

別刷

計測自動制御学会 論文集

昭和 年 第 卷 第 号

(P. ~P.)



社団法人 計測自動制御学会

人間の制御戦略に基づく Fuzzy 制御方式の一提案[†]

安 信 誠 二*

A Proposal of Fuzzy Logic Control Method Based on Human Control Strategies

Seiji YASUNOBU*

In recent years, in line with hardware technology developments such as microcomputers, computer control rather than human operators is being widely used in plants, transportation systems, and so on. Fuzzy logic control aims at using fuzzy logic, which serves to define the subjective ambiguity of people in terms of truth values which are between 1 and 0, to incorporate human intellectual actions into control programs.

The authors proposed a predictive fuzzy control scheme which predicts the result and selects the most likely control rule derived from skilled human operator experience. This scheme is currently being applied to an actual subway system's automatic train operation system and a container crane operation system.

In this paper, based on experience of these applications, a relationship of fuzzy control methods, conventional control methods and a human operation is discussed, and the predictive fuzzy control scheme is enhanced to realize a human's operation strategies which are organized by (1) estimation, (2) decision and (3) activation. The new control scheme is applied for a second-order transfer function model which includes unknown parameter of dead time and system gain. The simulation results show the controller effective to incorporate human control strategy.

Key Words: fuzzy set theory, fuzzy control, predictive control, transfer function model, dead time

1. はじめに

近年、マイクロコンピュータなどのハードウェア技術の発達に伴い、従来人間が行ってきた制御（運転）を自動化しようという試みがさかんである。しかし、プラントや交通システムなどで人間が行っている運転を自動化しようとした場合、コンピュータによる制御は、速度・量において人間に勝るが、質においては熟練者による制御に劣る場合が多くある。そこで、熟練者の制御に関する知識を定量化しコンピュータ化する方法として Fuzzy 集合論¹⁾を用いた Fuzzy 制御が Mamdani²⁾らによって提案され、セメント・キルン³⁾、浄水場の薬剤注入制御⁴⁾、などに応用されてきた^{2),4),7)}。これに対し筆者らは、対象システム本来の制御目的を評価し、対象システムが運用者にとって望ましい状態となるような制御指令を決定する予見 Fuzzy 制御方式を提案⁸⁾、列車自動運転^{9),10),11),17),18)}、コンテナクレーン¹⁹⁾などの実システムへの適用を進めている。

本論文では、これら実システムへの適用に基づき、対象システムの特徴を推定し最適な制御を行う熟練者の運動全体をアルゴリズム化するため、人間の制御戦略を、(1)推定部、(2)判断部、(3)実行部の3段階に階層化し、各段階に対して経験則を Fuzzy 制御方式によって定式化する新しい Fuzzy 制御方式を提案し、その構成とともに、特長の明確化のため伝達関数で表わされる対象に対して適用シミュレーションを行った結果について述べる。

2. 従来制御方式と Fuzzy 制御

2.1 従来制御方式とその限界

従来の計算機制御における制御システム設計を概観すると、設計者が対象の制御目的を満足できるように対象の線形モデル、目標値およびコントローラの構

[†] 第3回知識工学シンポジウムで発表 (昭 60・3)

* (株)日立製作所システム開発研究所 川崎市麻生区王禅寺 1099

* Systems Development Laboratory, Hitachi Ltd., Kawasaki

(Received June 20, 1986)

(Revised January 24, 1987)

造・制御定数を設計している。また、実際の制御系に組み込まれたコントローラはあらかじめ定められた評価関数によって目標値と状態量 x と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制御指令を決定している。この従来制御方式では、コントローラの制御定数を決めた場合の応答であるとか、誤差平方和を最小にするような制御定数は、完備されたCADシステムによって容易に決定できる。しかし、その制御結果が制御対象システムの本来の目的を満足しているかどうかは、また別であり、設計者は試行錯誤によりその制御定数を決めていく。

したがって、特性が線形モデルで十分に表わされる対象であるとか、目標が一定であるような制御は得意であるが、状況に応じて特性が非線形に変化しその構造が不明瞭な対象の制御や、制御目的の数が多くしかもその重みが時間とともに変化するような対象の制御は難しくなる。これに対して設計者は、状況に応じた制御定数の切り替えや、オブザーバなどによる対象の推定による適応制御の手法などを用いて、ノウハウを組み込むことにより、本来の制御目的を実現していくことになる^{14), 15)}。しかし、このように精密に構築されたコントローラは、対象機器の交換などの状況の変化に対応し、再び設計し直すのは困難である。

2.2 Fuzzy 制御による経験のアルゴリズム化

ここで熟練者による制御(運転)を考えてみる。熟練者は、対象システムに対する過去の経験から対象システムの特徴を定性的に把握し、ノウハウを蓄積しながら本来の制御目的を満足する質の良い制御を行っている。したがって人間の制御に関する知的活動は、(a)もし、いまの状態ならば、過去の経験からこの制御指令を出したら良いという多次元状態評価と、(b)もし、いまの状態でのこの制御指令を出したならば、過去の経験から本来の制御目的を満足した制御ができそうだ、との二つの思考過程に分けることができる。

この熟練者の制御に関する知的活動を、その経験則に含まれる意味を Fuzzy 集合論によって定量化し、その構造をルール化することにより、計算機化しようとするのが Fuzzy 制御である。これには、上記人間の思考過程に対応して、つぎの二つのアプローチが提案されている。

(a) 状態評価 Fuzzy 制御⁹⁾

人間による制御を、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、「温度が高く、圧力が高ければ、

燃料を大きく減らす」といった制御則により制御指令を決定すると定式化している。一般的に書くと、

$$R_i : \text{If } (x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i) \text{ then } \Delta u \text{ is } C_i \quad i=1, n \quad (1)$$

となる。ここで、 Δu は操作量の変化分を表わし、 A_i, B_i, C_i などは、 $x, y, \Delta u$ のとる「高い」、「中位」といった Fuzzy 集合で定義される値である。

Fuzzy コントローラは、 x, y の観測値、 $x \text{ is } x', y \text{ is } y'$ が与えられたとき、 n 個の制御則の前提部 (If 部) の Fuzzy 集合を評価し、その前提部を満たす度合いから Δu の値を決定する。

(b) 予見(目的評価) Fuzzy 制御⁹⁾

人間の制御活動を、制御目的を考えた勘に基づく代替案の選択としてアルゴリズム化するのが、予見 Fuzzy 制御方式である。列車運転の場合を例にとると、「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、ブレーキを少しかける」といった、経験則に基づき最も望ましい状況に制御できる制御指令を選択する。制御則を一般的に定式化すると、

$$R_i : \text{If } (u \text{ is } C_i \rightarrow x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i) \text{ then } u \text{ is } C_i \quad i=1, n \quad (2)$$

となる。(1)式で示した状態評価 Fuzzy 制御と大きく異なる点は、 x, y の値が現在の状態だけでなく、現時点で制御指令を C_i と仮定した場合の制御目的の予見(予測)評価指標(すなわち、対象システムが望ましい状況になるかどうか)であり、そのため前提部 (If 部) に制御指令 C_i が表われている。したがって、すべての評価指標が制御指令 C_i に依存しない場合には、状態評価 Fuzzy 制御と一致する。

これらを、Fig. 1 に示すように、対象の構造と制御目的の評価を二つの軸にとり、分類してみる。状態評価 Fuzzy 制御は、対象システムの構造が不明確で

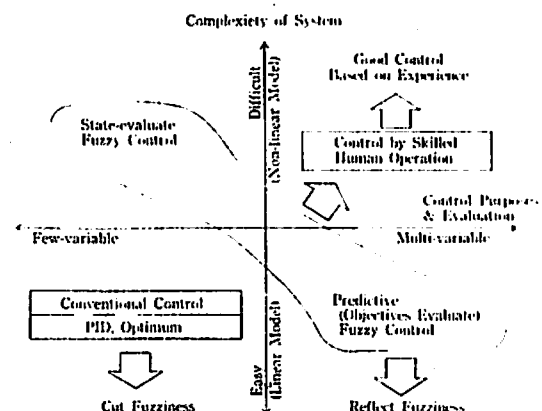


Fig. 1 Relationship of fuzzy control methods

ありモデル化が困難な対象に対して制御目的の評価を潜在化させた制御則により制御を行う。また予見 Fuzzy 制御では、現在および将来の制御目的を予見しそれらを多次元的に評価しながら制御を行い制御目的の予見自体は部分的な線形モデルを用いる。

しかし、この二つの Fuzzy 制御は、相反するものではなく、適用対象に応じてうまく組合せることによって、より熟練者の制御に近づくことが可能である。

3. 運転における人間の制御戦略の検討

ここで、筆者らの Fuzzy 制御の実システムへの適用経験から、熟練者による制御（運転）全体の戦略について考えてみる。熟練者は対象システムに対する過去の経験からその特性を定性的に把握しノウハウを蓄積することによって、要所要所で本来の制御目的を満足する制御パターン（制御方策）を判断し、通常はその制御パターンに従って制御指令を決定している。また、ときどき過去の制御指令に対する応答をチェックし対象システムの現在の特性を推定している。

このように考えた人間の制御戦略は、つぎのように階層化ができる。

(1) 推定（評価）部

対象システムの現在の応答が、過去に経験した応答と比較してどうなのかをチェックし、もしシステムの構造や定数が変化しているようなら、それを認識する。

(2) 判断部

現在の状態やシステム定数の値から、過去の経験に基づき、現在実行可能な制御方策の実施結果を予測・予見し、最適と思われる制御方策を判断し決定する。

(3) 実行部

決定した制御方策に基づき、現在の状態から条件反射的に制御指令を出力する。

ここで、実行部はリアルタイムで動作し、判断部は対象システムの時定数と同等の時間間隔で、推定部はシステム定数の変化する可能性に応じた時間間隔で考慮されていると考えられる。また、実行部は、PID 制御系などにより与えられた設定値に追従制御を行うマイナーなコントローラである場合も数多くある。

4. 人間の制御戦略に基づく Fuzzy 制御方式の提案

4.1 人間の制御戦略のアルゴリズム化

Fuzzy 制御はこれまで、人間の制御に関する知的活動を 1 組の経験則で記述しアルゴリズム化（計算機化）する方式として提案、実システムへ適用されてき

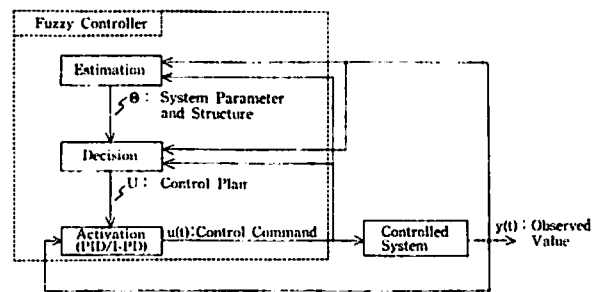


Fig. 2 Structure of proposed fuzzy controller

た。

ここでは、上記人間の制御戦略モデルに従い、(1) 推定、(2) 判断、(3) 実行、の 3 階層に対し状態評価⁵⁾、予見（目的評価）⁹⁾、の二つの Fuzzy 制御の考え方を適用し Fuzzy 制御コントローラを構成する (Fig. 2)。

各部分の概略機能は、つぎのとおりである。

(1) 推定部

現在時刻 (T_0) より過去の制御対象への入力 ($u(t)$, $t < T_0$) と、現在および過去の制御対象の観測値 ($y(t)$, $t \leq T_0$) に基づき、現在の制御対象の応答をうまく説明できる（経験モデルにマッチする）システム定数やシステムの構造を選択する。

(2) 判断部

過去の制御対象への入力 ($u(t)$, $t < T_0$) と、現在および過去の制御対象の観測値 ($y(t)$, $t \leq T_0$) および評価部で求めたシステム定数に基づき、現在選択しうる制御方策の中で、最も制御目的を満足する制御方策を決定する。

(3) 実行部

現在および過去の制御対象の観測値 ($y(t)$, $t \leq T_0$) と、判断部で決定した制御方策に従い、制御対象に対する制御指令を決定する。

4.2 制御対象システムと経験モデル

制御対象システムの真の特性が、

$$y(T_0) = f(X(t), u(t), \theta), \quad t \leq T_0 \quad (3)$$

ここで、 $X(t)$: 状態、 θ : 対象のシステム定数、 $u(t)$: 制御指令、 $y(t)$: 観測値なる関数 f によって記述されるとする。これに対して経験および解析により、この制御対象システムの特性が、

$$y(T_0) = g(X(t), u(t), \theta), \quad t \leq T_0 \quad (4)$$

なる関数 g によって近似的に知られていると仮定する。ここで、 g は過去の、観測値、制御指令、定数によって定義される関数であり、一般には非線形な経験モデルである。また、エネルギー保存則や運動方程式

などで明らかに成り立つ因果関係による将来の予測モデルも実システムを正確に制御するために重要である。ここで、この Fuzzy 制御を適用しようとしているシステムは、すでに人間によって運転され、制御ノウハウが得られているのであるから、可制御なシステムであるとし、経験モデルによって定数の推定、制御結果の予測が可能であると仮定する。

4.3 推定部の機能

推定部では、過去の観測値・制御指令に基づき、現在の応答を最もうまく説明できる対象システムの定数を推定する。ここで用いる経験則は、「対象システムの定数を θ_k と仮定したとき、経験モデル g から求めた観測値の推定値 (y) が観測した値とよく一致 (Y_k) しているならば、システム定数は θ_k である」の集まりで記述する。これを、以下の Fuzzy 推定則 E で定式化する。

$$\begin{aligned} (E_1) & \text{ If } (\theta \text{ is } \theta_1 \rightarrow y \text{ is } Y_1) \\ & \text{ then } \theta \text{ is } \theta_1 \\ & \vdots \\ (E_k) & \text{ If } (\theta \text{ is } \theta_k \rightarrow y \text{ is } Y_k) \\ & \text{ then } \theta \text{ is } \theta_k \\ & \vdots \\ (E_K) & \text{ If } (\theta \text{ is } \theta_K \rightarrow y \text{ is } Y_K) \\ & \text{ then } \theta \text{ is } \theta_K \end{aligned}$$

ここで、 y の値は過去の観測値および制御指令を経験モデル g ((4)式) に代入して求めた値であり、システムを特徴づける定数の数が複数個ある場合には、それらを決定しうるだけの個数を評価するよう可同定性を十分に考慮する必要がある。また、 $Y_1 \sim Y_K$ は「正確に一致」「うまく一致」といった言葉の意味を Fuzzy 集合化したものである。

4.4 判断部の機能

判断部では、現在の対象システムの定数 θ 、過去の観測値・制御指令に基づき、現在出力しようとする制御方策 U を決定する。ここで、用いる経験則は、「いまの状態で、制御方策 U_m を仮定したとき、経験モデル g から求めた制御目的 q が、満足 (Q_m) できるならば、制御方策を U_m とする」の集まりで記述する。これを、以下の Fuzzy 制御則 D で定式化する。

$$\begin{aligned} (D_1) & \text{ If } (U \text{ is } U_1 \rightarrow q \text{ is } Q_1) \\ & \text{ then } U \text{ is } U_1 \\ & \vdots \\ (D_m) & \text{ If } (U \text{ is } U_m \rightarrow q \text{ is } Q_m) \\ & \text{ then } U \text{ is } U_m \\ & \vdots \\ (D_M) & \text{ If } (U \text{ is } U_M \rightarrow q \text{ is } Q_M) \\ & \text{ then } U \text{ is } U_M \end{aligned}$$

ここで、 $Q_1 \sim Q_M$ は制御目的を「十分に満足」「大体満足」といった運転者の主観に基づく評価を Fuzzy

集合化したものである。

4.5 実行部の機能

実行部では、判断部で決定した制御方策 U に従い、一般にはスカラー量である対象システムに対する制御指令 u を決定する。ここでは、比較的単純な条件反射的に人間が行っている運転を想定しており、経験則は、「制御方策 U_n が選択されていれば、これに基づいて制御指令 u_n を決定する。」の集まりで記述する。これを、以下の Fuzzy 実行則 P で定式化する。

$$\begin{aligned} (P_1) & \text{ If } (U_1 \text{ is selected}) \\ & \text{ then } u \text{ is } u_1 \\ & \vdots \\ (P_n) & \text{ If } (U_n \text{ is selected}) \\ & \text{ then } u \text{ is } u_n \\ & \vdots \\ (P_N) & \text{ If } (U_N \text{ is selected}) \\ & \text{ then } u \text{ is } u_N \end{aligned}$$

ここで、 u_n は現在および過去の観測値に基づき制御方策 U_n を演算した結果である。ここで実行する制御方策としては、その動作パラメータを指定された、PID や I-PD 制御方式が考えられる。

5. 提案 Fuzzy 制御方式の伝達関数モデルへの適用

ここで提案した Fuzzy 制御方式は、実システムにおける人間の制御活動を計算機により実現しようとするものであり、対象システムの動特性が概略や部分的にしかわからず、人間の経験による操作が有効である場合に適する。しかし、これらの対象に対する制御は対象システムの特長を経験則化も重要なファクタとなり Fuzzy 制御の特長を明確に示すことがむずかしい。そこで本論文では、提案した制御方式を、実システムの近似として有効であり制御理論の適用例として一般的である、むだ時間を入力にもつ定位性プロセス²⁰⁾へ適用する。また、むだ時間およびシステム・ゲインが大幅に変化する場合についてシミュレーションを行い、Fuzzy 制御の有効性を検討する。

5.1 問題の記述

Fig. 3 に示す伝達関数モデルを考える。この制御対象は、

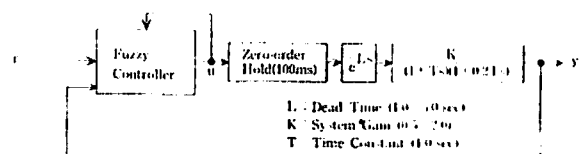


Fig. 3 Block diagram of the fuzzy Controller for a transfer function model

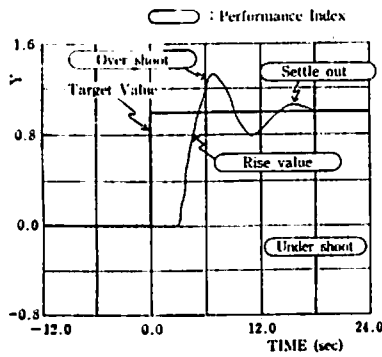


Fig. 4 Control purposes and performance indices

$$G(s) = \frac{K}{(1+Ts)(1+0.2Ts)} \cdot e^{-Ls} \quad (5)$$

なる伝達関数で表わされる、制御入力に対して L 秒のむだ時間をもつ定位性プロセスである。ここで、制御対象の各パラメータについて、時定数 (T) が 1.0 秒、むだ時間 (L) が名目値 3.0 秒、変化範囲 1.0~5.0 秒、システム・ゲイン (K) が名目値 1.0、変化範囲 0.5~2.0、なる値をとるとした。制御目的としては、オーバーシュート、アンダーシュート、立ち上がり時間、整定誤差を評価する (Fig. 4)。以下、むだ時間 (L) とシステム・ゲイン (K) の値は、未知であるが、その変化範囲は既知であるとして、制御系を考える。

5.2 Fuzzy 制御方式の適用

(1) 経験モデル

対象システムの構造が既知であることから、推定または仮定した対象システムのむだ時間 L およびゲイン K に基づき、サンプリング時間を 0.1 秒とした状態遷移行列 Φ を作り、これによるサンプル値制御系のモデル

$$X(t+0.1) = \Phi \cdot X(t) + \Psi \cdot u(t-L) \quad (6)$$

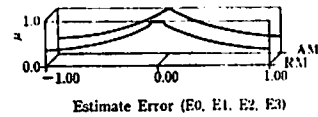


Fig. 5 Membership functions of fuzzy estimation

$$y(t) = C \cdot X(t) \quad (7)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.905, & 0.075 \\ 0.0 & , & 0.607 \end{bmatrix}$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0.004 \\ 0.079 \end{bmatrix}, \quad C = [5.0K, 0.0]$$

を経験モデルとした。

(2) 推定部

(a) 推定指標の Fuzzy 集合化

ここでは、むだ時間 (L) の変化が最長 5.0 秒であることから、6.0 秒前の観測値 $y(t_0-6.0)$ と現在までの制御指令 $u(t_0-6.0) \sim u(t_0)$ に対して (6), (7) 式の経験モデルを適用し、4.5 秒前、3.0 秒前、1.5 秒前、および現在の観測値 y の推定値、

$$E_3 = y(t_0-4.5), \quad E_2 = y(t_0-3.0),$$

$$E_1 = y(t_0-1.5), \quad E_0 = y(t_0),$$

を求め、それぞれ「うまく一致 (RM)」と「正確に一致 (AM)」の評価を Fuzzy 集合で定義した (Fig. 5)。

(b) Fuzzy 推定則

むだ時間 L およびシステム・ゲイン K の変化範囲から、むだ時間に関して 2.0 と 4.0 秒を、システム・ゲインに関して 0.75 と 1.5 を、システム定数の基本的仮定値として用い、さらに現在の推定値に対して $\pm 20\%$ 変化させた値をシステム定数の候補として、1 秒ごとに評価し、むだ時間の推定値 EL 、システム・ゲインの推定値 EK を求める。上記 Fuzzy 集合に基づき

Table 1 Fuzzy estimation rules

1.	If ($E0$ is RM and $E1$ is RM and $E2$ is RM and $E3$ is RM) Then (EK is * 1.00 and EL is * 1.00)
2.	If ($E0$ is AM and $E1$ is AM and $E2$ is AM and $E3$ is AM) Then (EK is 0.75 and EL is * 1.00)
3.	If ($E0$ is AM and $E1$ is AM and $E2$ is AM and $E3$ is AM) Then (EK is 1.50 and EL is * 1.00)
4.	If ($E0$ is AM and $E1$ is AM and $E2$ is AM and $E3$ is AM) Then (EK is * 1.00 and EL is 2.00)
5.	If ($E0$ is AM and $E1$ is AM and $E2$ is AM and $E3$ is AM) Then (EK is * 1.00 and EL is 4.00)
6.	If ($E0$ is AM and $E1$ is AM and $E2$ is AM and $E3$ is AM) Then (EK is * 0.80 and EL is * 1.00)
7.	If ($E0$ is AM and $E1$ is AM and $E2$ is AM and $E3$ is AM) Then (EK is * 1.20 and EL is * 1.00)
8.	If ($E0$ is AM and $E1$ is AM and $E2$ is AM and $E3$ is AM) Then (EK is * 1.00 and EL is * 0.80)
9.	If ($E0$ is AM and $E1$ is AM and $E2$ is AM and $E3$ is AM) Then (EK is * 1.00 and EL is * 1.20)

作成した Fuzzy 推定則を Table 1 に示す。ここで、*の記号は、現在の値に定数を乗算することを表わす。

(3) 判断部

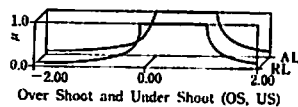
判断部では、指定されたシステム定数 (K : ゲイン, L : むだ時間) に基づき、実行部に対する、制御方策を評価し最適な制御方策を決定する。

(a) 判断部の Fuzzy 集合

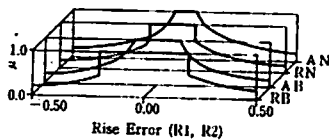
ここでは、ステップ入力に対する以下の応答を評価する。

(i) オーバーシュート量 (OS) およびアンダーシュート量 (US) (Fig. 6(a))

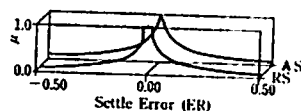
- ・オーバーシュート量が 10% 以下:
OS is AL
- ・オーバーシュート量が約 10% 以下:
OS is RL
- ・アンダーシュート量が 10% 以下:
US is AL
- ・アンダーシュート量が約 10% 以下:



(a) Membership functions of over shoot and under shoot



(b) Membership functions of rise value



(c) Membership functions of settle out

Fig. 6 Membership functions of fuzzy decision

US is RL

(ii) 立ち上がり量 (R1, R2) (Fig. 6 (b))

- ・10 秒後には $\pm 20\%$ 以内に立ち上がる:
R1 is AB
- ・10 秒後には約 $\pm 20\%$ 以内に立ち上がる:
R1 is RB
- ・18 秒後には $\pm 10\%$ 以内に立ち上がる:
R2 is AN
- ・18 秒後には約 $\pm 10\%$ 以内に立ち上がる:
R2 is RN

(iii) 整定誤差 (ER) (Fig. 6 (c))

目標値の変化後 24 秒から 1 秒間の誤差を評価する。

- ・24 秒後には $\pm 2\%$ 以内に整定している:
ER is AS
- ・24 秒後には約 $\pm 2\%$ 以内に整定している:
ER is RS

ただし、現在時刻が 20 秒を過ぎると、それに 5 秒を加えた時刻より 1 秒間の誤差を評価する。

(b) Fuzzy 判断則

制御方策としては、実行部で用いる 10 ms のサンプリング周期で動く PID 制御系の制御定数を決定する。ここで、積分制御の定数 (DI) は 2.7, 微分制御の定数 (DD) は 0.3, の初期値のままとした。比例制御のゲイン DP を、0.1, 0.3, 0.5 を基本的仮

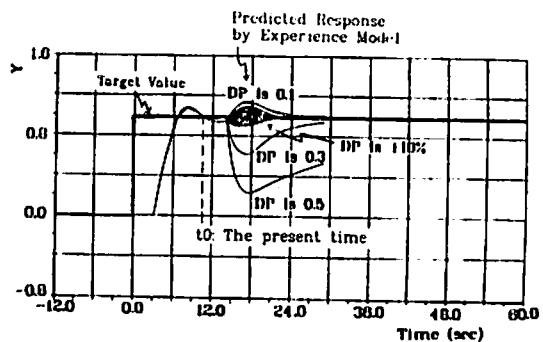


Fig. 7 Predictions of control responses using a system model

Table 2 Fuzzy decision rules

1.	If (OS is RL and US is RL and ER is RS and R1 is RB and R2 is RN) Then (DP is * 1.00 and DI is * 1.00 and DD is * 1.00)
2.	If (OS is AL and US is AL and ER is AS and R1 is AB and R2 is AN) Then (DP is 0.10 and DI is * 1.00 and DD is * 1.00)
3.	If (OS is AL and US is AL and ER is AS and R1 is AB and R2 is AN) Then (DP is 0.30 and DI is * 1.00 and DD is * 1.00)
4.	If (OS is AL and US is AL and ER is AS and R1 is AB and R2 is AN) Then (DP is 0.60 and DI is * 1.00 and DD is * 1.00)
N.	If (OS is AL and US is AL and ER is AS and R1 is AB and R2 is AN) Then (DP is * KP and DI is * 1.00 and DD is * 1.00) (N=5, 14, KP=1.0±0.2·n, n=1, 5)

定値とし、さらに現在実行している比例制御のゲイン DP の値と、その $\pm 10\%$, $\pm 8\%$, $\pm 6\%$, $\pm 4\%$, $\pm 2\%$ の値 ($DP * KP$, $KP = 1.0 \pm 0.2 \cdot n$, $n = 1, 5$) を候補として上記制御目的を評価する。この評価状況を Fig. 7 に示す。また、上記 Fuzzy 集合に基づき作成した Fuzzy 判断則を Table 2 に示す。

(4) 実行部

判断部によって与えられた制御方策（比例、積分、微分定数）に基づき、目標値と現在の観測値の偏差から PID 制御の計算を行い、制御指令 $u(t)$ を 0.1 秒ごとに出力する。Fuzzy 実行則としては、以下を用いる。

If (U is selected) then u is u_i

この例では、実行則は一つであるため、本ルールは常に選択され PID 制御の計算結果 u_i を制御指令として出力する。

5.3 制御結果と検討

上記 Fuzzy 制御コントローラを、システム・ゲイン $K=1.0$ でむだ時間 L を 1 秒から 5 秒まで変えた場合 (Fig. 8(a)) と、むだ時間 L を 3 秒でシステム・ゲイン K を 0.5 から 2.0 まで変えた場合 (Fig. 8(b)) について、25 秒間のステップ入力を加えた結

果を示す。Fig. 8 (a), (b) とともに最初は対象システムの定数が未知であり、真のむだ時間が経過しさらに 2, 3 秒たたないと正しい評価ができないため応答が振られているが、18 秒過ぎからは安定な制御となっており、制御対象のパラメータが未知の場合でも状況を見ながら適切な制御指令を選択していくという、人間の制御をうまくアルゴリズム化できているといえる。

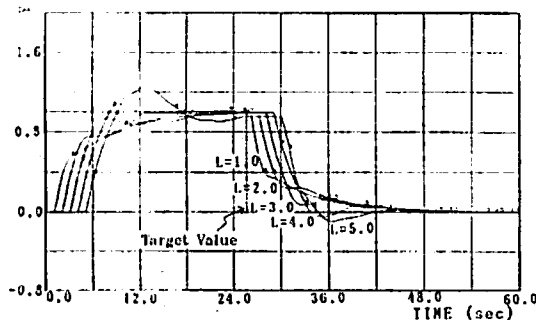
6. おわりに

先に提案し、実システムへの適用を進めている予見 Fuzzy 制御方式を、(1) 推定、(2) 判断、(3) 実行、の 3 段階に階層化した人間の制御戦略に基づく制御方式に拡張し、伝達関数で表わされる対象への適用例を示した。ここで提案した制御方式は人間の経験則をそのままアルゴリズム化しコントローラは、その経験則に基づき制御指令を決定する。そのため、人間は推論状況により、コントローラが現在何を考え、どのような評価のもとにどうしようとしているのかを、時々刻々表示しチェックすることが可能であり、より人間に近づいたコントローラの実現に有効である。

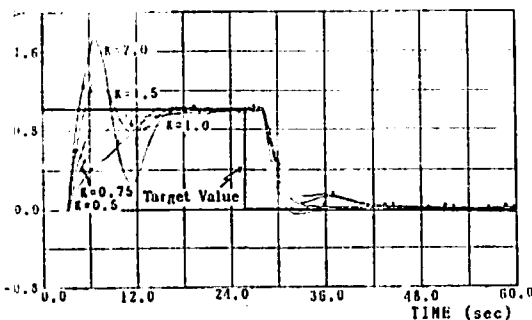
終りに、本研究を進めるに当たり有益なご意見をいただいた、(株)日立製作所システム開発研究所 川崎淳所長、井原廣一副所長（現在、同宇宙技術推進本部 主管技師長）、春名公一第 1 部部長ならびに宮本捷二主任研究員（現在、(株)日立製作所研究開発部）をはじめとする関係者の方々に深謝いたします。

参考文献

- 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-3-1, 23/44 (1973)
- 2) 菅野道夫: あいまい集合と理論の制御への応用, 計測と制御, 18-2, 150/160 (1979)
- 3) E. A. Mamdani: Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, 121-12, 1585/1588 (1974)
- 4) C. P. Pappis: A Fuzzy Logic Controller for a Traffic Junction, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, SMC-7-10, 707/712 (1977)
- 5) L. P. Holmblad and J. J. Ostergaard: Control of a Cement Kiln by Fuzzy Logic, Fuzzy Information and Decision Process (M. M. Gupta & E. Sanchez.), 389/399, North-Holland Company (1982)
- 6) 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, 28-10, 597/604 (1984)
- 7) 前田, 村上: Fuzzy Logic コントローラによる自動車の速度制御, 計測自動制御学会論文集, 21-9, 984/989 (1985)
- 8) 安信, 宮本, 井原: Fuzzy 理論による列車自動運転制御, 第 20 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 467/468 (1981)
- 9) 安信, 宮本, 井原: Fuzzy 制御による列車定位置停止制



(a) The time lag is changed
System gain: $K=1.0$
Time lag : $L= 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ (s)



(b) The system gain is changed
System gain: $K=0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0$
Time lag : $L=3.0$ (s)

Fig. 8 Sumaries of simulation results

- 御, 計測自動制御学会論文集, 19-11, 873/880 (1983)
- 10) S. Yasunobu, S. Miyamoto and H. Ihara: Fuzzy Control for Automated Train Operation System, 4th IFAC/IFIP/IFRS Int. Conf. on Transportation Systems, 39/45 (1983)
 - 11) 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, 28-10, 605/613 (1984)
 - 12) 菅野, 高木: あいまい制御, 計測と制御, 22-1, 84/86 (1983)
 - 13) 菅野道夫: あいまい理論 (I)~(IV), 計測と制御, 22-1~6 (1983)
 - 14) 嘉納秀明: 最適制御理論—その設計との谷間, システムと制御, 26-3, 125/134 (1982)
 - 15) 須田信英: 制御系設計手順の標準化の試み, システムと制御, 26-11, 682/690 (1982)
 - 16) 安信, 河野, 宮本: 制御目的を評価する予見 Fuzzy 制御方式, 第2回知識工学シンポジウム資料, 121/124 (1984)
 - 17) S. Yasunobu, et al.: Application of Predictive Fuzzy Control to Automatic Train Operation Controller, Proc. of IECON' 84, 657/662 (1984)
 - 18) S. Yasunobu and S. Miyamoto: Automatic Train Operation System by Predictive Fuzzy Control, Industrial Applications of Fuzzy Control (M. Sugeno ed.), 1/18, North-Holland (1985)
 - 19) 安楢誠二: 予見 Fuzzy 制御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, 22-10, 1066/1073 (1985)
 - 20) 荒木, ほか: むだ時間システムを料理する—数値例による検討, システムと制御, 28-5, 327/340 (1984)