

解説



ファジィ推論エキスパートシステムの 現状と動向†

廣 田 薫††

1. はじめに

古くは Copernicus の地動説, 近世では Boole のブール論理, 最近では“人工知能”など, 当初は批判されたり無視されていたものが, 当事者の努力により, 一般に受け入れられ, しっかり根をおろすという事は, 世の常のようである。

ファジィ理論も提案されて22年ほどになる。当初, 実用化という点も含めて, 批判も多かったのであるが, ここ数年, 制御関連のエキスパートシステムを中心に, 産業レベルでの実用化事例数は数十件に急増している。本稿では, ファジィ理論の歴史的進展状況と, 理論の概略を最初に述べ, 次にエキスパートシステムにおける実用化事例を十数件紹介し, 著者らが開発してきたアームロボットの視覚認識とファジィ制御の概要を述べ, 最後に“ファジィコンピュータ”の構想なども含めた近未来の動向を述べる。

2. ファジィ集合論からファジィ推論へ

本章では, ファジィ理論の歴史的経緯を述べる。

ファジィ理論の起源は, カリフォルニア大学バークレイ校の L. A. Zadeh 教授が1965年に発表した論文“ファジィ集合”¹⁾にある。彼は, 現代制御の分野でも優れた研究者である。車の運転法を身につけようとする者が, ベテランから教示を受ける場合のマン・マシン・コミュニケーションを考えてみよう。交差点を右折しようとしているのに, 車速が大きすぎてハンドルのきり方が不足で, オーバーランしそうになったとしよう。すると, “もっと速度を落として, ハンドルを右に大きくきりなさい。”というような指示が出る。しかし, この指示には, “車速 20 km/時以下, ハンドルを右に 90 度”というような定量的な内容は含まれておらず, 定性的な“あいまい”な指示である。一般

に, 各種分野のエキスパートの知識は, このような定性的なものが中心である。速度が“速い”“遅い”, 角度が“大きい”“小さい”などは, 従来の2値論理に基づいた集合論にはなじまない。定性的なあいまい命題も扱えるような体系として, ファジィ集合論が提案されたのである。

定性的には明確に表現できるのであるが, 必ずしも物理定量的にははっきり表現できないような情報を記述するファジィ集合の考え方は, Zadeh の発表以来, 制御・人工知能・パターン認識・オペレーションズリサーチ・経済学・医学・心理学など, 多数の分野の研究者に影響を与えた。たとえば, エセックス大学の B. R. Gains (現在カルガリー大学) は, 1976年の論文²⁾で, 過去10年間に彼が集めたファジィの論文600編の年別発行数を図-1のように示している。(現在では, たとえば, 日本科学技術情報センターの文献データベースには, 毎月数十件から百数十件のファジィの文献が抄録されている。)

しかし, 通常の集合論の場合も, 集合論だけではなんの役にも立たず, それをもとにした解析学や幾何学代数学になってはじめて応用の可能性が出てくるのである。ファジィ集合論も, それだけでは定性的な“あいまい”知識の記述だけであり, 実用化研究とは結びつかなかった。また, 確率統計手法と比較して, ディア自体の批判にも根強いものがあり, ファジィ手法は, アピールすると同時に多数の批判もきかれた。たとえば, 1972年の第2回 Man and Computer 国際会議で, 統計的最小自乗推定のいわゆる Kalman フィルタの理論を, Zadeh より数年前に発表していた R. E. Kalman が, Zadeh との間で, “ファジィの存在意義”に関する感情的な討論をしたことは, よく知られている。

しかし, 人間は, 定性的な“あいまい”情報を, 直観や主観のいった経験知識をもとに柔軟に処理しており, 人間指向型の高度な知的情報処理機械を実現するためには, まじめに“あいまい”に取り組む必要が

† Recent Studies and Trends on Fuzzy Expert Systems by Kaoru HIROTA (Dept. of Instrument & Control Eng., College of Eng., Hosei Univ.).

†† 法政大学工学部計測制御専攻

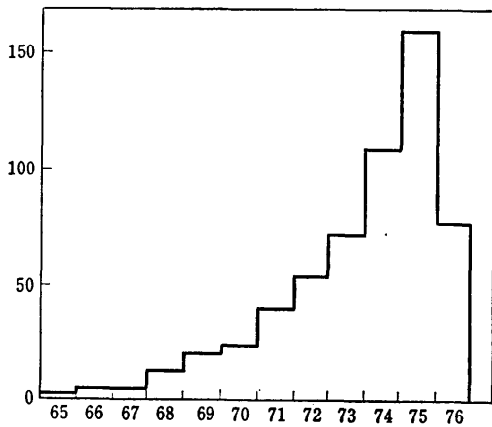


図-1 初期のファジィ論文数 (Gains⁹⁾)

あるということで、“あいまい工学”という考えが、寺野寿郎東工大教授（現在法政大）により提案された（1974年）⁹⁾。あいまい工学は、最終的には産業レベルでの実用化を目標とする工学であり、理論的ツールとして、ファジィを中心に、確率統計、エントロピ、多値論理、量子論理、CF、DS 測度など、幅広く取り込んでいこうというものである。日本のほかにも、北米、ヨーロッパ、中国（PRC）、ソ連と東欧（ブルガリアやポーランド）など世界各地で、“あいまい”あるいはファジィに関するワーキンググループが形成されていった。特に、中国では、約600名の会員からなる学会が組織されている。

こうした背景の中で、ファジィ実用化の見とおしが、1974年にロンドン大学クィーンメリー校のE.H. Mamdani 博士により、ファジィ推論という形で与えられた⁴⁾。彼は、スチームエンジンの制御の自動化を試みていたのであるが、PID 制御や最適制御を適用しても、良好な結果が得られなかった。そこで、ベテランオペレータの経験則を、たとえば、“A 点の圧力が高くて、B 点の温度がきわめて高ければ、バルブCをかなり大きく開けよ”というような規則（IF, THEN の通常のプロダクションルールでファジィ命題を許すものであり、ファジィプロダクションルールという）で記述し、センサなどで得られる情報とこの規則をつきあわせて（近似照合）制御操作を行う方法であり、最終的にはベテランオペレータと同等以上の性能を出すことに成功したのである。

1970年代後半には、このファジィ推論（fuzzy inference）（近似推論 approximate reasoning ということもある）を用いた実用化研究が進んだ。そして、産

業レベルでのファジィ推論実用化第1号として、デンマークの F.L. Smidth 社（世界最大のセメント会社）によるセメントキルンのファジィコントローラ⁵⁾が公開されたのが1980年である。80年代（特に、ここ3年くらい）4. で述べるように数十の実用化事例が発表され、急速に産業レベルでの応用が広まってきている。

また学問レベルでも、実用化の動きにあわせて、国際学会設立の動きが出てきて、1985年1月から IFSA (International Fuzzy Systems Association) (会長は、H. J. Zimmermann アーヘン工大教授)が発足している。1978年以後 North Holland 社が出版してきた論文誌 Fuzzy Sets and Systems は、IFSA の学会誌に昇格しており、世界各地のワーキンググループは、IFSA 地域支部として再編成されている。IFSA は、隔年で国際学会を開くことになっており、第1回はスペインのマヨルカ島で1985年7月に⁶⁾、第2回は IFSA 日本支部が中心になって、1987年7月に学習院大学で開催される。なお、IFSA 日本支部は、法人10社個人約400名で運営しており、年1回のシンポジウム、関東地区関西地区年4回程度の例会、4つの研究会など、精力的な活動を展開しつつある。

参考図書としては、ファジィ推論が一般化した1980年以後のものがよく、North Holland 社^{7)~9)}や西独 Verlag TÜV の ISR (Interdisciplinary Systems Research) のシリーズ本など多数ある。国内で最近のものとしては、10)~12) などがある。

3. ファジィ推論とは

本章では、ファジィ理論の概要を、ファジィ集合論、各種あいまい測度、ファジィ推論法の順に述べる。

3.1 ファジィ集合論

扱うべき対象物全体を X 、その各要素を x と記すことにする。 X は、全体空間 (universe of discourse, total space) とか台集合 (support set) と呼ばれる。(たとえば、車速の制御なら $[0, 180]$ km/h の実数区間、人事評価ならその会社の社員全員、などが X の例である。)

素朴集合論の立場で、 X 上の通常集合 A は、特性関数 χ_A

$$\chi_A: X \ni x \rightarrow \chi_A(x) \in \{0, 1\} \quad (1)$$

で定義できる。対象 x が A の特性を完全に満たすとき $\chi_A(x)$ は1を、逆のときは0をとる。 $\{0, 1\}$ の2

値論理が基本である。

しかし、性質の有無を2値的にはっきりできぬ場合を積極的に評価するために、真理値の {0, 1} を一般化して L と記すことにすれば、 X 上のファジィ集合 A は

$$m_A: X \ni x \mapsto m_A(x) \in L \quad (2)$$

なるメンバシップ関数で定義される。

Zadeh は最初の論文¹⁾で、 $L=[0, 1]$ とした。現在でも、計算機の内部処理の段階では、本質的に $[0, 1]$ を使うことが多い。しかし、エキスパートの知識表現、マン・マシン・コミュニケーションの段階では、数値ではなく、言葉（それを言語変数 linguistic variable という）で表すほうがふつうである。たとえば、 $L=\{\text{False, Almost F, Don't Know, Almost T, True}\}$ などをはじめとして、種々の言語変数が使われる。さらに、理論としては、 L を一般の束 (L ファジィ集合¹³⁾), $[0, 1]$ 上の $[0, 1]$ 値写像 (type II ファジィ集合¹⁴⁾), $[0, 1]$ の確率変数 (確率集合¹⁶⁾) などとする拡張が多数行われており、実用化応用も試みられつつある。ファジィの要点は、人間の知識で2値の論理で処理しきれないあいまいさを、積極的に表に出していることである。しかし、議論の発散を防ぐため、現時点で計算機内部処理で本質的に使われている $L=[0, 1]$ に限定して、以下の議論を進める。

X 上のファジィ集合全体 (各々のファジィ集合は、そのラベル A, B, \dots とメンバシップ関数 $m_A(\cdot), m_B(\cdot), \dots$ を混同して使うことにする) を、 $P(X)$ と記すことにする。 $P(X)$ では、評価の良し悪しに関係した順序構造が重要になる。 $L=[0, 1]$ としていることに注意して、二つのファジィ集合 A, B 間の包含関係 $A \subset B$ を、

$$m_A(x) \leq m_B(x) \text{ for } \forall x \in X \quad (3)$$

により定義する。これは、 $P(X)$ において、反射・反対称・推移の3性質をみたし、 $(P(X), \subset)$ は半順序集合 (POSET) となる。しかも、最大元 $X(m_X(x)=1)$ と最小元 $\phi(m_\phi(x)=0)$ をもつ。

次に、 $P(X)$ における各種演算を考えるのであるが、通常の集合論 ($L=\{0, 1\}$ と思えばよい) と同様に、各点ごとの定義をするので、 x を固定して考えればよい。したがって、 L における単項演算、2項演算を考える。

まず単項演算では、2値の NOT 演算 (0 と 1 の反転) のファジィ拡張として、ファジィ否定がある。これは、三つの公理で定義される。

$$\cdot \textcircled{0}: [0, 1] \rightarrow [0, 1] \quad (4)$$

$$N1) \textcircled{0} \textcircled{0} = 1 \quad (5)$$

$$N2) (m \textcircled{0}) \textcircled{0} = m \quad (6)$$

$$N3) m_1 < m_2 \Rightarrow m_1 \textcircled{0} > m_2 \textcircled{0} \quad (7)$$

それぞれ、“0は否定で1” “2重否定でもとに戻る” “評価の順序は否定で反転する” という物理的意味をもつ。ファジィ否定の代表演算は

$$m \textcircled{0} = 1 - m \quad (8)$$

であり、これ以外にも多数作れる。(8)より、ファジィ集合 A の補ファジィ集合 A^c が

$$m_{A^c}(x) = 1 - m_A(x) \quad \forall x \in X \quad (9)$$

で定義される。2値の論理では、単項演算は $4(=2^2)$ 通りしか存在しないが、ファジィ化すると無限に多く作れる。しかし、実用化の観点からは、(8)または(9)のほかに、 A の α 巾 A^α

$$m_{A^\alpha}(x) = \{m_A(x)\}^\alpha \quad (10)$$

の理解程度で十分である。ここで α は正のパラメータで、実用レベルでは、4, 2, 1/2, 1/4 の4通りをよく使う。(それぞれ、very very, very, some what, very little などの言語を対応させて用いる。) 通常の集合論では、 $A^\alpha = A$ となり、定義は可能だが無意味な演算である。

次に、2項演算は、AND と OR のファジィ化が基本的であり、それぞれ t ノルム、 s ノルムと呼ばれている。 t ノルムは、

$$\textcircled{t}: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1] \quad (11)$$

$$T1) m \textcircled{t} 1 = m, \quad m \textcircled{t} 0 = 0 \quad (12)$$

$$T2) m_1 \leq m_2 \Rightarrow m_1 \textcircled{t} m_3 \leq m_2 \textcircled{t} m_3 \quad (13)$$

$$T3) m_1 \textcircled{t} m_2 = m_2 \textcircled{t} m_1 \quad (14)$$

$$T4) m_1 \textcircled{t} (m_2 \textcircled{t} m_3) = (m_1 \textcircled{t} m_2) \textcircled{t} m_3 \quad (15)$$

の、境界条件、順序保存、交換律、結合律をみたす演算として定義される。一方、 s ノルムは、境界条件

$$S1) m \textcircled{s} 1 = 1, \quad m \textcircled{s} 0 = m \quad (16)$$

が異なるほかは、 t ノルムと同じ公理で定義される。 t ノルムの具体例としては、

$$\text{論理積} \quad m_1 \wedge m_2 = \text{Min} \{m_1, m_2\} \quad (17)$$

$$\text{代数積} \quad m_1 \cdot m_2 = m_1 \times m_2 \quad (18)$$

$$\text{限界積} \quad m_1 \textcircled{0} m_2 = \text{Max} \{m_1 + m_2 - 1, 0\} \quad (19)$$

$$\text{激烈積} \quad m_1 \wedge m_2 = \begin{cases} m_1 & m_2 = 1 \\ m_2 & m_1 = 1 \\ 0 & m_1, m_2 < 1 \end{cases} \quad (20)$$

などが、 s ノルムとしては、

$$\text{論理和} \quad m_1 \vee m_2 = \text{Max} \{m_1, m_2\} \quad (21)$$

$$\text{代数和} \quad m_1 + m_2 = m_1 + m_2 - m_1 \times m_2 \quad (22)$$

$$\text{限界和 } m_1 \oplus m_2 = \text{Min} \{m_1 + m_2, 1\} \quad (23)$$

$$\text{激烈和 } m_1 \vee m_2 = \begin{cases} m_1 & m_2 = 0 \\ m_2 & m_1 = 0 \\ 1 & m_1, m_2 > 0 \end{cases} \quad (24)$$

などが、実用レベルでよく使われるが、これ以外にも無限に多く作れる。なお、(17)~(24)には

$$\wedge \leq \odot \leq \cdot \leq \wedge \leq \vee \leq + \leq \oplus \leq \vee \quad (25)$$

なる順序関係が成立し、すべての t ノルムは \wedge と \wedge の間に、すべての s ノルムは \vee と \vee の間に存在することも示せる。AND と OR の拡張以外にも、差 $m_1 - m_2$ 、絶対差 $|m_1 - m_2|$ (これは EXOR の拡張でもある) は、実用レベルで多用される。また、2値では定義不可能だが、荷重平均評価としてファジィ実用化研究で多用されるものに、 $[0, 1]$ パラメータ λ を用いた λ 和 $\lambda m_1 + (1 - \lambda)m_2$ がある。実用的には、2項演算は、以上 11 演算の理解で十分であろう。

なお、ファジィ否定②、 t ノルム①、 s ノルム③の間には、ドモルガンの法則をファジィ化した

$$\text{FD1)} (m_1 \otimes (t m_2 \otimes)) \otimes = m_1 \otimes m_2 \quad (26)$$

または、これと等価な

$$\text{FD1')} (m_1 \otimes \otimes m_2 \otimes) \otimes = m_1 \otimes m_2 \quad (27)$$

の関係の成立を要請する。(26)または(27)(結局両方)が成立するとき、②のもとで①と③は互いに双対的であるという。②を(8)としたとき、(17)と(21)、(18)と(22)、(19)と(23)、(20)と(24)は、互いに双対的である。これらの双対組の中でも、もっとも基本的なファジィ演算は、(8)(17)(21)である。それは、これらの三つが、“D. K.=0.5を中心とした反転評価”、“悪いほうの評価”、“良いほうの評価”と物理的意味あいの点でわかりやすいように、 $([0, 1], \leq, 1 - \cdot, \wedge, \vee)$ が完備擬ブール代数をなし、通常の2値の $(\{0, 1\}, \leq, \text{NOT}, \text{AND}, \text{OR})$ が完備ブール代数をなすのにきわめて近いからである。そのために、ファジィ集合算としては、積演算 $A \cap B$ と和演算 $A \cup B$ を、それぞれ(17)、(21)をもとにして

$$m_{A \cap B}(x) = m_A(x) \wedge m_B(x) \quad (28)$$

$$m_{A \cup B}(x) = m_A(x) \vee m_B(x) \quad (29)$$

で定義している。なお、2値の論理とファジィのそれとの違いは、相補律の成立 ($A \cap A^c = \phi$, $A \cup A^c = X$) 不成立 (ファジィでは $A \cap A^c \neq \phi$, $A \cup A^c \subset X$) である。2値では、一方が否定されれば状態は確定するが、ファジィではあいまい状態が多数あって確定しない。したがって、 A と A^c のみで全体を相補うことは、ファジィでは無理と考えれば、相補律の不成立は

当然ともいえる。しかし、これ以外は、通常の2値論理の性質がすべて保存されており、ハード化を行う場合の回路の単純化などで、その性質の良さが大きく貢献する。

3.2 各種あいまい測度

“あいまいさ”を数値定量化するときの尺度、すなわち“あいまい測度”として、ファジィ理論でも可能性測度¹⁹⁾やファジィ測度¹⁸⁾などがよく用いられている。これらは、伝統的なあいまい測度である確率測度や、エキスパートシステムで最近よく使われる CF や DS 測度とも密接な関連がある。ここでは、測度論の観点から、これらの各種あいまい測度の相互関係を述べる。

最初に、もっとも古くから用いられているあいまい測度である確率測度を整理して述べる。

大学初年級で学ぶ、いわゆる古典確率論は、1812年に Laplace により完成されている。それを理論的に整備したのが、測度論的確率論である。それ以上分解できぬ事象 (試行により得られる結果) すなわち根元事象の全体を全事象と呼び Ω と記す。 Ω の巾集合 2^Ω の部分族 \mathcal{B} のうちで、空事象を含み、余事象と可算無限和事象について閉じているものを完全加法族という。 \mathcal{B} 上で完全加法性をみたす全測度 1 の測度 P が確率測度であり、 (Ω, \mathcal{B}, P) が確率空間である。特に、すべての事象の確率を考えかつ有限操作にのみ限定すれば、 Ω 上の確率測度 P は、

$$P: 2^\Omega \rightarrow [0, 1] \quad (30)$$

$$P.1) P(\Omega) = 1 \quad (31)$$

$$P.2) E \cap F = \phi \Rightarrow P(E \cup F) = P(E) + P(F) \quad (32)$$

で、定義される。すると、

$$P(E \cup F) = P(E) + P(F) - P(E \cap F) \quad (33)$$

$$P(E) + P(E^c) = 1 \quad (34)$$

など、よく知られた関係式が成立する。

しかし、(34)より、ある事象 E の起こる確率と起こらぬ確率の和が、全体確率の1になるが、それが人間の評価が関与する場面では、必ずしも好ましくない。どちらともいえぬあいまい評価も考慮したいからである。そこで、Shortliffe は、確信値 MB と反確信値 MD を独立な $[0, 1]$ 評価値で与え、その差

$$\text{CF} = \text{MB} - \text{MD} \quad (35)$$

で、CF (certainty factor) を定義した¹⁶⁾。CF は、MYCIN など良い結果を得て、多くのエキスパートシステムで導入されつつあるが、工学的な直観的方法で定義されており、あまり理論的裏付けをもったもの

ではない。

さて、確率をもとにしたあいまい測度の一つに、Shannon が導入したエントロピ¹⁷⁾がある。n 個の事象の生起確率を $\{p_i\}_{i=1}^n$ とすると、そのエントロピは

$$h(p_1, p_2, \dots, p_n) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (36)$$

で定義される。通信路容量の計算などで多用されるが、あくまでも確率概念の副産物である。

次に、菅野道夫東工大教授により提案されたファジィ測度¹⁸⁾について、有限操作に限定して説明する。Q 上のファジィ測度 μ は、

$$\mu: 2^Q \rightarrow [0, 1] \quad (37)$$

$$F1) \mu(\phi) = 0 \quad (38)$$

$$F2) \mu(Q) = 1 \quad (39)$$

$$F3) E \subset F \Rightarrow \mu(E) \leq \mu(F) \quad (40)$$

なる写像で定義される。これは、

$$\mu(E \cap F) \geq \text{Max} \{ \mu(E), \mu(F) \} \quad (41)$$

$$\mu(E) + \mu(E^c) \in [0, 2] \quad (42)$$

などの性質をみとす。また菅野は、 λ を $(-1, \infty)$ パラメータとしてファジィ測定の特別なもの g_λ 測度 μ を

$$G1) \mu(Q) = 1 \quad (43)$$

$$G2) E \cap F = \phi \Rightarrow \mu(E \cup F) = \mu(E) + \mu(F) + \lambda \mu(E) \mu(F) \quad (44)$$

で定義している。 λ の選び方で、確率概念と人間の直感のギャップをうめることも可能である。

一方、Zadeh は、確率と独立なあいまい測度として、可能性測度を提案している¹⁹⁾。その整理した形が、Nguyen による定義²⁰⁾で、可能性測度 P は、

$$P: 2^Q \rightarrow [0, 1] \quad (45)$$

$$\text{Pos } 1) P(\phi) = 0 \quad (46)$$

$$\text{Pos } 2) P(Q) = 1 \quad (47)$$

$$\text{Pos } 3) P(E \cup F) = \text{Max} \{ P(E), P(F) \} \quad (48)$$

で定義される。

このほかに、CF を理論的に整備した形ともみれるものに、Dempster²¹⁾ と Shafer²²⁾ によるあいまい測度 (DS 測度) がある。それは、まず

$$\text{BP } 1) m(\phi) = 0 \quad (49)$$

$$\text{BP } 2) \sum m(E) = 1 \quad (50)$$

の二つの公理をみとす基本確率 m を定義し、(m はすべての事象に割りふる必要はないことに注意)、確信度 μ_*

$$\mu_*(E) = \sum_{F \subset E} m(F) \quad (51)$$

および有望度 μ^*

$$\mu^*(E) = \sum_{E \cap F \neq \phi} m(F) \quad (52)$$

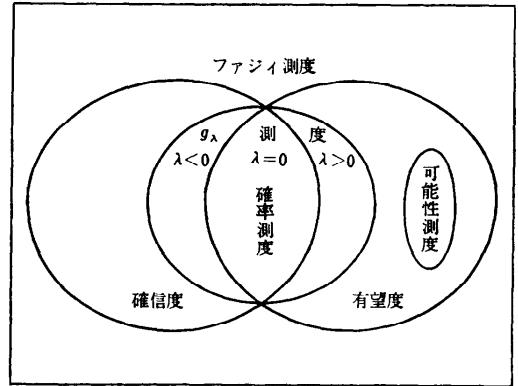


図-2 各種あいまい測度の相互関係

の二つの測度で定義されている。

以上、現在よく使われるあいまい測度を要約して述べたが、概念の相互関係は図-2 のようになる²³⁾。ファジィ測度は、かなり一般化された概念 (それが良い悪いは別問題で、適用場面による。) である。

3.3 ファジィ推論法

あいまい工学的手法が産業レベルで成功事例を多数出すようになったが、その基礎になるのがファジィ推論法である。これは、エキスパートシステムで用いられている (2 値の) 推論手法を、あいまい情報が扱えるように機能拡張したものであり、1970 年ころから、Zadeh²⁴⁾ や Mamdani²⁵⁾ をはじめとする多数の研究者により研究されている。したがって、手法も詳しく分類すると 100 種類以上になり、現在も進展中である。

そのため、まだ理論的に統一して整理した体系にはなっていない。あいまい情報を言語表現で扱う間接法の研究も進んでいるが、実用レベルでは [0, 1] であいまいさを表現する直接法が多用されている。その中でも特に、(実用化の点で) 重要なのが、

- ・ファジィプロダクションルールによる前向き推論
- ・ファジィ関係による後向き推論

の二つであり、ここではこの二つに限定して述べる。

ファジィプロダクションルールによるファジィ推論は、制御エキスパートシステムで多用されている。IF ~ THEN... の規則で、前提条件 ~ と結果... があいまい命題で表現されるものを、ファジィプロダクションルールという。(たとえば、IF “温度がかなり高く” かつ “水位が低く” かつ “圧力がきわめて高い” THEN “バルブ A をかなり閉めよ” かつ “バルブ B を少し開け” などがその例で、・部がファジィ表現である。これらのファジィ表現を、実際にたとえばメンバシップ

ブ関数でどう表現するかは種々検討されているが、実用的には三角型のメンバシップ関数で表現し、実験をやりながら頂点の位置と台集合のひろがり幅を修正する方法などがよく用いられている。) エキスパートの知識を、ファジィプロダクションルールの集合で与えるのであるが、ファジィ表現が許されることで、エキスパートの経験や直感が抵抗感なく表現でき、規則数の低下、したがってシステム構築の容易性にもつながるといったメリットをもつ。ただし、知識獲得からルールの精製を行い良好な最終結果にもっていくには、現状ではファジィに精通した KE に頼らざるを得ない。

典型的な推論の概要を、もっとも単純化して図示すると、図-3 のようになる。現在のファジィ情報 A' を各前提条件 A_i と照合し (近似照合)、照合の程度に応じた出力 B'_i を得る。すべての規則 ($i=1\sim N$) の出力 B'_i を合成して、最終的な (あいまい) 出力 B'

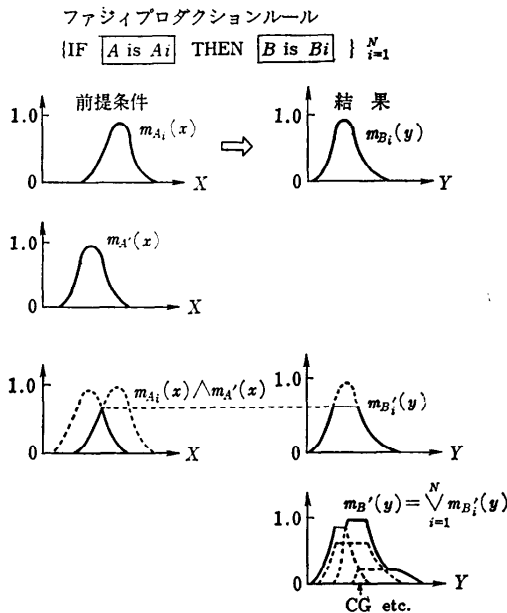


図-3 ファジィプロダクションルールによる前向きファジィ推論

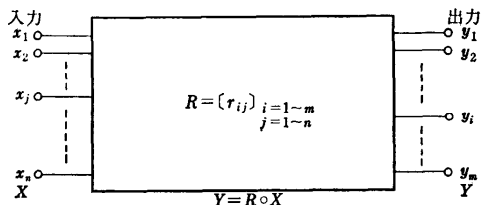


図-4 ファジィ関係によるファジィ推論

を得る。 B' から重心 (CG) をとるなどの方法で具体的な応答をすることになる。本質的に並列処理であるため、2値推論での規則の競合解消などの工夫は不必要である。

ファジィ関係を用いたファジィ推論は、診断のエキスパートシステムなどで多用される。図-4 を用いて概要を述べよう。入力と出力の台集合 X, Y がともに有限の場合を考える。入力は原因、出力は結果のファジィ状態を表す。たとえば、エンジンの故障診断で、 x_1 は“オイルの劣化”、 x_2 は“ピストンリングの摩耗”などを、 y_1 は“異常な振動”を、 y_2 は“排気の色不良”などを考えればよい。すると、 X の各要素 x_j と Y の各要素 y_i には、なんらかの因果関係 r_{ij} があると想定できる。ここでは、 x_j, y_i, r_{ij} などを $[0, 1]$ 実数値で表現する直接法のみを考える。 r_{ij} をまとめた行列 R は、ファジィ関係行列という。以上の状況を

$$Y = R \circ X \tag{53}$$

という式 (これをファジィ関係方程式という) で表す。ここで、演算 \circ はファジィ推論合成規則と呼ばれ、システムのモデルに応じて種々のものが使われる。もっとも多用されるのは Max Min 演算であり、成分表示で

$$y_i = \bigvee_{j=1}^n (r_{ij} \wedge x_j) \quad i=1\sim m \tag{54}$$

と記せる。故障診断や医療診断などのエキスパートシステムでは、数種類のファジィ推論合成規則のシステムモデルを考え、それらを縦列あるいは並列に接続した因果モデルを想定する。そして、 R をエキスパートの知識で同定しておいて、データとして与えられる出力 Y から、入力 X を推定して求める後向き推論を行う。具体的解法は、Sanchez²⁵⁾ や塚本²⁶⁾ はじめとする多くの文献に譲る。

4. 最近の内外のファジィ実用化研究事例

ファジィエキスパートシステム (エキスパートを代行し、ファジィ推論を基本に構築されたシステム) の産業レベルでの実用化第1号は、2. で述べたように Smidth 社のセメントキルンのコントローラ⁵⁾ である。これは、現在では西独、米国、ギリシャなど世界各地のセメントキルンで稼働している。1980 年以来現在まで、(特にここ3年くらい) 急速にファジィ実用化が立ち上がり、開発中のものも含めると 50 件程度の事例数になる。しかし、現時点では商品化発表が終了

しておらず、残念ながらここで紹介できぬ優れた事例も多数ある。本章では、現時点で紹介可能なものに限って、項目列挙の形で述べることにする。もう少し詳しくは、たとえば 11), 27) などがある。

商品化された計算機ソフトとしてのファジィエキスパートシステムは、米国で 2 例ある。Decision Products 社は、ファジィ推論意思決定支援システム Reveal を、1983 年に市場に出した²⁸⁾。DEC 社のコンピュータの性能を高める目的で VTA (Vax Tuning Assistant) として用いられ、全国ネットのレストランの経営を支援するシステムとして用いられ、好評を博し、1985 年に Reveal 開発部門は Mcdonnell Douglas 社に移籍し、1986 年末まで販売が続いた。(米国の AI ビジネスは、ベンチャでスタートし、成功して大手が買収するケースが多い。) 次に、アラバマ州の Kemp-Carraway 心臓病研究所では、1986 年から OPS 5 をファジィ拡張したファジィ ES 構築用ツール FLOPS を市場に出した²⁹⁾。メモリマップに工夫をし、ファジィ推論特有の並列処理を可能にしている。IBM 社の PC-XT/AT 用として現在 500 ドルで市場に出されているが、VAX スーパーミニ用や IBM メインフレーム用も開発中である。

GE (米国) は、ファジィ推論による小型飛行機の計器着陸システムを 1983 年に開発し³⁰⁾、1986 年には軍関係のファジィ推論によるエキスパートシステムを完成している。

ファジィ推論は、通常の計算機のプログラムで実現可能だが、処理速度の点ではハード化が望ましい。AT & T の Bell 研では、図-3 のファジィ推論をハードで実現したファジィ推論 VLSI チップを 1984 年に開発している³¹⁾。AI チップの走りであり、現在は商品化の見とおもつき、IBMPC のボードに組み込んでファジィ推論機能の向上や、NASA のスペースシャトル計画などにも導入されている。ハード化の話題は、6. でもう少し詳しく述べる。

中国 (PRC) では、上海の気象学者のグループが、インドゴムの最適栽培地決定のファジィモデルを作成し、農業のファジィ ES を作成したり (1984)、針や灸の漢方療法の ES を開発したり (1985)³²⁾、多数の事例がある。

ブルガリアの科学アカデミでは、溶接物の継ぎ目の検査や発酵醸造過程³³⁾のファジィ制御を実現している。

このほかにも、ベルギーの船の操縦のファジィ制御

(1983) など多数の例があるが、国内の事例紹介に移ろう。

日立製作所では、予見ファジィ制御方式による列車の自動運転システムを開発し³⁴⁾、仙台の市営地下鉄で営業運転される。また、同手法をコンテナクレーンの制御システムに応用し、フィールドテストを終了している³⁵⁾。

富士電機では、浄水場薬品注入制御に応用したり³⁶⁾、1985 年秋には汎用ファジィコントローラを市場に出し、現在国内外各地で稼働中である。

(株)リコーの中央研究所では、ファジィによる音声認識研究を進め³⁷⁾、1986 年には、不特定話者離散発声単語認識装置 RV 100 を市場に出している。

このほかにも、油圧システムの自動診断 (新日鉄八幡製鉄所)、鉄鋼の冷延プロセス制御 (同)³⁸⁾、原子炉プラント内の異常診断 (間組技術研究所)³⁹⁾、コンクリートのひび割れ検出診断 (同)、アーク溶接ロボットの制御 (九工大と三菱重工)⁴⁰⁾、自動車の定速走行制御 (九工大⁴¹⁾ ほか)、学習機能つきファジィコントローラ (日揮)⁴²⁾、ディーゼルエンジン燃料噴射時期制御 (運輸省船航技研)、船の最適航路決定 (同)、カタログ情報のファジィ文献検索 (アンドールシステムサポート)、医療診断ファジィエキスパートシステム (立石電機中央研究所)⁴³⁾、ファジィ論理・推論 IC (熊本大)⁴⁴⁾、自律型移動車の障害物回避制御 (電通大)⁴⁵⁾、個人特徴自動識別システム開発の調査研究 (科学警察研究所)、をはじめとした水面下の動きが多数あり、今後 2~3 年以内にさらに数十例程度の成功事例が期待されている。

5. アームロボットの知的制御

ファジィ推論適用事例として、産業用ラインでの組み立て作業などを考慮して開発した視覚付きアームロボットについて紹介する^{46), 47)}。可変速度のベルトコンベア上を流れてくる物体やマークを識別し、指示されたものであれば、その物体を把握したり、把握した物体を指定されたマーク上に設置するシステムである。全体のフローは、図-5 に示すように、(大きさと形状の) 認識部と (物体またはマークの移動速度とアームからの距離情報からアームの移動先をファジィ推論で求めて動作させる) 制御部の二つに大別される。CCD カメラの画像情報から大きさと形状の認識および移動速度と距離の情報を実時間で求める必要がある。このような FA システムの画像処理では、画

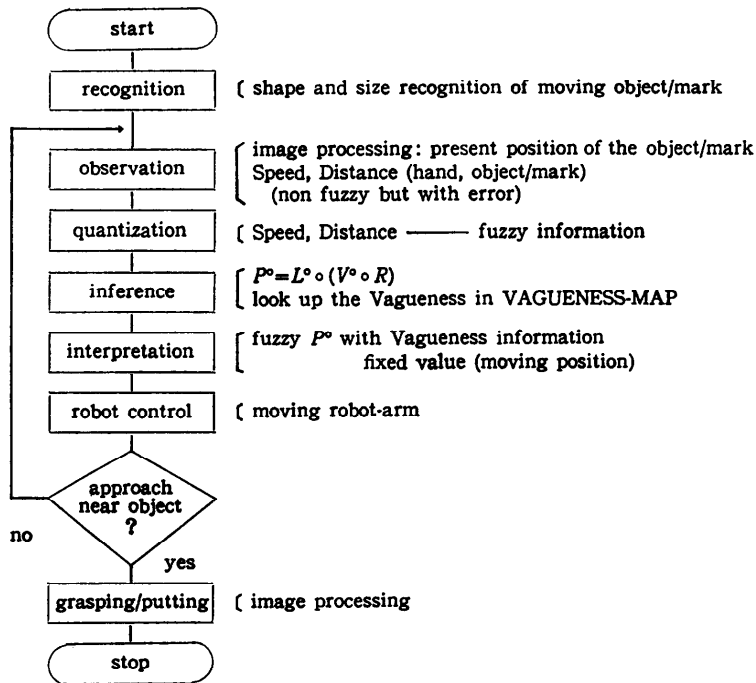


図-5 視覚付きアームロボットのファジィ制御

像専用ハードなどを投入してなんとか目標性能を達成するのが通例である。しかし、ここではファジィ手法を有効に利用し、5MHzクロックの16ビットパソコン1台のみで、ベルトコンベア上最高5cm/秒で移動する十数種類の物体やマークを認識し、把握や設置動作までをカバーするシステムにまとめあげた。ファジィ手法は、省力化技術としてもきわめて有効なのである。

認識部は、識別木を用いてアセンブラでコーディングし、長方形、円、H形など12種類の立体形状を大中小の大きさに平均1秒弱（ベルト移動距離で4cm程度）で識別する。物体のかげによる画素の欠落、カメラの視角によって物体側面が写ることなどによる形状変化などを、特徴量のファジィ分布として吸収し、補正の時間をなしにして高速化している。また、個々の特徴量も適当に手ぬきして高速計算をしたファジィ情報であるが、複数の特徴量を計算時間や出現頻度を考慮して最適な節点にはりつけた識別木を用いることにより、総合的に十分な性能をひき出している。

コンベア上の物体/マークが指示された形状および大きさであると判明したら、ロボットアームを移動してハンドによりそれらを把握/設置する。この制御

部は、

$$\text{IF } V \text{ is } V_i \ \& \ L \text{ is } L_j \ \text{THEN } P \text{ is } P_k \quad (55)$$

のファジィプロダクションルールによる前向き推論で動作する。二つの前件ファジィ命題は、それぞれ物体/マークの移動速度 V （低速から高速まで4ファジィラベルで表現）およびそれらのハンド先からの距離 L （近くから遠くまで6ファジィラベルで表現）に関するものである。 V と L は、CCDカメラから画像処理で求める。5MHzクロック16ビットパソコンのアセンブラプログラムで0.2秒程度で求めるため、正確な計測は無理であり、ほどほどに正しいファジィ情報である。この二つの情報をもとに、ファジィ推論でハンド移動先 P （近くから遠くまでの7ファジィラベルで表現）を求め、CGなどで具体的移動先を決める。それをもとに、ロボットアームのDCサーボモータの回転パラメータを算出し移動する。把握/設置の動作に十分な接近でなければ、再び対象物の観測に戻る。通常はこのループ（1回のループの実行時間は、アーム移動量の大小にもよるが0.7~1.1秒程度）を数回反復して目的動作に移る。ハンドの軌跡は必ずしも最適なものではないが、ほどほどに良いものであり、その見返りとして、システムの省力化が実現されている。

6. ファジィコンピュータ

あいまいな情報（なんらかの理由で厳密に正しいことは保証されないが、実際の行動を起こすには十分な、ほどほどに正しい情報）を駆使して、おおむね良好な結果（まれには誤りや失敗もあるが、ほどほどに良い結果）を得るといふファジィ推論のコンセプトは、まさにわれわれ人間の行動パターンに符合する。ファジィ推論をエキスパートシステムに適用して良好な結果が多数出てきているのも、その意味では当然なことといえよう。そのファジィ推論を実際にインプリメントしようとするれば、現在主流のノイマン型計算機を用いても、ソフトウェアだけでなんとかカバーできる。しかし、それではかなりまわりくどい処理をやることになり、無駄が多い。それでも、地下鉄の自動運転やコンベア作業のロボット程度の速度であれば、十分追従している。けれども、戦闘機やピンポンロボットなど1秒に数千回以上のファジィ推論が要求される場面では、やはり直接処理をするハードウェアが望まれる。こうしてファジィコンピュータの考え方が登場したのである。

現在、ファジィコンピュータは、個別技術プロトタイプモデルの試作段階まできている。基本的にはファジィ推論エンジンとファジィメモリで構成される。前者については、図-3のファジィ推論VLSIチップが、Bell研で開発されたこと³¹⁾を4.で述べたが、これはまもなくRockwell社から販売される予定である。デジタル近似とCMOS技術で構成されており、前提4命題、結果2命題の16個のルールを1秒間に25万回並列推論する能力をもつ。ほかに、熊本大学の山川助教授は、アナログ技術も併用して、1桁上の処理速度をもつ推論チップを試作している⁴⁰⁾。また、ファジィ情報を記憶するファジィメモリの試作⁴⁹⁾や研究⁴⁹⁾も進みつつある。これらを有機的に組みあげたファジィコンピュータは、現在米国で市場に出つつあるLispチップなどのAIチップの標準アーキテクチャが固まり、AIコンピュータとして製品化されるころまでには実現されるべく開発努力が続けられている。

7. おわりに

ファジィ理論の基礎と、産業レベルでの適用事例、近未来の研究開発動向を解説した。

実用化の中心は、これまで制御システムが主流であったが、AIやパターン認識、ハード化技術などに

広がりつつある。ほかにも、本稿では述べなかったがOR、土木建築、経済学、心理学などへの応用もかなり進んでいる。もし身近に、人間のエキスパートならきわめてうまくやっているのだが、従来方式の機械化技術ではいま一つというようなテーマがあったら、ファジィ推論法の適用を試みる価値があるものとする。

理論的には、論理や測度の観点からの整備はかなり進んでいるが、推論レベルでの統一理論は、実用化の進展とともに今後の課題として残っている。

参考文献

- 1) Zadeh, L. A.: Fuzzy Sets, *Inf. Control*, Vol. 8, pp. 338-353 (1965).
- 2) Gains, B. R.: *Foundation of Fuzzy Reasoning*, *Int. J. of Man Mach. Stud.*, Vol. 8, pp. 623-668 (1976).
- 3) 寺野: あいまい工学の提唱, *日本機械学会誌*, Vol. 77-662, pp. 38-43 (1974, 1月号).
- 4) Mamdani, E. H. and Assilian, S.: An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller, *Int. J. Man-Mach. Stud.*, Vol. 7, pp. 1-13 (1974).
- 5) Holmblad, L. P. and Ostergaard, J. J.: Control of Cement Kiln by Fuzzy Logic, in *Fuzzy Information and Decision Processes* (Gupta, M. M., Sanchez, E. eds), North-Holland, pp. 389-399 (1982).
- 6) 廣田: 国際ファジィシステム学会第1回会議, *計測と制御*, Vol. 24, No. 12, pp. 83-84 (1985, 12月).
- 7) Gupta, M. M. and Sanchez, E.: *Approximate Reasoning in Decision Analysis*, North-Holland (1982).
- 8) Gupta, M. M. and Sanchez, E.: *Fuzzy Information and Decision Processes*, North-Holland (1982).
- 9) Gupta, M. M., Kandel, A., Bandler W. and Kiszka, J. B.: *Approximate Reasoning in Expert Systems*, North-Holland (1985).
- 10) 廣田: FAシステムにおけるAIの応用, *トリケップス*, WS 52 (1987).
- 11) サイエンス社: *数理科学 No. 284 (ファジィ理論と応用)* (1987, 2月).
- 12) 浅居, 寺野, 菅野: *ファジィシステム入門*, オーム社 (1987 予定).
- 13) Goguen, J. A.: *L-Fuzzy Sets*, *J. of Math. Anal. & Appl.*, Vol. 18, pp. 145-174 (1967).
- 14) Mizumoto, M. and Tanaka, K.: Some Properties of Fuzzy Sets of Type 2, *Inf. Control*, Vol. 31, No. 4, pp. 312-340 (1976).
- 15) Czogala, E. and Hirota, K.: *Probabilistic Sets*, Verlag TÜV (西独) (1986).

- 16) Shortliffe, E. H.: Computer Based Medical Consultation MYCIN, American Elsevier (1976).
- 17) Shannon, C. E.: A Mathematical Theory of Communication, Bell System Tech. J., Vol. 27, pp. 379-423, pp. 623-656 (1948).
- 18) 菅野: Theory of Fuzzy Integrals and its Applications, 東工大博士論文 (1974).
- 19) Zadeh, L. A.: Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility, Fuzzy Sets & Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 3-28 (1978).
- 20) Nguyen, H. T.: Some Mathematical Tools for Linguistic Probabilities, FSS, Vol. 2, No. 2, pp. 53-56 (1979).
- 21) Dempster, A. P.: Upper and Lower Probabilities Induced Multivalued Mapping, Ann. Math. Statist., Vol. 38, pp. 325-339 (1967).
- 22) Shafer, G.: A Mathematical Theory of Evidence, Princeton Univ. Press, Princeton N. J. (1976).
- 23) Bannon, G.: Distinction between Several Subsets of Fuzzy Measures, FSS, Vol. 5, No. 3, pp. 291-305 (1981).
- 24) Zadeh, L. A.: Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes, IEEE Trans. of SMC, Vol. SMC-3, No. 1, pp. 28-44 (1973).
- 25) Sanchez, E.: Resolution of Composite Fuzzy Relation Equations, Inf. Control, Vol. 30, pp. 38-48 (1976).
- 26) 塚本, 田代: Fuzzy 逆問題の解法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 15, No. 1, pp. 21-25 (1979).
- 27) 廣田: ファジィ理論による制御・人工知能の実用化, 技報社 (1987 予定).
- 28) McDonnell Douglas 社: Reveal Reference Manual (1-st ed.) (Dec. 1983).
- 29) Siler, W. and Tucker, D.: FLOPS User's Manual, Kemp-Carraway Heart Institute (1986).
- 30) Larkin, L. I.: A Fuzzy Logic Controller for Aircraft Flight Control, Proc. of 23 rd Conf. on Decision & Control (IEEE), pp. 894-897 (1984).
- 31) Togai, M. and Watanabe H.: A VLSI Implementation of Fuzzy Inference Engine toward an Expert System on a Chip, Proc. of 2 nd Int. Conf. on AI and Applications (IEEE), pp. 192-197 (1985).
- 32) Cher, M. L., Guo, R. J., Shang, L. S. and Ji, T.: Fuzzy Match and Floating Threshold Strategy for Expert System in Traditional Chinese Medicine, FSS, Vol. 17, No. 2, pp. 143-152 (1985).
- 33) Sotirov, G., Filev, D. and Konstantinov, K.: A Hierarchical System for Control of Continuous Fermentation Processes Synthetized on the Basis of the Linguistic Approach, Proc. of 1-st World Workshop of Large Scale Systems (Greece) (1984).
- 34) 安信, 宮本, 井原: 予見 Fuzzy 制御方式による列車自動運転, システムと制御, Vol. 28, No. 10, pp. 605-613 (1984).
- 35) 安信: 予見 Fuzzy 制御方式によるコンテナ・クレーン自動運転, 計測自動制御学会論文集, Vol. 22, No. 10, pp. 1066-1073 (1986).
- 36) 柳下, 伊藤, 菅野: ファジィ理論の浄水場薬品注入制御への応用, システムと制御, Vol. 28, No. 10, pp. 597-604 (1984).
- 37) 藤本, 中谷, 米山: 2 値の TSP による単語音声認識方式, Ricoh Technical Report, No. 11, pp. 4/12 (5 月, 1984).
- 38) 植山, 江崎, 平山, 新留: あいまい制御の冷延セットアップへの適用, 計測自動制御学会知識工学会研究資料, Vol. KE-2, pp. 15-18 (6 月, 1986).
- 39) 丸山, 高橋: 異常診断におけるあいまい推論の試み, 日本原子力学会誌, Vol. 27, No. 9, pp. 851-860 (1985).
- 40) 村上, 竹本, 藤村, 井手: あいまい制御を用いたアーク溶接ロボットの制御, 第 1 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 145-150 (5 月, 1985).
- 41) Murakami, S.: Application of Fuzzy Controller to Automobile Speed Control System, Proc. of IFAC Symposium on Fuzzy Information Knowledge Representation and Decision Analysis, pp. 43-48 (1983).
- 42) 山崎, 菅野: 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. 20, No. 8, pp. 720-726 (1984).
- 43) Tazaki, E.: Development of Automated Health Testing and Service System via Fuzzy Reasoning, Proc. of Int. Conf. on SMC (IEEE), pp. 342-346 (1986).
- 44) 山川: 高速ファジィ・コントローラ・ハードウェアシステム, 第 2 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 122-133 (1986).
- 45) 榎本, 汪赴, 永井, 竹内, 遠藤: 自立型移動車のファジィ障害物回避制御, 第 2 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 23-29 (1986).
- 46) 廣田: あいまい制御知能ロボット, McGraw-hill (1985).
- 47) Hirota, K., Arai, Y. and Hachisu, S.: Moving Mark Recognition and Moving Object Manipulation in Fuzzy Controlled Robot, J. of Control Theory and Advanced Technology, Vol. 2, No. 3, pp. 399-418 (1986).
- 48) 山川: 公開特許公報 No. 60-199225, No. 60-199229, No. 60-199230, No. 60-199231, No. 61-20428, No. 61-20429, No. 61-20430, No. 61-65525, No. 61-65526, No. 61-141085, No. 61-141214.
- 49) Hirota, K. and Ozawa, K.: Concepts of Fuzzy Flip Flop, IEEE Trans. of SMC (submitted).

(昭和 62 年 2 月 20 日受付)