

# ファジー制御方式と実システムへの適用

正員 安 信 誠 二

電気学会論文誌 C

(電子・情報・システム部門誌)

平成元年 5 月号 抜刷

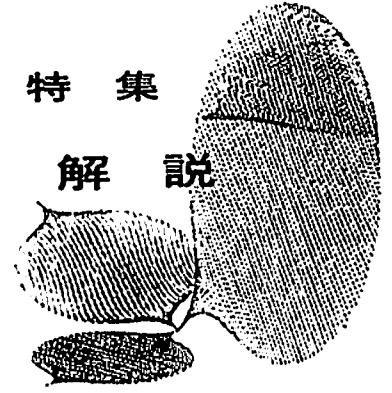
Trans. IEE of Japan, Vol. 109-C, No. 5, May, 1989

# ファジー制御方式と実システムへの適用

正員 安 信 誠 二 [(株)日立製作所 システム開発研究所]

特 集

解 説



## 1. はじめに

最近、ファジー (Fuzzy) 理論の制御や情報処理の実システムへの応用が着実に進みつつある。このファジー理論は、ある状態が「大きい」とか「小さい」といった、熟練者が経験的にとらえている概念 (命題) に含まれる主観的なあいまいさ (fuzziness) を、その状態量の全定義域で 0 から 1 までの値をとる関数 (メンバシップ関数) を用いて、定義するファジー集合論<sup>(1)</sup>に基づいている。実システムへの適用では、ファジー集合により定量的に意味付けられたファジー命題から構成されるファジールールを用いて、計算機がファジー推論を実行し、人間の思考過程を模擬しながら意思決定を代行して行く。

制御分野では、従来の制御理論に基づく計算機制御方式を用いると自動化に限界があり、現在でも人間の運転に頼っているシステムが数多くある。これらの対象では、熟練運転員が経験に基づき、システムの制御目的を状況に応じて考慮しながら、適切な運転、人間にとって望ましい運転を実行している。ファジー制御は、これら熟練者が行ってきた運転 (制御) などに関する知的活動をアルゴリズム化し、マイクロコンピュータなどで熟練者と同様に知的な運転を実現しようとする試みの一つである。

このファジー制御は、対象システムの状態をファジー推論により評価し、あらかじめ定めた動きとなるよう制御指令を決定する方法が、セメント・キルン<sup>(2)</sup>、浄水場の薬剤注入制御、自動車の速度制御、ガラス溶融炉の温度制御、給湯用混合装置の湯温制御、そしてトンネルのシールド機械の制御<sup>(13)</sup>などの実システムへの応用が盛んである<sup>(7)</sup>。

これに対して筆者らは、対象システム本来の制御目

的をバランス良く評価し、シミュレーションによる予測機能を加えて、運用者にとって望ましい動きとなるような制御指令をリアルタイムに決定する予見ファジー制御方式を開発し<sup>(9)</sup>、昭和 62 年 7 月に開業した仙台市地下鉄の列車自動運転システムへ適用し<sup>(10)</sup>、熟練者並みの運転を実現できることを実証した<sup>(11)~(13)</sup>。更にこのファジー制御方式は、コンテナクレーンの自動運転やエレベータ群の運行管理への適用が進められている。

このファジー理論に基づく体系的アプローチ、その数学的入門、ファジー理論の応用動向については、数多くの解説がなされている<sup>(2)~(8)</sup>。また、理論と列車自動運転への応用に関しての基本部分の詳細は電学誌の解説として既に報告しており<sup>(10)</sup>、最近も伊藤らにより、ファジー制御とその適用動向について解説がなされている<sup>(14)</sup>。更に興味をもたれた読者は、これらをご覧いただくとして、ここではファジー制御方式はどのようなものかと、実システムへの適用例を紹介する。

## 2. ファジー理論

ファジー理論は、アメリカ・カリフォルニア大学の Zadeh 教授により提案された人間の主観を数学的に取扱うファジー集合論を基礎とする概念である。図 1 に身長を例にとりファジー集合の概要を示す。

通常集合 (ファジー集合に対して、クリスプ集合と呼ばれる) の概念では、その取り得る値は 0 か 1 である。例えば、175 cm 以上は背が「高い」と定義する。従って、174.9 cm の人がいた場合は「高くない」と明確に分離することになる。これを「高い」と同等に扱うためには、きめ細かい複雑なアルゴリズムが必要となる。

これに対して人間は、これらの状態量を寸分違わず明確に分けていない。「背が高い」、「背が中位」と言った主観的な概念に基づき考え、その境界は不明確

Fuzzy Control Method and its Application for Real Systems. By Seiji Yasunobu, Member (Systems Development Laboratory, Hitachi Ltd.).

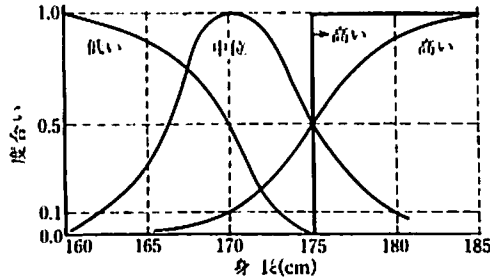


図 1 ファジー集合の概要

である。この人間のもつ主観のあいまいさを定量的に記述し、計算機化しようとするのがファジー集合である。ファジー集合では、背が「高い」、「中位」、「低い」をそれぞれ図 1 中に示す 0.0 から 1.0 の値をとる度合い（メンバシップ）関数により定義することになる。

例えば身長 180 cm の人の場合には、「背が高い」が 0.8, 「背が中位」が 0.1, 「背が低い」が 0.0 という各度合いの値を得ることができる。ここで、身長 の測定値が 5 cm 刻みの値でしか測定されないとすると、160~185 cm の測定値の全体  $V$  は {160 cm, 165 cm, 170 cm, 175 cm, 180 cm, 185 cm} の 6 個の有限集合となる。このとき図 1 に示した「身長が高い」のファジー集合  $M$  は

$$M = 0.0/160 + 0.0/165 + 0.1/170 + 0.5/175 + 0.8/180 + 1.0/185 \dots\dots\dots (1)$$

と各要素について、度合い/要素値の和として表せ、 $x_i$  における度合いを  $\mu M(x_i)$  とし、 $\Sigma$  記号を用いて

$$M = \sum_{i=1}^6 \mu M(x_i)/x_i \dots\dots\dots (2)$$

と表す。更に、身長 の測定値が連続的に測定できるようなとき、 $M$  は次のように書かれる。

$$M = \int_V \mu M(x)/x \dots\dots\dots (3)$$

このようにしてファジー集合により、人間が背の高さに関してもっている主観を数値として定量化し、コンピュータにより扱うことができる。このファジー集合で裏付けられたルールを用いて推論を行うことにより、人間の知的活動をアルゴリズム化することが可能となる。ファジー推論の一般的理論については専門の解説に譲り、ここでは実際のファジー制御方式で用いられている推論に関し紹介する。

3. ファジー制御方式

ファジー制御は「あいまい制御」と呼ばれることもあるが、その言葉から連想されるように不確定的でい

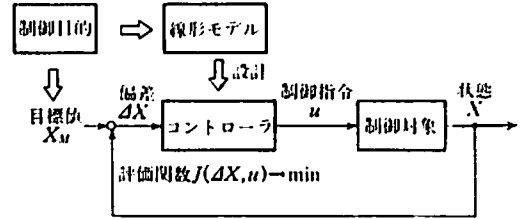


図 2 従来制御方式

いかげんな動きをするものではない。人間の経験則の中に含まれている命題の意味をファジー集合を用いて明確に定義し、大局的判断から作成した数少ないが特徴ある制御則の集まりに基づき、それらを総合的に評価することにより、同一状況に対しては常に同じ制御指令を出力する確定的な制御である。

3.1 従来はモデルに対象を押さえ込む制御

まず従来の計算機制御方式では、どのようにしているかを考えてみる。従来の計算機制御は、あらかじめ目標値を定め、対象システムに対する外乱や特性の変動が生じて、それを押さえ込み、常に目標値どおりの動きをさせようとするフィードバック制御方式が主体である。従って設計者は、まず目標値と対象の線形モデルを設定し、これらに基づきコントローラを設計する。また、実際の制御系に組込まれたコントローラは、状態の変化や外乱などにより変化する対象システムを、あらかじめ定めた評価関数により、目標値と状態量の偏差を評価しながら、目標値になるべく正確に追従できるように制御指令を決定していく(図 2)。

この従来制御方式では、統計的に見て追従誤差の平方和や投入エネルギーを最小とする最適制御と呼ばれる制御を実現できる。しかし、その結果が対象システム本来の制御目的を満足しているかどうかは、また別である。このため、実際の制御結果が対象システム本来の制御目的を満足するためには、設計者のパラメータ調整の感覚や経験が重要となる。

従って、従来制御方式は対象システムの状況が正確に観測でき、特性が線形モデルで十分に表される対象であるとか、目標が一定でありそれを守ればよいような対象の制御は得意である。しかし、状況に応じてシステム の特性や外部状況がダイナミックに変化したり、なかなか観測データが入手できなかったり、制御目的の数が多く、しかもその重要度が時間や状況と共に変化するような対象の制御は適用が難しく、現在でも人間のほうがうまい制御、満足できる制御を行っている場合が多くある。

3.2 ファジー理論の制御への応用

これに対して、熟練者がどのように運転(制御)し

制御指令を決定しているかを考えてみる。熟練者は対象システムに対する過去の操作経験から、その特性を定性的に把握し、運転ノウハウを制御知識化して蓄積しながら、そのシステムの制御目的を全体として満足するうまい制御を行っている。この熟練者の制御に関する知的活動は、(a)「もし、〇〇のシステム状態ならば△△の制御指令を出したら良い制御ができそうだ」、というシステムの特徴的状态に対する「浅い知識」に基づく多次元的状態評価の集まりからなる制御知識群を、現在までに観測したシステム状態へ適用する場合と、(b)更に、対象システムの動特性に関する「深い知識」を考慮し、「もし、このシステム状態で△△の制御指令を出したならば、◇◇のように動くから、対象システム本来の制御目的□□を満足した制御ができそうだ」、という多次元的目的評価の集まりからなる制御知識群を、現在までに観測したシステム状態へ適用する場合の二つの思考過程を考えることができる。

この熟練者の制御に関する知的活動を、(i)その経験則に含まれる言葉(命題)の意味をファジー集合論によって定量化し、(ii)その構造を制御知識(ルール)として記述する、ことにより計算機化しようとするのがファジー制御である。これには、先述した人間の思考過程に対応して、状態評価および目的評価のファジー評価を行う二つのアプローチが提案されている。

3.3 状態評価ファジー制御方式

人間による運転を制御対象システム自体のモデルを作成することなく、過去の操作経験に基づく状況の総合判断としてアルゴリズム化する方式である。この方式では、温度と圧力によって燃料を制御するような対象を例にとると、「もし(If) 温度が高く、圧力が高ければ、(then) 燃料を減らす」といった制御則により制御指令を決めていく(図3)。ここで「温度が高い」、「圧力が高い」、「燃料を減らす」といった命題は、その意味がファジー集合により定義されたファジー命題である。この状態評価ファジー制御の制御則を一般的に示すと

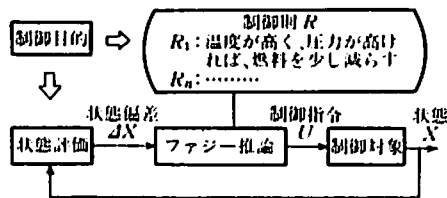


図3 状態評価ファジー制御方式

If  $x$  is  $A_i$  and  $y$  is  $B_i$  then  $\Delta u$  is  $C_i$

$$(i=1, N) \dots\dots\dots (4)$$

なる If-then ルールで記述できる。ここで、後件部(then 部)の制御指令としては、設定値を直接与え積分的要素をもたない 0 型の知識や、現在の制御指令に対して「少し増す」などの変化分を与え一次の積分的要素をもつ 1 型の知識が考えられる。これら制御知識の整理にあたっては、従来の制御理論で検討されているような基礎的な事項は十分に考慮する必要がある。

この制御方式で代表的な推論過程を以下に示す(図4)。

(1) 前件部評価演算 ファジーコントローラでは、まず各制御則の前件部(If 部)に含まれているファジー命題の評価を行う。過去や現時点で観測したシステム状態  $x(t)$  が、「温度が高い」、「圧力が低い」といった人間の概念(主観)に基づき定義した各ファジー集合

$$M_{ij} = \int_V \mu M_{ij}(x)/x \dots\dots\dots (5)$$

に、どの程度適合しているかの命題適合度  $m_{ij}$  を求める。

$$m_{ij} = \mu M_{ij}(x(t)) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $i$ : ルール番号(ルール数、 $N$ )、

$j$ : ルール  $i$  内の命題番号(命題数、 $K_i$ )

この命題適合度の算出にあたっては、観測したシステム状態  $x(t)$  が確定値(シングルトン)であるとし、メンバシップ関数  $\mu M_{ij}$  の値を適合度としている。

次に、ルールの前件部に記述された各命題の適合度を第1のファジー演算(ここでは、論理積( $\cap$ : min)を使用)を行い前件部適合度  $r_i$  を求める。

$$r_i = m_{i1} \cap \dots \cap m_{iK_i} = \min \{ m_{ij} \} \dots\dots\dots (7)$$

(2) 各ルール後件部の演算 この前件部適合度

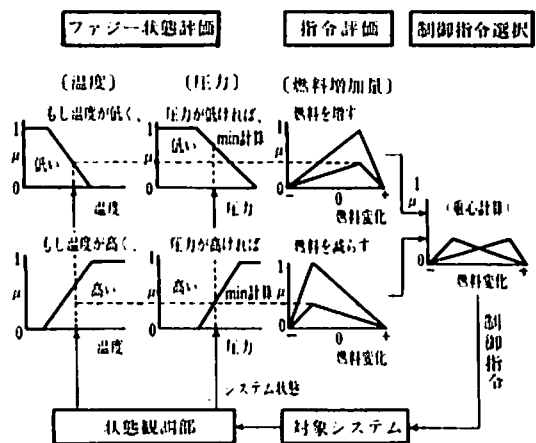


図4 状態評価ファジー制御の推論過程

と後件部 (then 部) に記述された「燃料を減らす」といった操作命題 (ファジー集合:  $\mu_{wi}(z)$ ) を第 2 のファジー演算 (ここでは、代数積を使用) を行い、各ルールの操作指令の候補値 ( $W_i$ ) を求める。

$$W_i = \int_z \mu_{wi}(z) / z$$

$$= \int_z (\mu_{wi}(z) * r_i) / z \dots\dots\dots (8)$$

(3) 後件部の統合化 更に、複数の制御則より求めた制御指令候補を第 3 のファジー演算 (ここでは、論理和 (max) を使用) により統合化し、制御指令の推論結果 ( $Z$ ) を得る。

$$Z = \int_z \mu_z(z) / z$$

$$= \int_z (\max_{i=1, N} \mu_{wi}(z)) / z \dots\dots\dots (9)$$

(4) 非ファジー化演算 運転支援用の表示であれば、このファジー集合のままでもよいが、通常の制御を実行するためには非ファジー化し、一つの制御指令値とする必要がある。ここでは、求めた制御指令ファジー集合  $Z$  の重心を次式のように計算し、最終的制御指令としての燃料変化量  $u_0$  を決めている。

$$u_0 = \frac{\int \mu_z(z) z dz}{\int \mu_z(z) dz} \dots\dots\dots (10)$$

この方式により、セメントキルンや浄水場の薬剤注入制御、シールド機械制御などが実用化されている。

(5) 関数形後件部方式 更に、後件部を単にファジー集合として記述せずに、観測した状態量 ( $x, y$ ) の関数として記述する方式も提案されている<sup>(4)</sup>。この方式の制御則は

$$\text{If } x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i \text{ then } u = f_i(x, y)$$

$$(i=1, N) \dots\dots\dots (11)$$

の形式で記述される。

この推論方式では、前件部適合度  $R_i$  を用いて後件部の関数  $f_i(x, y)$  の値を重み付けして統合化して行くことになる。

$$u_0 = \frac{\sum_{i=1, N} R_i f_i(x, y)}{\sum_{i=1, N} R_i} \dots\dots\dots (12)$$

この方式はガラス溶融炉の制御などに応用され<sup>(7)</sup>、特徴的なシステム状態に対する制御方法が決まっている場合で、過渡的状态における制御指令の補間に用いられている。

3.4 状態評価ファジー制御方式の性質

これら状態評価ファジー制御方式は、制御則群の各 If 部に記述されている状態を入力とし、then 部に記

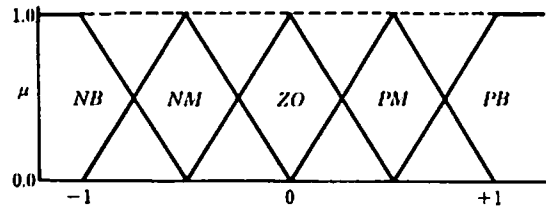


図 5 三角形ファジー変数

		y				
		NB	NM	ZO	PM	PB
x	NB	NB	NB	NM	NM	ZO
	NM	NB	NM	NM	ZO	ZO
	ZO	NM	NM	ZO	PM	PM
	PM	NM	ZO	PM	PM	PB
	PB	ZO	ZO	PM	PB	PB

(2 入力 (x, y), 1 出力 (u))

図 6 状態評価ファジー制御則例

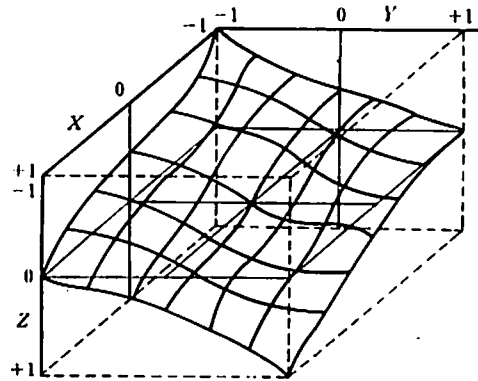


図 7 状態評価ファジー制御の入出力

述されている制御指令を出力として、制御指令を決定する多入力多出力の非線形要素としてとらえることができる。入力は -1~+1 の区間に正規化された状態量に、NB: 負で大、NM: 負で中位、ZO: ゼロ、PM: 正で中位、PB: 正で大、などのファジー変数で評価する。五つの三角形ファジー変数の例を図 5 に示す。制御則は 2 入力 (x, y) 1 出力 (u) の場合を例に取ると

$$\left. \begin{aligned} \text{If } x \text{ is } NB \text{ and } y \text{ is } NB \text{ then } u \text{ is } NB \\ \vdots \\ \text{If } x \text{ is } PB \text{ and } y \text{ is } PB \text{ then } u \text{ is } PB \end{aligned} \right\} (13)$$

の形式となる。制御則をテーブル化して図 6 に示す。

これら制御則を用いてすべての状態量に対して、ファジー推論した入出力結果は図 7 に示す形となる。

従来の PD (比例・微分) 制御方式では、x を偏差、y を偏差の微分値とすると制御指令 u は

$$u = k_p * x + k_d * y \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 $k_p$ : 比例制御係数、 $k_d$ : 微分制御係数

なる関数で記述され、一つの平面でその制御指令を規

定していることに相当する。

これに対してファジー制御では、この制御指令決定面を各制御則のデータと推論アルゴリズム（ファジー演算）により計算していることになる。すなわち、対象システムの状況に応じて、最適と思われる制御指令をリアルタイムに推論する。この推論結果は一般には複雑な曲面となる。また高速化のためには、この計算結果を事前に計算し、ルックアップテーブルとしてメモリに保存しておく方法も用いられている。

### 3.5 予見（目的評価）ファジー制御方式<sup>(10)</sup>

本方式は熟練者の運転を、(i)多数の制御目的の満足度を、メンバシップ関数により定義するファジー論理を用いて表現するファジー評価と、(ii)システムの状況を見ながら「もし～の条件なら～する」といった知識工学的な制御知識と、(iii)制御対象の動特性をシミュレーションするシステム・モデルを、有機的に結合することによりアルゴリズム化する方式である（図8）。

この制御構造を図9に示す。ここでは、対象状態の観測値をもとに、制御則に仮定された候補値についてシミュレーションを行い、その結果により制御目的となる被評価量を予見・予測し、多目的評価のファジー推論を行い、最適な制御指令を決定するようになっている。具体的に列車運転の場合を例にとると、「もし（If）過去の経験からブレーキを少しかけて、乗り心地良く、正確に駅に止まれそうな状況ならば、（then）ブレーキを少しかける」といった、制御則に基づき最

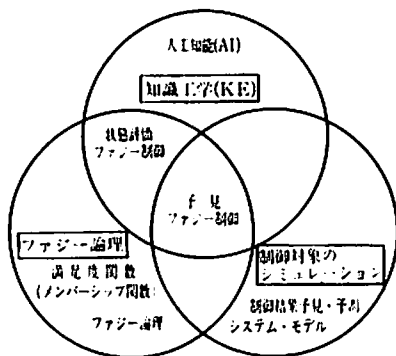


図8 予見ファジー制御の位置付け

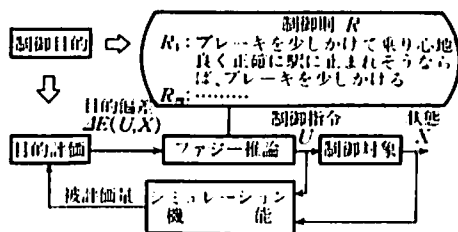


図9 予見（目的評価）ファジー制御方式

も望ましい状況に制御できる制御指令を選択していく。予見ファジー制御の制御則は一般的に示すと、

$$\text{If}(u \text{ is } C_i \rightarrow x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i) \\ \text{then } u \text{ is } C_i \quad (i=1, N) \dots\dots\dots (15)$$

となる。予見ファジー制御の具体的推論過程は次章図13にて述べる。

予見ファジー制御が状態評価ファジー制御と大きく異なる点は、前件部で評価する  $x, y$  の値が現在の時点で制御指令を  $C_i$  とし、実行した場合に制御目的がどうなるかを予見（予測）したシミュレーション結果であることである。もちろん、制御目的が出力しようとしている制御指令  $C_i$  に依存しない場合もあり、すべてが依存しなければ現在の状態量の目標値への追従性だけが制御目的であり、状態評価ファジー制御に一致する。

### 3.6 予見ファジー制御方式の性質

このファジー制御方式は制御則群の各 then 部に記述されている制御指令を実行した場合に、If 部に記述されている制御目的の適合度を評価し、最適な制御指令を決定している。この方式では、図7に示したような制御指令決定面はシステムの状況により変化するため、簡単に記述することは難しい。

この制御では、対象システムのモデルに基づき制御結果を予見・予測しているため、常に実行可能な制御指令（非常指令）を準備し、許容範囲の限界に近づくと介入し、システムを安定状態に保つ制御則と、可制御な領域でよりうまく動かすための制御則を設定することが可能であり、安定性、可制御性を考慮した実システムに適した熟練者並みの運転が可能である。

## 4. 列車自動運転におけるファジー制御方式<sup>(10)-(13)</sup>

ファジー制御を実システムへ適用し、乗客を乗せて稼働している列車自動運転とは、運動士に代わり、列車の出発から停止までの加減速の操作を行うシステムである。ここでは、

- (1) 乗客の安全性を確保
- (2) 乗り心地を維持
- (3) 走行速度を制限速度以下に保持
- (4) 駅で精度良く停止
- (5) 駅間走行時間の短縮
- (6) 消費電力量の節約

などがシステム本来の制御目的であり、熟練者はこれらを評価指標として運転を行っている。従来実用化されているシステムでは、目標速度への追従性をコントローラの直接的な制御目的とするPID制御方式を用

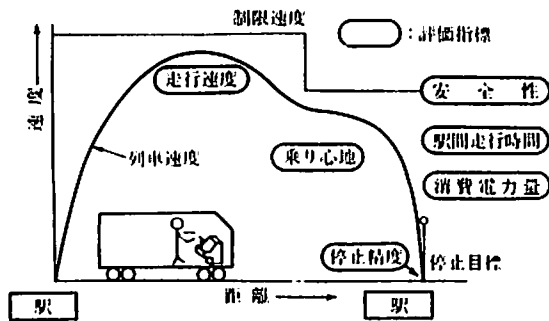


図 10 熟練者の列車運転評価指標

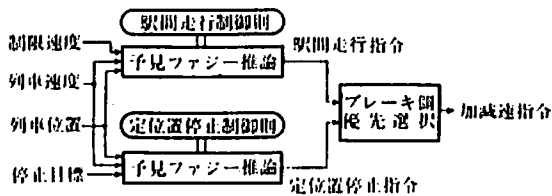


図 11 列車自動運転用ファジーコントローラ

いたため、これらのパラメータを調節し、システム本来の制御目的を満たし、熟練者並みの自動運転を実現することは困難であった。

この列車自動運転に用いているファジーコントローラの概略構成を図 11 に示す。この運転は、(1)主に制限速度を守って運転する駅間走行制御と、(2)駅の所定位置に停止させる定位停止制御、の二つに分けられる。これら、駅間走行指令と定位停止指令はブレーキ側優先論理により選択され、加減速指令として列車の駆動系、ブレーキ系に出力される。

例えば、定位停止制御のファジー推論では、図 12 に示すような制御則に基づき乗客の乗り心地と、停止精度を考えた運転士の運転（制御指令の選択）を計算機により代行（0.1 秒ごとに計算）し実現している。例えば、定位停止制御において、停止目標の手前 20~30 m で列車を目標に停止させる間際において運転士は、「このままでうまく止まれそうだ」、「少しブレーキを強くしたら、正確に止まれるし、乗り心地も問題ない」といったことを考えながらブレーキを操作していると定式化している。すなわち、運転士の「うまく停止できる」、「正確に止まれる」、「乗り心地が良い」といった評価指標に基づき制御を行い、このままでどこに止まれそうなのかといった列車の運動特性も組込んでいる。

図 13 に予見ファジー制御の具体的推論過程を示す。各制御指令の評価においては、列車の現在位置に基づき、ブレーキの保持や変化を仮定した場合の停止位置を予見する。この値を「うまく停止」、「正確に停

- 1: もし、ブレーキ開始点までの余裕が“大きい”なら、力行7ノッチとする。
- 2: もし、ブレーキ開始点までの余裕が“中位”なら、力行4ノッチとする。
- 3: もし、ブレーキ開始点までの余裕が“小さい”なら、ノッチオフとする。
- 4: もし、ブレーキ開始点までの余裕が“ない”なら、ブレーキ2ノッチとする。
- 5: もし、ブレーキ7ノッチで目標を“大きく”オーバーしそうなら、非常ブレーキとする。
- 6: もし、ブレーキ7ノッチで目標を“オーバー”しそうなら、ブレーキ7ノッチとする。
- 7: もし、現在のノッチで、“うまく”停止しそうなら、ノッチを変えない。
- 8: もし、ブレーキを1ノッチゆるめて、“乗り心地良く”“正確に”停止しそうなら、1ノッチゆるめる。
- 9: もし、ブレーキを1ノッチ強めて、“乗り心地良く”“正確に”停止しそうなら、1ノッチ強める。
- 10: もし、ブレーキを2ノッチゆるめて、“乗り心地良く”“正確に”停止しそうなら、2ノッチゆるめる。
- 11: もし、ブレーキを2ノッチ強めて、“乗り心地良く”“正確に”停止しそうなら、2ノッチ強める。
- 12: もし、ブレーキを3ノッチゆるめて、“乗り心地良く”“正確に”停止しそうなら、3ノッチゆるめる。
- 13: もし、ブレーキを3ノッチ強めて、“乗り心地良く”“正確に”停止しそうなら、3ノッチ強める。

図 12 定位停止のファジー制御則

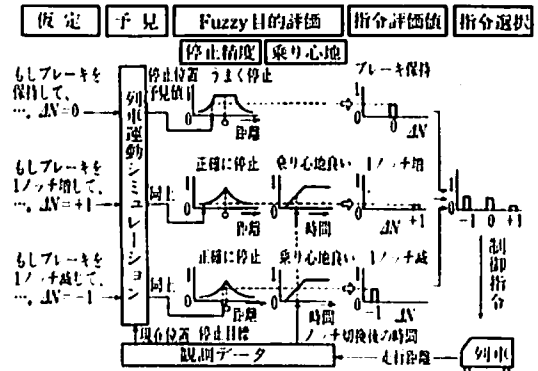


図 13 予見ファジー制御の推論過程

止」のファジー目的で評価し、乗り心地の評価との min 演算をとる。この演算結果が各制御指令の評価値となり、最大の評価値をもつ制御指令をブレーキに出力する。

このファジー制御列車自動運転システムは実システムにおいても、制限速度の変化などへうまく追従すると共に、駅への停止においてもブレーキ・ノッチの変化も少なく乗り心地の良い運転が実現されている。また正確な停止を実現して、開業後も全編成順調に稼働中である<sup>(1)(2)</sup>。

### 5. 終りに

ここでは、ファジー制御方式を概説し、列車自動運転への適用事例について紹介した。このファジー制御は人間の知的活動を定量化して、計算機化するという特長をもち、これまでオペアンプによるアナログ制御の延長として、制御理論が先行し制御系を作りやすいモデルに基づき、その周りで精密な制御を行うことの多かった計算機制御に、本当の制御目的は何かという面からのアプローチを可能にしたものである。またこのファジー制御は制御装置が演算（思考）している状況がわかりやすく、人間との親和性も良いことから、実用面から見た応用範囲は大きく、今後、各種のシステムへの実用化が盛んになって行くと考えられる。本解説がファジー制御の実システム適用拡大のきっかけ

となれば幸いです。

終りに、このファジー制御の実システム適用を推進  
いただいている(株)日立製作所の関係者の方々、日ご  
ろより御指導いただく同システム開発研究所 堂免信  
義所長、春名公一副所長をはじめとする関係者の方々に  
深謝します。

(平成元年3月24日受付)

## 文 献

- (1) L. A. Zadeh "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3, 28 (1973)
- (2) 菅野: 「あいまい集合と理論の制御への応用」, 計測と制御, 18, 150 (昭54-2)
- (3) 寺野, 他: ファジシステム入門 (昭62) オーム社
- (4) 菅野: ファジー制御 (昭63) 日刊工業新聞社
- (5) 水本: ファジー理論とその応用 (昭63) サイエンス社
- (6) 菅野: ビジネスマンのための「ファジー」読本(昭63) サイエンス社
- (7) 稲葉: 実用期に入ったファジー理論, 1987.7.27 (No. 426), pp. 129-152 (昭62) 日経エレクトロニクス
- (8) 広田: 「ファジー推論エキスパートシステムの現状と動向」, 情報処理, 28, 1065 (昭62-8)
- (9) 安信, 他: 「Fuzzy制御による列車定位停止制御」, 計測自動制御学論, 19, 873 (昭58-11)
- (10) 安信, 他: 「Fuzzy制御の列車自動運転システムへの応用」, 電学誌, 104, 867 (昭59-10)
- (11) 佐藤: 「仙台市地下鉄の技術的特徴とFUZZY工学」, 車両と機械, 1, 4 (昭62-8)
- (12) 庄子, 他: 「仙台市地下鉄南北線自動列車運転装置」, 第27回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, p. 243 (昭63)
- (13) 安信: 「ファジー理論の実システムへの応用-仙台市地下鉄列車自動運転-」, 日本機械学誌, 91, 639 (昭63-7)
- (14) 伊藤, 他: 「ファジー制御とその適用動向」, 電学誌, 108, 1101 (昭63-11)
- (15) 桑原, 他: 「シールドトンネル掘削機械へのファジー理論の適用」, 計測と制御, 27, 1030 (昭63-11)