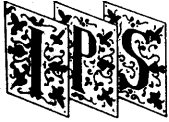


解説



ファジィと画像パターン認識†

廣 田 薫††

1. はじめに

ファジィ理論が、ファジィ集合としてカリフォルニア大学の L. A. Zadeh 教授により 1965 年に発表されて以来¹⁾, 種々の批判のなかで応用の道が模索された。それらの中で、1974年にロンドン大学の E. H. Mamdani 教授によるスチームエンジンのファジィ制御実験²⁾ が公表されると制御分野への応用が加速され、特に 1980 年代に入ってから日本におけるファジィ制御実用化により、ファジィ技術の意義が広く認められるようになった。

しかし、ファジィ制御実用化の進歩があまりにも急であったためか、制御分野以外への応用が霞んでしまった感もある。ファジィ制御の産業応用事例の件数は、600 件以上とも言われており現在でもその増加傾向には変わりはないようである。そして制御応用以外の適用可能分野を新たに開拓すべく努力が行われている。エキスパートシステム、医療応用、経営、経済、官能評価などと並んで、画像認識も適用可能性が有望視されている。ここでは、ファジィ技術と画像パターン認識の研究動向と技術の現状を、分かりやすく解説する。

2. ファジィと画像の研究の歴史

画像パターン認識へのファジィ理論の適用については、ファジィクラスタリングの研究抜きでは語れない。クラスタリングによりパターン集合をカテゴリ分割する際に、境界部分のパターンはいくつかのカテゴリに関連をもつ。従来のクラスタリング（ハードクラスタリングとも言う）では、いずれか一つのカテゴリに帰属させることになるが、ファジィクラスタリングでは帰属度に曖昧さ

を許して、いくつかのカテゴリに少しずつ帰属することを認めている。境界部分の属性が曖昧な事柄を表現しようとしたファジィ集合の最も自然な応用の一つと言えよう。

このファジィクラスタリングの考え方は、すでに 60 年代に E. H. Ruspini により、提案されている³⁾。その後、M. Roubens によるパターン認識への応用⁴⁾ や、具体的なアルゴリズムとして J. C. Bezdek による Fuzzy ISODATA の研究⁵⁾ などがよく知られている。この分野の技術は、ある程度まとまっており、すでにテキスト⁶⁾ も出版されている。

そのほか、従来からの画像認識の個別技術にファジィ手法を導入したものも多数みられる。代表的と思われるものをいくつか列挙しよう：初期の手書き数字認識⁷⁾、ファジィ決定木探索⁸⁾、濃淡画像の細線化⁹⁾、ファジィ平滑化による画像強調¹⁰⁾、曲線の当てはめ¹¹⁾、コンピュータビジョンにおける不確実情報の表現¹²⁾、X線画像の構造化認識¹³⁾、印刷カラー画像の主観評価¹⁴⁾。

また、S. C. Lee らによる初期の研究¹⁵⁾にはじまり、ファジィとニューラルネットの技術を融合して画像認識に応用する研究も近年多数発表されている^{16~19)}。

これらの研究のサーベイには、最近 J. C. Bezdek らにより IEEE から論文集²⁰⁾が出版されているので、参考になる。

以下では、著者の研究成果も含めて、ファジィクラスタリング、ファジィ決定木、ファジィニューロンの画像認識への応用について、解説する。

3. ファジィクラスタリングと画像パターン認識

クラスタリングの手法を定式化すれば、以下のようになる。

取り扱うデータ集合を

† Fuzzy and Image Pattern Recognition by Kaoru HIROTA (Dept. of Systems Control Engineering, College of Engineering, Hosei University).

†† 法政大学工学部システム制御工学科

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (1)$$

$$(x_j \in R^s)$$

とする。

与えられた n 個の s 次元ベクトルデータ集合を、 c 個のカテゴリ集合(クラスタ集合)に分類することが、クラスタリングの目的である。(c は、 n に比べて通常きわめて小さく、あらかじめ与えることも、またほかの評価基準により決定することもある。) したがって、クラスタリングの最終結果は、

$$U = [u_{ij}] \quad i=1 \sim c, \quad j=1 \sim n \quad (2)$$

なる、分割行列 (partition matrix) U により表示される。 U の i 行 j 列要素 u_{ij} は、データ x_j が i 番クラスタに帰属する度合いを表す。その値が $\{0, 1\}$ 2 値の場合が通常の (ハード) クラスタリング ((hard) clustering), $[0, 1]$ 多値の場合がファジィクラスタリング (fuzzy clustering) である。

ここで、分割行列には、次の二つの制約条件が与えられている。まず、各データベクトル $x_j (j=1 \sim n)$ について、その帰属度の総和は 1 に正規化されていること

$$\sum_{i=1}^c u_{ij} = 1 \quad (3)$$

次に、各クラスタ $i (i=1 \sim c)$ について、帰属度が皆無ではないこと

$$\sum_{j=1}^n u_{ij} > 0 \quad (4)$$

の二つの条件が与えられる。帰属度の値の設定の仕方をみれば、ファジィクラスタリングは、ハードクラスタリングの拡張とみなせる。

(ハード)クラスタリングについては、古くから各種のアルゴリズムが報告されており、それらのファジィ拡張であるファジィクラスタリングのアルゴリズムも数多く提案されている。それらの中でも、よく使われかつ安定して使えるとして定評のあるものが、Bezdek⁵⁾ らによる FCM (Fuzzy C-Means) (そのプログラムを FUZZY ISODATA と言う) である。FCM はいわゆる反復法であり、

$$J_p(U, V) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n (u_{ij})^p \|x_j - v_i\|^2 \quad (5)$$

という形式で与えられる目的関数の局所最小化により分割行列 U を決定する方法

である。ここで p は 1 以上のパラメータであり、

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_c\} \quad v_i \in R^s \quad (6)$$

はセントロイドと呼ばれるクラスタ中心ベクトルの集合である。

FCM の画像パターン認識応用としては、特徴抽出により各パターンを R^s のベクトルとして表現して、分類する方法などが考えられる。データの与え方にもよるが、反復回数は数十回程度で収束し、汎用的に使える良好なアルゴリズムであることが経験的に分かっている。具体的な応用例として、筆者らが航空画像に適用した例を図-1 に示す。

4. ロボットビジョンにおけるファジィ実時間画像認識

従来からの画像処理技術にファジィ技術を導入して改善を図る工夫はいろいろ行われているが、それらのなかから木探索手法への応用によるロボットビジョンの例を解説する²²⁾。

識別したいパターンのカテゴリが与えられたとき、用意した特徴量のなかから、必要十分な最小限の特徴量集合を選びだすアルゴリズムを述べる。

用意した m 個のパターンカテゴリを C_1, C_2, \dots, C_m , 用意した n 個の特徴量を $F_1, \dots, F_j, \dots, F_n$ とする。さらに、おのおののパターンカテゴリの出現頻度を P_1, P_2, \dots, P_m , 入力画像からおのおの特徴量を計算する時間を $t_1, \dots, t_j, \dots, t_n$ とし、あらかじめ与えておくものとする。

目標とすることは、 m 個のカテゴリを必要最小限の特徴量集合で効率よく識別する識別木を、出現頻度の高いカテゴリほど短時間で識別するという要請も考慮して、いかに作るかということである。

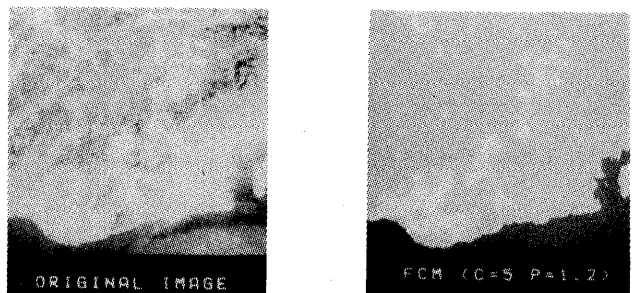


図-1 FCM の航空画像領域分割への応用例²¹⁾

まず、用意された特徴量のおのおのが与えられた個々のパターンに対してどのような値をとるかを調べると、図-2 に示すようなファジィ集合のメンバシップ関数で与えられる。

この例では、たとえばカテゴリ C_1 と C_3 はこの特徴量 F_1 で識別可能だが、 C_1 と C_2 は一部識別不能になるということなどが分かる。その結果を表-1 に示す判別表で表現できる。

この例では、たとえば C_2 と C_3 、 C_2 と C_4 はどちらも1で、 F_1 によって完全に判別可能ということが分かるが、図-2 を見れば C_2 と C_3 の組合せのほうが分布がより離れておりゆとりのあることが分かる。このような要因を考慮すると表-2 に示す効果度という指標を作ることができる。

この効果度により、与えられたパターン集合に対する各特徴量の識別力の善し悪しが判定できる。しかし効果度が同じであれば、入力画像からの特徴量計算時間が少ないものがよいし、また出現頻度の高いパターンの組合せに対して強力な特徴量のほうが望ましい。そこで、効果度に計算処理時間とカテゴリ出現頻度を考慮して、表-3 に示すような重要度という指標を作ることができる。

以上をすべての特徴量 $F_1, \dots, F_j, \dots, F_n$ に対し

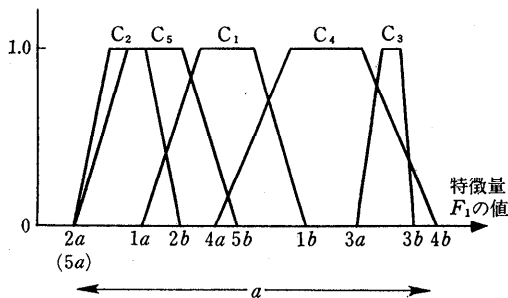


図-2 パターンカテゴリと特徴量分布の概念図

表-1 F_1 特徴量の判別表

	C_5	C_4	C_3	C_2	C_1
C_1	0.2	0.29	1	0.6	
C_2	0	1	1		
C_3	1	0.2			
C_4	0.86				
C_5					

て計算すれば、指定されたカテゴリ集合を実時間で識別する際の各特徴量の善し悪しが判定できることになる。そして、重要度の大ききの順に表-1 に示したような判別表を重ねていく。ただし、重ねる際に各項目の数値は大きいものに更新していく。そして、全項目が1になったところで止めれば、そこまで用いた特徴量の集合が与えられたパターンカテゴリ集合を識別するための、必要最小限の特徴量集合ということになる。

こうして必要最小限の特徴量集合が得られたので、それらを効率的に配置して識別木を作成すればよい。その効率的配置に関して、表-4 に示す

表-2 F_1 特徴量の効果度 E_1

	C_5	C_4	C_3	C_2	C_1
C_1	0.005	0.0145	0.25	0.045	
C_2	0	0.25	0.575		
C_3	0.45	0.005	e'		
C_4	0.129				
C_5					

$E_1 = \sum e' = 1.7235$

表-3 F_1 特徴量の重要度 I_1

		Pb 5	4	3	2	1
Pa		C_5	C_4	C_3	C_2	C_1
1	C_1	0.03	0.0725	1.0	0.135	
2	C_2	0	1.5	2.875		
3	C_3	3.6	0.035	i'		
4	C_4	1.161				
5	C_5					

$\sum i' = 10.4075$
 $t_1 = 1$
 $I_1 = 10.4075$

表-4 F_1 特徴量の適応度 A_1

		Pb 5	4	3	2	1
Pa		C_5	C_4	C_3	C_2	C_1
1	C_1	1	1.16	3	1.2	
2	C_2	0	8	6		
3	C_3	15	2.4	a'		
4	C_4	17.2				
5	C_5					

$\sum a' = 54.96$
 $t_1 = 1$
 $A_1 = 54.96$

ような適応度という指標を用いる。その結果として、図-3 に示すような識別木を作成することができる。

以上の手法は、実際にはカテゴリ数が十数個、枝数が500程度の場合についてパーソナルコンピュータ程度の計算機で実時間ロボットビジョンシステムとして実現されている²³⁾。

5. ニューロ技術と融合したファジィ画像認識

近年ニューロ技術の浸透とともに、ニューロファジィ融合技術の応用が増加している。すなわち、ニューロ技術の特徴抽出や学習機能、ファジィ推論技術の判断決定機能の融合などを始めとして、画像認識応用が増えている。ここではそれらの中から、両眼立体視による画像認識応用²³⁾についてその概要を述べる。

処理過程は、図-4 に示すように三つの過程からなる。

前処理部では、2台の CCD カメラから入力された 512×512 画素の画像に対して、既存の画像処理や色ファジィ集合の概念を用いて、特徴抽出部で要求される品質の画像に変換する。ここでは RGB—HSV 変換を行い、その空間の上で人間の感覚量をファジィ集合で定式化して、ルール型ファジィ推論により特徴抽出を行っている。

特徴抽出部では、多層パーセプトロン型のニューラルネットワークを用いて輪郭線特徴の抽出を行い、抽出線分データ系列にファジィ論理を適用して特徴データの縮約を行う。さらに、縮約された左右画像の特徴データ系列を用いて線分分離を行い、対象物の輪郭線を得る。

照合部では、特徴抽出部で得られた出力と標準パターンとのファジィマッチングを行って、認識結果を得る。

具体的な実験結果としてピンの認識実験結果の一部を、図-5、図-6、および表-5 に示す。

6. ファジィ画像認識研究の動向

ファジィ画像認識の研究は、年々盛んになってきているが、現在の動向を知るために、最近の学

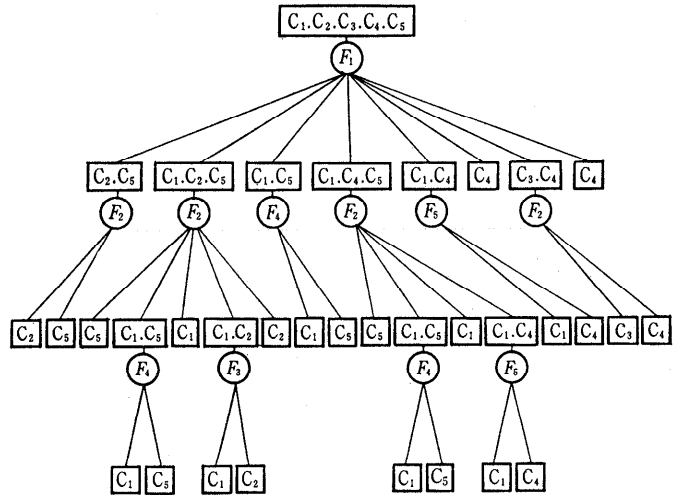


図-3 識別木の例

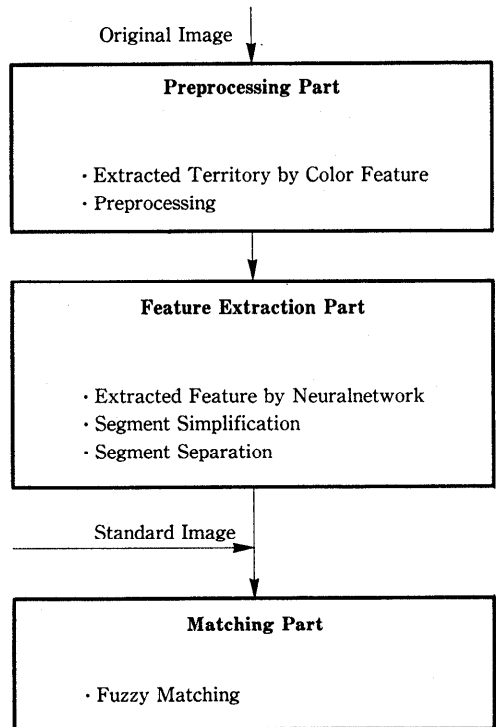


図-4 ファジィニューロ両眼立体視画像処理過程

会での発表のなかから、代表的と思われるものをいくつか紹介しよう。

まず、1992年3月にサンジェゴで開催された FUZZ-IEEE '92 からいくつか紹介する。(なお、これまでファジィ研究には冷淡であったアメリカでもようやくファジィ研究が活性化し、1993年から IEEE ではファジィシステムの論文集を出すことになった。FUZZ-IEEE '92 は IEEE 主催の本

格的な最初のファジィ国際会議であり、500人以上の参加者があり、盛況であった。）

● Eye-Hand Coordination Based on Fuzzy Vision Transducer (D. Stipanicev, M. Cedic; Univ. of Sprit)

ハンドアイシステムの座標決定をファジィ制御技術を利用して、効率的に行う。

● Fuzzy Geometry: An Overview (A. Rosenfeld: Univ. of Maryland)

ファジィ位相幾何学により隣接、分離、連結性、距離、凸性、細線化などの基本的な幾何学的説明をしている。20年ほど前からの自らの研究の総

括。

● Fuzzy Sets in Image Processing and Recognition (S. K. Pal, NASA JSC)

ファジィ画像処理では有名な著者が、これまでの成果を総括し、ファジィとニューロ、GAとの関連を述べた。

● Boundary Detection through Fuzzy Clustering (R. N. Dave, New Jersey Institute of Tech.)

ファジィクラスタリングにより平面局面などの境界部抽出をする手法を提示し、従来手法との比較を行った。

● Image Coding with Fuzzy Image Segmentation (S. G. Kong, B. Kosko, U. S. C L. A.)

ファジィルール集合により線画像の高圧縮 (50:1以上) 符号化を提案した。

● Multi-level Image Segmentation Using Fuzzy Clustering and Local Membership Variations Detection (E. Levert, V. Bombardier, M. Lamotte, J. Bremont, Univ. de Nancy I)

局所的メンバシップ変動とファジィクラスタリン

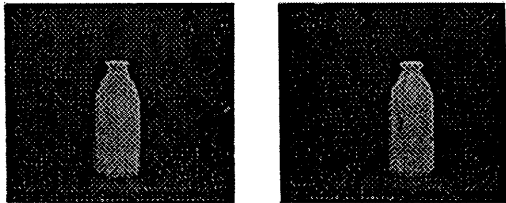


Image no. 1

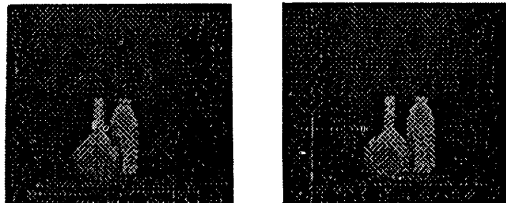


Image no. 7

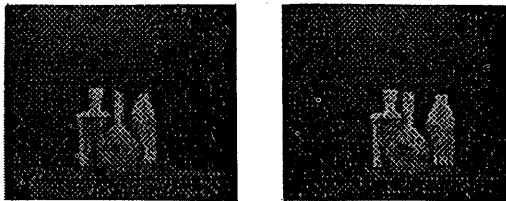


Image no. 9

Left Right

図-5 入力画像の一例

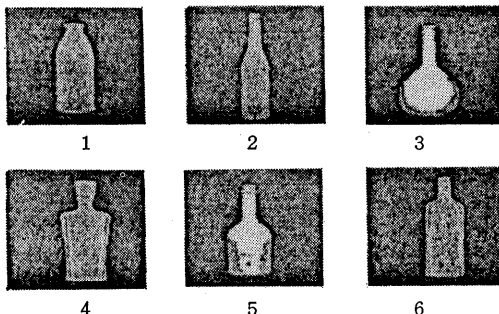
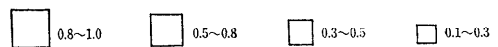


図-6 標本データ (カテゴリ)

表-5 認識結果

Category Images	1	2	3	4	5	6
(1)	□	■		■		■
(2)		□	■	■	■	
(3)			□	■	■	■
(4)				□		■
(5)		■	■		□	■
(6)				■		□
(7)			□	■	■	■
(8)	■	■	■		□	■
	■	■	■	■		□
(9)	■		□	■	■	■
	□			■	■	■
				□		■



グを用いて濃淡画像のセグメンテーション手法を示した。

次に、国内のファジィ関連の学会としては、日本ファジィ学会があり、毎年ファジィシステムシンポジウムを開いている。1992年5月に開かれた第8回ファジィシステムシンポジウムで発表された画像関連の発表を紹介しよう。

- 光学ファジィ演算による顔表情の類別法 (玉野和保, 広島工業大学)

ファジィ演算の工学的計算法により、泣き顔や笑い顔などの顔表情を瞬時に類別する方法を示した。

- 口形の多角形近似とファジィ類似度を用いた読唇 (平井浩司, 張偉京, 添田満, 古谷忠義, 黒須顕二, 九州工業大学)

口形をTVカメラで取り込み、画像処理を施し、口形の特徴を抽出して、ファジィ類似度を用いたパターン認識により母音の識別を行った。

- 画像中の対象物に注目した類似画検索システム (山崎久代, 赤堀裕志, 若見昇, 松下電産中研)

ユーザの検索要求をキー画像で表現し、キー画像と検索対象画像間で対象物ごとに照合を行って、類似度、比類似度を求め、それらを画像間の照合の証拠として類似画像検索を行うシステムを開発した。

- ファジィニューラルネット技術を用いた両眼立体視による画像認識 (廣田薫, 山内賢一, 村上順, 法政大学)

すでに述べた著者らの研究

- ファジィ論理を用いた人間のイメージに合った風景面の自動着色 (増井重弘, 寺野寿郎, 渡辺博明, 法政大学)

季節感および遠近、時刻の色彩イメージを自然言語を用いてファジィルール化し、ファジィ推論により色彩を生成し、無着色の風景面に着色を施すシステムを構築した。

- ファジィ推論を用いた画像データ二値化法 (堤康弘, 奥村肇, 前田匡, オムロン)

ファクス、コピー機などの画像処理装置の二値化処理において、対象画素の周囲の画素濃度を元にファジィ推論を用いて画像の種類を想定し、適切な二値化しきい値をリアルタイムで決定する方法を提示した。

- 印象言語を用いた顔画像検索システム (宮島耕治, 岩本啓, 中山万希志, 福嶋茂信, 糊田寿夫, Anca Ralescu, LIFE)

顔画像から顔の特徴を抽出し、その特徴を印象言語に変換する手法と検索条件を印象言語で表現した顔画像検索システムを述べた。

- 多次元メンバシップ関数によるパターン認識 (田中雅人, 山武ハネウエル)

多次元メンバシップ関数の数式表現を整理し、その応用として、文字形状を二次元メンバシップ関数の組合せで表現したテンプレートによるパターン認識について述べた。

- カラー画像を用いた視覚的質感判断 (石原成浩, 高木敏幸, 中西祥八郎, 東海大学)

材質感情を示す物体の反射特性をRGBカラー画像を用いて抽出し、RGB色空間の分布状態から幾何学的手法を用いて分布の形状を近似し、ファジィ推論を用いて物体の質感を判別するシステムを構築した。

7. おわりに

ファジィ画像パターン認識技術の現状をサーベイした。制御応用では多数の実績をもつファジィ技術の次の応用分野として有望視されている画像認識については、方法論が確立されたわけではないが、近年研究発表が急増している。今後の進展に期待をしたい。

参考文献

- 1) Zadeh, L. A.: Fuzzy Sets, Information and Control, Vol. 8, pp. 338-353 (1965).
- 2) Mamdani, E. H. and Assilian, S.: An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller, Int. J. of Man-Machine Studies, Vol. 7, pp. 1-13 (1974).
- 3) Ruspini, E. H.: A New Approach to Clustering Information and Control, Vol. 15, pp. 22-32 (1969).
- 4) Roubens, M.: Pattern Classification Problems and Fuzzy Sets, Int. J. of Fuzzy Sets and Systems, Vol. 1, pp. 239-253 (1978).
- 5) Bezdek, J. C.: A Convergence Theorem for the Fuzzy ISODATA Clustering Algorithms, IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol. PAMI-2, No. 1, pp. 1-8 (1980).
- 6) Bezdek, J. C.: Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press, New York (1981).
- 7) Sily, P. and Chen, C.S.: Fuzzy Logic for

- Handwritten Numeral Character Recognition, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. SMC-4, pp. 570-575 (1974).
- 8) Chang, R. L. P. and Pavlidis, T.: Fuzzy Decision Tree Algorithms, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. SMC-7, pp. 28-35 (1977).
 - 9) Dyer, C. R. and Rosenfeld, A.: Thinning Algorithms for Gray Scale Pictures, IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol. PAMI-1, pp. 88-89 (1979).
 - 10) Pal, S. K. and King, R. A.: Image Enhancement Using Smoothing with Fuzzy Sets, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. SMC-19, pp. 1276-1281 (1981).
 - 11) Bezdek, J. C. and Anderson, I. M.: An Application of the c-Varieties Clustering Algorithms to Polygonal Curve Fitting, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. SMC-15, pp. 637-641 (1985).
 - 12) Huntsberger, T. L., Rangarajan, C. and Jayaramamurthy, S. N.: Representation of Unvertainty in Computer Vision Using Fuzzy Sets, IEEE Trans. Comput., Vol. C-35, pp. 145-156 (1986).
 - 13) Pathak, A. and Pal, S. K.: Fuzzy Grammars in Syntactic Recognition of Skeletal Maturity from X-Rays, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. SMC-16, pp. 657-667 (1986).
 - 14) Tanaka, K. and Sugeno, M.: A Study on Subjective Evaluations of Printed Color Images, Int. J. of Approximate Reasoning, Vol. 5, pp. 213-222 (1991).
 - 15) Lee, S. C. and Lee, E. T.: Fuzzy Neural Networks, Mathematical Biosciences, Vol. 23, pp. 151-177 (1975).
 - 16) Keller, J. M. and Hunt, D. J.: Incorporating Fuzzy Membership Functions into the Perceptron Algorithms, IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intelligence, Vol. PAMI-7, pp. 693-699 (1985).
 - 17) Huntsberger, T. L. and Ajjimarangsee, P.: Parallel Self-Organizing Feature Maps for Unsupervised Pattern Recognition, Int. J. of General Systems, Vol. 16, pp. 357-379 (1990).
 - 18) Ruck, D. W., Rogers, S. K., Kabrisky, M., Oxley, M. E. and Suter, B. W.: The Multilayer Perceptron as an Approximation to a Bayes Optimal Discriminant Function, IEEE Trans. Neural Networks, Vol. 1, pp. 276-298 (1990).
 - 19) Keller, J. M. and Tahani, H.: Implementation of Conjunctive and Disjunctive Fuzzy Logic Rules with Neural Networks, Int. J. of Approximate Reasoning, Vol. 6, pp. 221-240 (1992).
 - 20) Bezdek, J. C. and Pal, S. K.: Fuzzy Models for Pattern Recognition, IEEE Press, New York (1992).
 - 21) Hirota, K. and Iwama, K.: Application of Modified FCM with Additional Data to Area Division of Images, Int. J. of Information Sciences, Vol. 45, pp. 213-230 (1988).
 - 22) Hirota, K., Arai, Y. and Hachisu, S.: Moving Mark Recognition and Moving Object Manipulation in Fuzzy Controlled Robot, Int. J. of Control Theory and Advanced Technology, Vol. 2, pp. 399-418 (1986).

(平成4年9月28日受付)



廣田 薫 (正会員)

1950年1月新潟生。1975年東工大電子工学科卒業。1979年東工大大学院博士課程修了。工学博士。現在法政大学教授(工学部システム制御工学科)、国際ファジィシステム学会副会長、日本ファジィ学会事業委員長、IEEE Trans on Fuzzy System エディタなど。最近の著書「だからファジィが面白い」(裳華房, 1993/5)