chen, C.F.N.Cowan, and P.M.Great: Orthogonal Least Squares Learning Algorithm for Radial Basis Function Networks, IEEE Transactions On Neural Networks, VOL.2, NO.2,pp302-309,1991
- [2] 魚井孝則、横井博一:両腕動作の相関関係を利用する筋電義手の研究開発,バイオメディカルファジィシステム学会第16回年次大会講演論文集,pp127-130,2003
- [3] 魚井孝則、横井博一:両腕動作の相関関係を利用した新しい筋電義手,電子情報通信学会技術研究報告,NC2003-71~79[ニューロコンピューティング],pp29-34,2003
- [4] 辻敏夫,福田修,大塚彰,金子真:義手制御を目的とした筋電筋電操作トレーニングシステム,電子情報通信学会論文集(D·),vol.J83·D·,No.10,pp2030-2039,2000
- [5] 大賀誠,武田幹雄,門藤至宏,広川勝久,小池明,古川昇:バイオメカニクスによる筋電制御システムの開発と応用研究 動作認識率向上と筋電義手制御システムの小型化,広島県立東部工業技術センター研究報告,No.13,pp6-11,2000

#### 連絡先:

魚井 孝則

九州工業大学大学院生命体工学研究科

〒808-0196 北九州市若松区ひびきの2番4号

Phone: 093-695-6055 Mobile: 090-1166-3147

E-mail: uoi-takanori@edu.life.kyutech.ac.jp

# 血糖値予測制御の小児糖尿病患者への適用

An Application of Predictive Glycemic Control to a Child with Diabetes

五百旗頭 正\*1 藤田 敬之助\*2 堀江 正信\*1
Tadashi Iokibe Keinosuke Fujita Masanobu Horie

# \*1 株式会社複雑系応用技術研究所

Research Institute of Application Technologies for Chaos & Complex Systems Co Ltd

#### \*2 大阪市立総合医療センター 小児内科

Department of Pediatrics, Osaka City General Hospital

**Abstract:** It is considered that the blood glucose control for a child or a young adult with diabetes is more difficult than for an adult, because of the hormone balance changes with growth and daily variations in calorie intake and exercise. The patients with juvenile diabetes are mainly treated by a pediatrician.

Chaos-based predictive glycemic control system developed by Iokibe et al has been applied to adults with diabetes, regardless of diabetes types, and the effect has been confirmed. Based on this result, authors applied this system to a child with diabetes, after informed consent of the guardian, and observed through one year. The case is the outpatient 5-year-old girl, and insulin 30R is administered by a subcutaneous injection twice a day: before breakfast and before dinner. The amount of insulin before dinner is adjusted considering the predicted blood glucose level at next-day before breakfast. As the result, comparing with two months before predictive glycemic control and after one year, the average and standard deviation of SMBG per one month is reduced 177mg/dl to 120mg/dl and 88.2mg/dl to 41.8mg/dl respectively.

#### 1. はじめに

糖尿病には、インスリンの分泌能力が全く無い1型と、不十分でかつインスリン抵抗性を有する2型がある。成人の糖尿病の多くは2型であるのに対し、小児の場合は1型が多い。2型は食事療法や運動療法を基本とし、インスリン療法が補助的に実施されるが、1型はインスリン療法が主で、食事療法や運動療法は従である。

小児糖尿病は、一般に思春期までを言い、成長に伴うホルモンバランスの変化や、食事量と運動量の日々の変化が大きい等で、血糖コントロールが成人と比べて難しいと考えられており、小児糖尿病は主に小児科で診ている。コントロール不良の状態が続くと、網膜症や腎症など糖尿病特有の合併症が発生し、成長期には身長の増加も障害される。これらを回避するには血糖値の変動を少なくし、できるだけ正常値に保たなければならない。しかし現実には、主治医の

指示を守り大きな努力をしているにも関わらず、 不安定な血糖値に悩まされている患者が少なく ない。

五百旗頭らは、インスリン療法を行っている糖尿病患者の血糖値を、出来るだけ正常に近づけかつ変動を抑えるために、カオス理論に則った局所ファジィ再構成法[1]をベースに、血糖値予測システムを開発した。そして、インフォームドコンセントの後、1型2型を問わずインスリン治療を行っている十数名の成人糖尿病患者に適用し、血糖値を正常に近づけ変動抑制に効果がある事を示した[2,3]。筆者らは、この結果をふまえ 2003 年初頭から小児糖尿病患者に適用し、有効性を確認したのでこれを報告する。

# 2. 強化インスリン療法とその問題点

#### 2.1 強化インスリン療法

1 型糖尿病患者で行われているインスリン療

法の主流は、強化インスリン療法と呼ばれるもので、インスリン固定法とスライディングスケール法がある。前者は、血糖値の如何に関わらず、速効型インスリンを朝食前は10単位、昼食前は12単位、夕食前は13単位、睡眠前は中間型を20単位の様に、決まった時間帯に決まった量を投与する。一方後者は、糖尿病患者が個人で使用する、簡易型血糖測定器を用いた自己測定血糖値(Self-monitored blood glucose: SMBG)により、100mg/dl 未満では8単位、100mg/dl 以上200mg/dl 未満では8単位、200mg/dl 以上は10単位の様に、現在の血糖値により投与量を調節する。これらは、一見理にかなっているように見えるが、実は以下に示す問題がある。

#### 2.2 強化インスリン療法の問題点

表 1 に示すように、インスリンが作用する時間は、種類により大きく異なっている<sup>[4]</sup>。一般に食前は、速効型または速効型と中間型を混合した混合型(速効型と中間型の性質を合わせ持つ)が、就寝前は中間型が用いられる。

健常者は食後1時間程度で血糖値のピークを迎えるが、糖尿病の場合これより遅れる。今、朝食前に速効型または混合型インスリンを投与している場合を考える。この目的は、朝食による血糖値の上昇を抑える事である。この意切ない。もの上昇を抑える事である。この意切な投与するのは正しい。しかし、適切な投与量を決めるためには、投与するインスリンの効果が最も顕著な時間、すなわち発現ピーク時間での血糖値を知らなければならない。もし、設定量がある。また、設定量より少なくする必要がある。また、設定量より少なくする必要がある。また、設定量より少なくすべきである。

よって、インスリン固定法は日々の変化に対応できず、スライディングスケール法は、制御理論の立場からすると「制御効果がすぐに現れない、むだ時間システムに比例制御で立ち向か

う」が如く、かえって血糖値の変動を助長する 恐れがある。

表 1. インスリンの種類による作用時間

種類	発現開始	発現ピーク	持続時間
超速効型	15 分以内	30-90 分	5 時間
速効型	30 分以内	2-4 時間	4-8 時間
中間型	2-6 時間	4-14 時間	14-20 時間
持続型	6-14 時間	10-16 時間	20-24 時間

# 3. 血糖值予測制御

## 3.1 血糖值予測

2.2 節で述べたように、発現ピーク時間での血糖値を予測できれば、適切なインスリン投与量、すなわち設定量で良いのか、増やすべきか減らすべきかを適切に判断できる。

SMBG は非定常かつノイズの多い時系列で、 絶対値予測は困難と考えられる。しかし安全性 を考えて、インスリンの調整量を設定量に対し 常に 1 割程度とすれば、予測値の絶対値を重視 する必要はなく、設定量のままで目標範囲に入 るか、近づくか、または目標範囲を逸脱するか という変動方向を予測できれば良い事になる。

#### 3.2 インスリン量の調整

発現ピーク時間での血糖値の変動方向を、ある確度で予測できたとする。ある糖尿病患者の朝食前空腹時血糖値の目標範囲が 70・120mg/dlの場合、就寝前の SMBG が 180mg/dlで、翌朝食前の予測値が 150mg/dlであれば、目標範囲に近づくので就寝前のインスリンは設定量のままで良く、100mg/dlでは目標範囲に入るので、同様に設定量のままで良い。しかし、予測値が200mg/dlであれば、目標上限を超え現在より上昇するため設定量より1割増やし、60mg/dlであれば低血糖の恐れがあるため1割少なくする。

# 4. 小児糖尿病患者への適用

対象としたのは、大阪市立総合医療センター 小児内科の外来患者、5歳(2004年1月22日現 在)女児である。保護者にインフォームドコン セントの後、2ヵ月間の血糖値予測後、予測制御を開始した。この患者は朝食前、夕食前の1日2回、血糖値測定と混合型インスリン 30R を皮下注射している。よって、SMBG 時系列は朝食前→夕食前の血糖値の繰り返しで構成されている。

保護者が希望する安定させたい血糖値が朝食前であったため、どのような血糖値の組み合わせの時系列にすれば、翌日の朝食前血糖値の変動方向を最も良く予測できるかを、事前シミュレーションにより評価した。この結果、朝食前

朝食前よりも朝食前→夕食前→朝食前の組み 合わせによる時系列の方が良い結果が得られる 事が分かった。よって、データベースには朝食 前→夕食前の血糖値を格納し、夕食前の血糖値 により翌日の朝食前血糖値を予測する事にした。

そして、予測値を用いて 3.2 節で示した方法に 従って、夕食前のインスリン量を調整する血糖 値予測制御を開始した。なお、この患者の朝食 前血糖値の目標範囲は、100・200mg/dl である。

以下に示す各グラフ内の縦破線は、予測制御 開始点を示す。

#### 4.1 血糖値予測制御と結果

具体的な運用は、保護者が朝食前、夕食前に 血糖値を測定し SMBG 手帳に記録する。次に、 夕食前のインスリン投与前に、パソコンから血 糖値予測サーバにアクセスし、当日の朝食前お よび夕食前血糖値を送信し、翌日の朝食前予測 血糖値を受信する。そして予測値の変動方向を 参考に、夕食前のインスリン投与量を調整する。

これを 2003 年 1 月 13 日から始め、約 1 年間 観察した。図 1 に予測制御開始前 2 ヵ月から 2004 年 1 月 13 日までの朝食前血糖値の変化を示す。

この様に血糖コントロールを行った結果、糖尿病患者の代表的な評価指標である HbA1c がどの様に変化したかを、図 2 に示す。なお HbA1c は、過去 1・2 ヵ月間の平均血糖値と相関があり、4.3・5.8%が正常とされている。

血糖コントロールの最大の目標は、血糖値を 目標範囲に近づけ、かつ変動を抑える事である。 よって、毎月 14 日から翌月 13 日までを 1 ヵ月 とした血糖値の平均値と標準偏差の変化を図 3 に、目標範囲に入った割合を図 4 に示す。

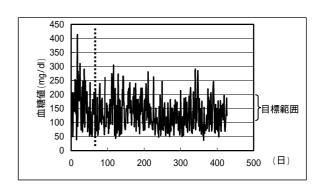


図1 朝食前血糖値の変化

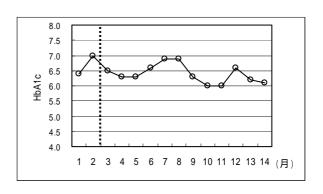


図 2 HbA1c の変化

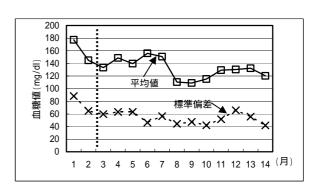


図3 1ヵ月毎の血糖値の平均および標準偏差

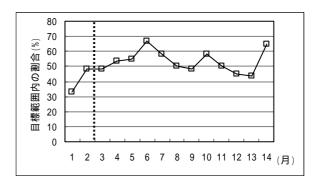


図4 1ヵ月毎の目標範囲内の割合

# 4.2 制御の正当性評価

実測値、予測値、目標範囲の関係から得られたインスリン増減判断が正しいか否かは、以下の様に行った。

#### (1) インスリンを増やした場合

結果として目標範囲未満になった場合、これは増やさなかった方が良かったと判断できるので、この場合は誤りである。これ以外は正しいと判断する。

#### (2) インスリンを減らした場合

結果として目標範囲を超えた場合、減らさなかった方が良かったと判断できるので、これは誤りである。これ以外は正しいと判断する。

以上の評価結果の月別変化を図5に示す。

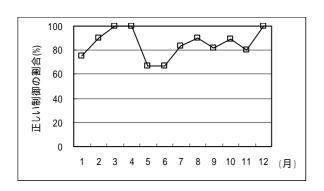


図5 1ヵ月毎の正しい制御の割合

1年間の血糖値予測制御における1ヵ月月当たりの適切な制御の割合は、平均で85.2%であった。

#### 5. まとめ

血糖コントロールが、成人と比べて難しいと 考えられている小児糖尿病患者の血糖値予測制 御に、成人の場合と全く同じアルゴリズムを用 いた。

この結果、制御開始前と開始後を比較すると、 多少の上下変動があるものの、徐々に平均値が 下がり標準偏差も減少している。特に、制御開始2ヵ月前と制御開始から1年後を比較すると、 月平均血糖値は177mg/dlから120mg/dlに、標準 偏差は88.2mg/dlから41.8mg/dlに改善され、目標範囲に入った割合は33.3%から64.5%に向上 した。またHbA1cを7%未満に保つ事が、糖尿 病の合併症の予防、または進展防止に役立つとされおり、1年を通じて6.0・6.9と7.0%未満で安定している。

このように血糖値予測制御は、成人糖尿病患者のみならず小児糖尿病患者にも有効である事を示した。

本血糖値予測システムは ASP 化されており、インターネットに接続できるパソコンや携帯電話等ですぐに利用できる<sup>[3]</sup>。また本システムは、食事内容、摂取カロリーや運動量など SMBG 以外のデータは一切必要とせず、最大で過去 80 日分の SMBG データがあれば利用可能である。今後、不安定な血糖値に悩まされている多くの糖尿病患者に、本システムが利用され、QOL の向上に役立つ事を期待している。

# 参考文献

- [1] 五百旗頭 正, 菅家 正康, 藤本 泰成, 鈴木 新悟, "カオス的時系列の短期予測のための 局所ファジィ再構成法," 日本ファジィ学会 誌, 第7巻, 第1号, pp.186-194 (1995).
- [2] T. Iokibe, M. Yoneda, K. Kakita, "Chaos based Blood Glucose Prediction and Insulin Adjustment for Diabetes Mellitus," In Proc. of IEEE EMBS Asian-Pacific Conference on Biomedical Engineering 2003, 2003/10/20-10/22, Keihanna, Japan, pp.0-7803-7944-6/03 (2003).
- [3] http://www.riccx.com/kettochi/index.html
- [4] http://www.diabetes.org/home.jsp

## 連絡先:

五百旗頭 正

(株)複雑系応用技術研究所

〒231-0023 横浜市中区山下町 74-1

大和地所ビル 911

Phone/Fax: 045-212-1290

E-mail: t.iokibe@riccx.com

# 生活習慣病診断支援システムの構築 SUPPORTING SYSTEM OF LIFE-STYLE RELATED DISEASE

增井重弘<sup>1)</sup> 佐藤秀昭<sup>2)</sup> 小杉 智<sup>1)</sup>
Shigehiro Masui<sup>1)</sup> Hideaki Sato<sup>2)</sup> Satoshi Kosugi<sup>1)</sup>

松田修三<sup>1)</sup>

渋谷幸男1)

1)法政大学工学部

Syuzou Matsuda<sup>1)</sup>

Yukio Shibuya<sup>1)</sup>

2)立川病院

2 ) Tachikawa Hospital

1 ) Faculty of Engineering Hosei University

Abstract: Life-style related diseases are diagnosed for a great number of medical examination patients by medical specialist. However, since there are few medical specialist of medical examination, medical practitioners who have more or less special knowledge of life-style diseases often diagnose patients. We propose a method of diagnosis support system construction for life-style related diseases based on fuzzy theory that make possible induction of human consideration. The present improvement suggestions for life-style related diseases are obtained form the execution result of this system that that medical practitioners and patients can easily understand.

## 1. はじめに

生活習慣病といわれるものには、糖尿病、高 脂質血症、高血圧などがある。現代ではありふ れた病気ばかりであるが、生活習慣病の特徴と して以下の点が挙げられる。

- (1)日常の生活習慣(食事・運動・嗜好)が原因となっていて、生活習慣の改善・日常行動の改善が治療の基本になる。
- (2)病気の初期には自覚症状がなく、治療に対する動機が生じない。
- (3)慢性の経過をとるため通院・服薬・生活習慣の変更を長期に継続することは困難である。

よって、生活習慣病診断は従来行われてきた 成人病対策としての早期発見、早期治療という 二次予防に重点を置いただけでなく、病気を起 こさないようにしていく一次予防が重視される。 また健康診断の受信者には診断結果として検

また健康診断の受信者には診断結果として検査値とともに、アルファベット表記された結果が渡されるのが一般的であり、自分自身の健康状態を把握することは困難であると考えられる。

そこで、本研究では、ソシオメトリー分析によるファジィグラフを用い、生活習慣病と検査項目間の関係を明らかにし、検診者が自分自身の健康状態を把握でき、セルフケアによるライフスタイルの改善を可能にする為のシステム構築を目指した。

# 2. 対象

# 2.1 検査項目

対象とした検査項目を以下に示す。

身体計測系: Body Mass Index (BMI) ウエスト値 (W値) ウエスト・ヒップ比 (W-H値) ウエスト・身長値 (W-身長値)

循環器系:収縮期血圧、拡張期血圧 糖代謝系:空腹時血糖、HbA1c 脂質代謝系:中性脂肪(TG) 総コレステロール (TC) HDL-c、LDL-c

肝臓・胆嚢系:GOT、GPT、 -GPT

# 2.2 生活習慣項目

対象とした生活習慣項目を以下に示す。

- ・ 食事の時間が不規則
- ・ 間食をする
- 果物をあまり食べない
- ・ 塩辛いものをよく食べる
- ・ 油っこいものをよく食べる
- 夕食の食事量が多い
- ・ 夕食は午後九時以降が多い
- 野菜をあまり食べない

#### 2.3 対象人数

対象人数は以下のようになっている

	男性	女性
30代	393名	201名
40代	8 4 9 名	354名
50代	9 4 5 名	4 3 1名
合計	2187名	986名

# 3. 方法

#### 3.1 ソシオメトリー分析

ソシオメトリー分析はこれまで人間関係や社会構造を定量的に分析する代表的な測定法として様々な分野にこれまでも用いられているが、グループやメンバーといった構成要素の関連状態をわかりやすく図示することができることが最大の特徴である。本研究の場合は実際にアンケートを行うといったタイプの調査ではないが、検査項目を基準値内、基準値外のデータに分けて、そのなかに他の検査項目の異常者が何割いるかをだし、それを選好行列として考える。データを範囲に分けたのは個人診断に対応するた

めである。

まず、データを年代、性別、検査項目の基準 値内、基準値外を分けて、そのなかで他の検査 項目の基準値をこえる人数をカウントする。そ の後割合になおす。

以下に設けた基準値を示す。

身体計測系:BMI 25以上

w値 8 5 以上 w - H値 0.9以上

w-身長値 0.5以上

循環器系:収縮期血圧 140以上

拡張期血圧 9 0 以上

糖代謝系:空腹時血糖 111以上

HbA1c 5.8以上

脂質代謝系:TG 150以上

T C 2 2 0 以上

HDL-c 40以下

LDL-c 140以上

- O I 3 O 以上 G P T っつ 肝臓・胆嚢系:GOT

- GTP 60以上

個人診断の検査値をもとにし、範囲分けした データにあわせて行列を作り、それを選好行列 Tとし、検査値間のみ友好行列Sで表す。式は 以下の(1)の通りです。

$$S_{ij} = \frac{2}{\frac{1}{t_{ii}} + \frac{1}{t_{ij}}} \dots (1)$$

その後、近似三値をもちいたファジィグラフ を示す。

# 3.1 近似三値

近似三値分析とは通常複雑で特性がわかり づらいファジイグラフのもつ情報を大域的に分 析し,Fiiが1に近い時は関連があり,逆に0に 近い時には関連がない、というように表現する 分析方法である.

ファジイグラフFの適切な近似三値グラフを 求めるために,Fのp-グラフFP,0 p<0.5,を 以下で定義する.

Fのp-グラフ FP

$$f^{p} = (f_{ij}^{p}), f_{ij}^{p} = \begin{cases} 1, f_{ij} > 0.5 + p \\ f_{ij} = 0.5 - p, f_{ij} = 0.5 + p \\ 0, f_{ij} < 0.5 - p \end{cases}$$
...(2)

次に,ファジイグラフFの適切なp-グラフを作成

するために,FとFの距離関数d(p)を定義する (式(3)).

$$d(p) = \frac{2\sum_{i,j} |f_{ij} - f_{ij}|^{p}}{n^{2} - n} \in [0,1] \qquad \dots (3)$$

ファジイグラフとそのp-グラフ FPの距離関数 d(p)は,単調減少でありpが0.5に近づくとd (p) は0に近づく.

任意のファジイグラフFと任意の > に対し て,あるp [0,0.5]が存在して,d(p) < を みたすとき,そのようなFºをFの 類似グラフ という. ただし, はファジイ決定により定ま る評定値で,通常0.27,0.20などとされる.こ こでファジイグラフFに類似していて,しかも簡 単なp-グラフを求めることを考える.上記で示 したように距離関数d(p)は単調減少であるから 最も見やすく適切なグラフとなるpは,d(p)< をみたすpの最小値である. それを最適値と考え p\*と表す.またp\*によるFのp-グラフをFの近似 . 三値グラフといい,F\*と表す.

ここでは = 0.27 として用いる。

# 4. 個人診断

例として、50 代男性Aさんの場合で結果を示 す。

検査値は以下のようになっています。

BMI:23.6、w值:85 cm、w-H值:0.91、

w - 身長値:0.47

収縮期血圧:137 mmHg、拡張期血圧:100 mmHg

空腹時血糖: 97 mg/dl、HbA1c: 5.7 %

TG: 72 mg/dl, TC: 180 mg/dl, HDL-c: 77 mg/dl, LDL-c: 88.6 mg/d1

GOT: 25 IU/1, GPT: 19 IU/I, -GTP: 53 IU/I

## 生活習慣項目

- ・塩辛いものをよく食べる
- ・油っこいものをよく食べる
- ・夕食の食事量が多い

以下の表1に選好行列を示す

表1.50代男性 A さん選好行列

		BMI	W値	W-H値	W-身長値	収血圧	拡血圧	空血糖	HbA1c	TG	TC	HDL-c	LDL-c	GOT	GPT	- GTP
BMI	18.5<=~<25	1.00	0.09	0.47	0.08	0.09	0.13	0.18	0.15	0.21	0.32	0.10	0.30	0.12	0.19	0.28
W値	85<=~	0.78	1.00	0.97	0.81	0.13	0.23	0.32	0.21	0.50	0.39	0.21	0.39	0.25	0.46	0.50
W-H値	0.9<= ~	0.47	0.45	1.00	0.49	0.11	0.17	0.26	0.19	0.39	0.39	0.15	0.35	0.18	0.33	0.40
W-身長値	~ < 0.5	0.10	0.08	0.44	1.00	0.08	0.13	0.16	0.14	0.23	0.31	0.11	0.29	0.12	0.20	0.27
収血圧	~<130	0.30	0.24	0.55	0.27	1.00	0.01	0.19	0.16	0.27	0.30	0.12	0.30	0.12	0.23	0.26
拡血圧	~ <85	0.30	0.26	0.57	0.29	0.02	1.00	0.19	0.16	0.29	0.29	0.14	0.29	0.14	0.25	0.29
血糖	~<111	0.29	0.25	0.56	0.26	0.09	0.13	1.00	0.06	0.26	0.32	0.12	0.31	0.13	0.22	0.29
HbA1c	~ <5.8	0.31	0.27	0.58	0.28	0.10	0.15	0.12	1.00	0.29	0.32	0.13	0.31	0.15	0.26	0.32
TG	~<150	0.23	0.20	0.53	0.23	0.09	0.13	0.16	0.14	1.00	0.27	0.08	0.28	0.13	0.23	0.25
TC	~<200	0.27	0.22	0.49	0.24	0.08	0.10	0.23	0.18	0.19	1.00	0.15	0.01	0.14	0.26	0.28
HDL-c	40<~	0.29	0.26	0.58	0.28	0.09	0.15	0.21	0.16	0.27	0.34	1.00	0.30	0.16	0.26	0.35
LDL-c	~<140	0.31	0.25	0.56	0.29	0.09	0.13	0.22	0.16	0.28	0.11	0.13	1.00	0.16	0.27	0.33
GOT	~<30	0.29	0.25	0.58	0.27	0.08	0.13	0.19	0.15	0.29	0.32	0.14	0.31	1.00	0.16	0.24
GPT	~<30	0.26	0.21	0.55	0.24	0.08	0.12	0.16	0.15	0.27	0.32	0.13	0.30	0.03	1.00	0.22
- GTP	~<60	0.27	0.21	0.54	0.24	0.07	0.12	0.17	0.15	0.23	0.29	0.16	0.31	0.05	0.15	1.00
塩辛いもの	Dをよく食べる	0.31	0.30	0.65	0.35	0.13	0.17	0.18	0.12	0.31	0.42	0.13	0.35	0.19	0.30	0.40
油っこいもの		0.36	0.38	0.74	0.36	0.13	0.18	0.18	0.13	0.34	0.39	0.16	0.33	0.13	0.30	0.29
夕食の食	事量が多い	0.42	0.35	0.65	0.39	0.06	0.14	0.17	0.14	0.32	0.37	0.11	0.32	0.13	0.23	0.36

表1の選好行列を友好行列に直したものを表2に示す。

表2.50代男性Aさんの友好行列

K = 1.0.0 1000   E. 1.0.00   W. 1.1.0.0																
		BMI	W値	W-H値	W-身長値	収血圧	拡血圧	血糖	HbA1c	TG	TC	HDL-c	LDL-c	GOT	GPT	- GTP
BMI	18.5<=~<25	1.00	0.17	0.47	0.09	0.13	0.18	0.22	0.21	0.22	0.30	0.15	0.30	0.17	0.22	0.27
W値	85<= ~	0.17	1.00	0.62	0.14	0.17	0.24	0.28	0.23	0.29	0.28	0.23	0.30	0.25	0.29	0.30
W-H値	0.9<= ~	0.47	0.62	1.00	0.46	0.19	0.26	0.36	0.29	0.45	0.43	0.24	0.43	0.28	0.41	0.46
W-身長値	~ < 0.5	0.09	0.14	0.46	1.00	0.12	0.18	0.20	0.18	0.23	0.27	0.15	0.29	0.16	0.22	0.25
収血圧	~<130	0.22	0.17	0.19	0.12	1.00	0.01	0.13	0.12	0.13	0.13	0.10	0.14	0.10	0.12	0.11
拡血圧	~ <85	0.18	0.24	0.26	0.18	0.01	1.00	0.16	0.15	0.18	0.15	0.14	0.18	0.14	0.16	0.17
血糖	~<111	0.22	0.28	0.36	0.20	0.13	0.16	1.00	0.08	0.20	0.27	0.15	0.26	0.15	0.19	0.22
HbA1c	~<5.8	0.21	0.23	0.29	0.18	0.12	0.15	0.08	1.00	0.19	0.23	0.14	0.21	0.15	0.19	0.20
TG	~<150	0.22	0.29	0.45	0.23	0.13	0.18	0.20	0.19	1.00	0.22	0.13	0.28	0.18	0.25	0.24
TC	~<200	0.30	0.28	0.43	0.27	0.13	0.15	0.27	0.23	0.22	1.00	0.21	0.01	0.19	0.29	0.28
HDL-c	40<~	0.15	0.23	0.24	0.15	0.10	0.14	0.15	0.14	0.13	0.21	1.00	0.18	0.15	0.17	0.22
LDL-c	~<140	0.30	0.30	0.43	0.29	0.14	0.18	0.26	0.21	0.28	0.01	0.18	1.00	0.21	0.28	0.32
GOT	~<30	0.17	0.25	0.28	0.16	0.10	0.14	0.15	0.15	0.18	0.19	0.15	0.21	1.00	0.05	0.08
GPT	~<30	0.22	0.29	0.41	0.22	0.12	0.16	0.19	0.19	0.29	0.29	0.17	0.28	0.05	1.00	0.17
- GTP	~<60	0.27	0.30	0.46	0.25	0.11	0.17	0.22	0.20	0.24	0.28	0.22	0.32	0.08	0.17	1.00
塩辛いもの	)をよく食べる	0.31	0.30	0.65	0.35	0.13	0.17	0.18	0.12	0.31	0.42	0.13	0.35	0.19	0.30	0.40
油っこいもの	のをよく食べる	0.36	0.38	0.74	0.36	0.13	0.18	0.18	0.13	0.34	0.39	0.16	0.33	0.13	0.30	0.29
夕食の食	事量が多い	0.42	0.35	0.65	0.39	0.06	0.14	0.17	0.14	0.32	0.37	0.11	0.32	0.13	0.23	0.36

これに近似三値を用いたファジィグラフで示すと図1のようになる。

図1 50代男性Aさんファジィグラフ

次に50代女性Bさんの場合を示す。

BMI:27.3、w値:85 cm、w-H値:0.94、

w - 身長値:0.57

収縮期血圧:102 mmHg、拡張期血圧:78 mmHg

空腹時血糖:89 mg/dl、HbA1c:4.8 %

TG: 165 mg/dl, TC: 272 mg/dl, HDL-c: 47 mg/dl,

LDL-c: 192 mg/dl

GOT: 25 IU/1, GPT: 28 IU/I, -GTP: 18 IU/I

# 生活習慣項目

- ・間食する
- ・塩辛いものをよく食べる
- ・油っこいものをよく食べる
- ・夕食の食事量が多い

近似三値を用いたファジィグラフを図2に示す。

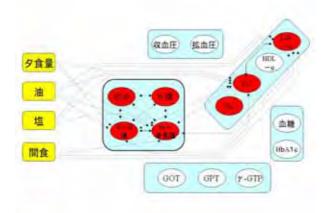


図2 50代女性Bさんファジィグラフ

# 5. 考察

男性は女性に比べて、検査値が異常な人が多い。

30代女性はあまり異常が見られなく50代になると全体的にTC、LDL-cが異常になっている。

W-H値は他の検査項目に比べて、異常者の割合が多いので他の検査項目が異常でなくてもそこからW-H値にアークが伸びることが多かった。

生活習慣に関しては油っこいものをよく食べる。夕食の食事量が多い。野菜をあまりたべない。間食するの順に検査値に影響を与えていました。塩辛いものをよく食べる。食事が不規則。果物をあまり食べないという生活習慣はあまり検査値に影響を与えていませんでした。生活習慣項目アンケートは第三者が記入するのではなく、受信者本人が記入するので、本人の主観などが入るためだと思われる。

#### 6. まとめ

本研究で、実際の検査値を用いてファジィグラフを用いた結果、系統ごとの評価ではなができた。また、大り柔軟な出力結果を得ることががきた。また、実際の内容についても診断結果をきた。また、実際の内容についても診断にしても変に、関系に対しても変に、関係を受信者といるに、見ただけで自分の健康状態にといるために、見ただけで自分の健康者側ととができたのではないかと思われる。また、検査項目が増加しても容易にできるため今後表にも新たな検査方法の導入にも新たにシステ

ムを作り返る必要なく柔軟に対処することのできるシステムが構築できたと思われる。

今後の課題として、経年変化なども取り入れ たシステム構築を目指す。

# 参考文献

- [1]山下元、須田宏:ファジィ数学入門、森北 出版株式会社、pp71-76, pp79-89
- [2]州之内治男、山下元:ファジィ情報分析、 共立出版、pp77-119
- [3]水元雅晴:ファジィ理論とその応用、サイエンス社

#### 連絡先

増井重弘

法政大学工学部システム制御工学科 〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2

電話番号:042-387-6249 FAX 番号:042-387-6123

E-mail: masui@k.hosei.ac.jp