

## 予見 Fuzzy 制御方式による列車自動運転\*

安信 誠二\*\*・宮本 捷二\*\*・井原 廣一\*\*

### A Predictive Fuzzy Control for Automatic Train Operation\*

by Seiji YASUNOBU\*\*, Shoji MIYAMOTO\*\* and Hirokazu IHARA\*\*

In this paper, a predictive fuzzy control scheme is proposed which predicts the result and selects the most likely control rule based on a skilled human operator's experience. It is applied to an automatic train operation (ATO) which controls a train from starting till stopping at a target point of the next station. The newly developed fuzzy ATO controller evaluates safety, riding comfort, traceability of target velocity, saving energy, running time, and the accuracy of a stop gap. The simulation result shows it can operate a train in the same way as a skilled operator does; it is able to operate a train robustly for a change in environment and save over 10 % of powering energy compared with a conventional ATO controller.

#### 1. はじめに

近年、従来人間が行ってきた制御(運転)を、人間に代わってマイクロコンピュータなどで自動化しようという試みがさかんに行われている。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 Fuzzy 集合を用いて定量化し制御を行う方法として、Mamdani らによって Fuzzy 制御が提案され<sup>1,2</sup>、プラントの制御<sup>3</sup>、交差点の制御<sup>4</sup>、セメント・キルンの制御<sup>5</sup>、浄水場の薬剤注入制御<sup>6</sup>、自動車の速度制御<sup>7</sup>などに応用されてきた。しかし、これらの Fuzzy 制御では、対象システムの制御目的として当然含まれてくる制御結果の予測値を考慮した制御の実現が困難であった。

そこで、筆者らはこの問題を解決するものとして、人間の断片的な経験則を、複数の目的に対応した Fuzzy 評価因数を用いて定式化するとともに、ある制御を行った結果を予測することによって、最良の評価を与える制御指令を決定する予見 Fuzzy 制御方式を提案するとともに、列車を運転士に代わって駅の所定の目標停止位置に

停止させる列車定位置停止制御へ適用し、その有効性を示した<sup>8,9</sup>。本論文ではこの方式を運転士に代わって、列車を運転する列車自動運転システム全体へ適用した結果について述べる。

列車自動運転システムは国内外各地の地下鉄、モノレール、新交通システムなどで実用化されつつあるが、これらの実用システムのほとんどは目標速度パターンを発生し、それに列車速度を PID 制御を基本とした制御方式で追従させる方式である<sup>10~15</sup>。なお、最適制御をもちいた方式<sup>16,17</sup>、距離または時間と列車速度により一定のパターンで制御指令を出力するオープンループ制御方式<sup>18</sup>、現在の速度から目標地点に停止させるために、最適な制御指令を出力する方式<sup>19</sup>などが提案・実験されている。

しかし、これらの制御方式による列車運転を、熟練運転士による運転と比較してみた場合、平均的で正確な運転は可能であるが、目標速度へ正確に追従するために制御指令を頻繁に変化させる必要があり、乗り心地、停止精度、あるいは消費電力量といったような人間が重要視する評価指標を、十分に考慮した制御とはなっていないのが実情である。

本論文では、予見 Fuzzy 制御方式を適用した(1)安全性、(2)乗り心地、(3)制限速度により決まる目標速度への追従性、(4)消費電力量、(5)走行時間、(6)停止精度を評価指標とする列車自動運転システムについて述

\* 原稿受付 1984.2.2

\*\* (株)日立製作所 システム開発研究所 Systems Development Laboratory, Hitachi Ltd.: Ohzenji, Asaoku, Kawasaki 215 JAPAN

べる。

さらに、本論文では従来実用してきた PID 制御による列車自動運転との比較を、列車自動運転装置を組み込んだ計算機シミュレーションにより行い、本方式の有効性の検討を行う。

## 2. 予見 Fuzzy 制御方式

### 2.1 制御則の定式化

ここで、制御指令  $u$  がとりうる値の集合を  $C(C_1, \dots, C_n)$  とし、制御の評価指標を  $x, y$  とする。この評価指標  $x, y$  に対する良い、悪いといった評価を、メンバーシップ関数  $\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y)$  を用いた Fuzzy 集合で定義する。この時、評価指標  $x, y$  の全体集合を  $U, V$  と置くと、各評価は次式の Fuzzy 集合として表わせる。

$$A_i = \int_U \mu_{A_i}(x)/x \quad (1)$$

$$B_i = \int_V \mu_{B_i}(y)/y \quad (2)$$

予見 Fuzzy 制御では、次式で定式化する制御則  $R_i$  : 「この時点で制御指令  $u$  を  $C_i$  とした場合、評価指標  $x$  は  $A_i$  (良い) であり、評価指標  $y$  は  $B_i$  (非常に良い) であるならば、この制御則  $R_i$  を採用し制御指令として  $C_i$  を出力する」の集まりを時々刻々評価しながら制御を行う。

$$R_i : \text{"If } (u \text{ is } C_i \rightarrow x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i) \text{ then } u \text{ is } C_i \text{"} \quad (3)$$

この制御則の前提部 (If 部) のメンバーシップ関数を  $\mu_{P_i}(C_i : x, y)$  とおくと、その Fuzzy 集合は、

$$P_i = \int_{U \times V} \mu_{P_i}(C_i : x, y)/(x, y) \quad (4)$$

$$= A_i \times B_i : u = C_i \quad (5)$$

と表わせ、Fig. 1 中央のピラミッド状のものとなる。

### 2.2 制御指令決定方法

ここで制御を行っている時刻を  $t$  とし、制御則  $R_i$  ((3)式) について考える。この時刻  $t$  において、制御指令 " $u$  is  $C_i$ " を実行した場合に、評価指標  $x$  および  $y$

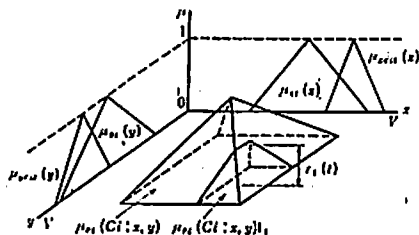


Fig. 1 Evaluation of a fuzzy control rule

の値がどのようになるかを、対象システムの部分的知識 (あいまいモデル) に基づき予測し、その結果がメンバーシップ関数  $\mu_{x_{ait}}(x), \mu_{y_{ait}}(y)$  で定義される Fuzzy 集合  $X(C_i, t), Y(C_i, t)$  で求めたとする。この時刻  $t$  での制御則の前提部  $P_i|t$  は、

$$P_i|t = (A_i \cap X(C_i, t)) \times (B_i \cap Y(C_i, t)) \quad (6)$$

となり、Fig. 1 に示すピラミッドの一部分となる。したがって、時刻  $t$  での  $P_i|t$  の最大値は、

$$r_i(t) = \sup_{x, y \in U \times V} \mu_{P_i}(C_i : x, y)|t \quad (7)$$

によって求めることができる。この時刻  $t$  における各制御則  $R_i$  の評価値  $r_i(t)$  から、全体制御則  $R$  の評価値  $r(t)$  は、

$$r(t) = \max_i r_i(t) = r_j(t) \quad (8)$$

により求まる。これにより、全体制御則  $R$  の内で最も確かな制御則  $R_j$  が決定できる。

予見 Fuzzy 制御によるコントローラでは、この現在時刻  $t$  において最も確かな制御則  $R_j$  で仮定している制御指令  $C_j$  を出力として選択し、対象システムを制御する。

## 3. 列車自動運転制御とモデリング

列車自動運転システム (ATO : Automatic Train Operation System) は、マイクロコンピュータなどにより、運転士に代わり二つの駅間の列車の制御を行うシステムである (Fig. 2)。このシステムは、列車の最低限の安全を確保する ATC (Automatic Train Control) システムが作動しない領域で列車の制御を行う。列車自動運転システム全体の構成を Fig. 3 に示す。ATO 車上システムは、速度発電機による距離パルス、ATC 車上システムからの制限速度信号、ある情報をもつ地上子を通じたことを示す地上子検出信号、地上の運行管理システムからの走行情報を入力とし、駆動系・制動系への制御

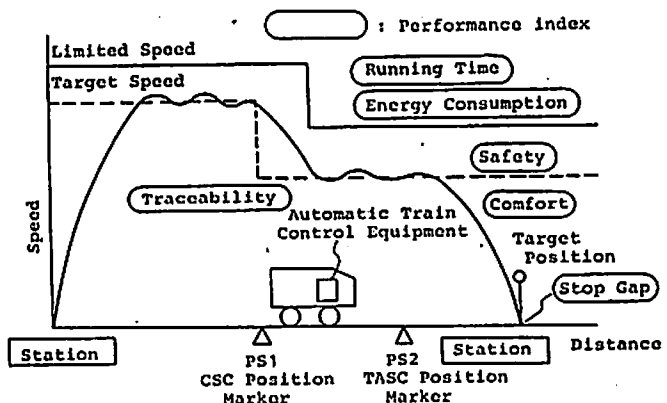


Fig. 2 Outline of automatic train operation

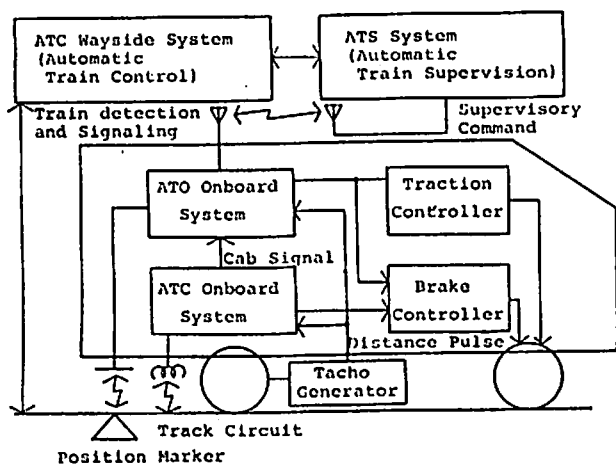


Fig. 3 Typical configuration of ATO

指令(ノッチ)を出力するものである<sup>10,11</sup>。

本論文では、駆動系・制動系への力行・ブレーキ指令として、離散的な加減速度に対応したノッチ指令を考える。駆動系・制動系では、この指令と応荷重装置による列車重量から、実際の駆動力・制動力を出力する。

#### 4. 運転士による列車運転

本論文では、運転士の制御に関する知識をアルゴリズム化した列車自動運転システムの開発を目的としている。そこでわれわれがこれまで PID 制御などにより、列車自動運転システムを開発してきた経験<sup>14,20~22</sup>から、運転士の制御を考えてみる。この制御は、駅を出発してから制限速度を守りながら、列車を走行させる駅間走行制御(CSC: Constant Speed Control)と、次駅の停止目標に列車を停止させる定位置停止制御(TASC: Train Automatic Stop Control)の二つに大別することができる。

##### 4.1 駅間走行制御

運転士は出発指令を受けると直ちに最大ノッチで加速し、走行中は制限速度よりも少し低めに目標とする走行速度を設定し、列車速度を調節する。もし走行中、前方に速度が制限されている区間があれば、その開始地点での目標とする走行速度を考える。また、与えられた次駅の到着予定時間よりも早く着きそうな時は、惰行運転による消費電力量の節約を考え制御を行う。

具体的には、時々刻々以下のことを評価しながら制御ノッチ(指令)の選択を行う。

(C-1) 安全性と乗り心地の確保のため；制限速度を越えそうになった時は、現在ノッチと非常ブレーキの中間を出力し、制限速度をオーバーした時の ATC システムにより発生する、非常ブレーキのショックを緩くす

る。

(C-2) 省エネルギー化を図るため；惰行運転をしても走行時間を守る地点を走行している時、力行、ブレーキ・ノッチとも出力しない。

(C-3) 走行時間短縮のため；制限速度よりはるかに低い速度の時、最大加速指令を出力する。

(C-4) 乗り心地を良くするため；現在のノッチのまま目標とする速度を守れるとき、そのノッチを保持する。

(C-5) 走行速度を守るため；現在のノッチのままでは、目標とする速度を守れそうもない時、±*n*ノッチの内で正確に目標とする速度に列車速度を調節できるノッチを選択する。この時、乗り心地を確保するため前回のノッチ変化の大きさ、経過時間を考えノッチを変更する。

#### 4.2 定位置停止制御

運転士は、列車が駅の手前に置かれた標識(定位置停止制御を開始すべき地点を示し、以後B地点と呼ぶ)を通過するとブレーキをかけ始め、乗り心地と停止精度を評価して制御する。具体的には、時々刻々以下のことを評価しながら制御ノッチ(指令)の選択を行う。

(T-1) 乗り心地を良くするため；B地点を過ぎ、そのままうまく停止できそうな時は、そのノッチを保持する。

(T-2) 走行時間を短縮し、乗り心地を良くするため；B地点の手前ではブレーキをかけずに、B地点を通過すると、少しブレーキをかける。

(T-3) 停止精度を良くするため；B地点を過ぎ、そのままうまく停止できないと判断した場合には、±*n*ノッチ以内で正確に止まれるノッチを選択する。

### 5. 予見 Fuzzy 制御列車自動運転システム

#### 5.1 評価指標の Fuzzy 集合

各評価指標の定義に先立ち、評価指標を定義するために必要となる記号を定義する。

$t$  : 時間(sec),  $x(t)$  : 列車位置(m),  $v(t)$  : 列車速度(m/s),  $N(t)$  : 制御ノッチ(正の時力行, 負の時ブレーキ),  $X_t$  : 停止目標位置(m),  $V_t$  : 制限速度値より決まる目標速度(m/s),  $T_t$  : 駅間走行予定時間(sec),  $X_d$  : 制限速度低下地点(m),  $t_s$  :  $X_d$  までの所要時間(sec),  $X_b$  : 惰行制御終了地点(m),  $X_s(v)$  : 列車速度  $v(t)$  に対応したB地点の位置(m),  $t_b = (X_s(v) - x(t)) / v(t)$  : B地点までの余裕時間(sec),  $R_t$  : 余裕時間  $t_b$  の許容範囲(sec),  $t_c$  : ノッチ変化後の経過時間(sec),  $N_c$  : 直前のノッチ変化段数,  $C_b$  : ノッチ変化抑止時間(sec),  $N_p$  : 選

対象の制御ノッチ,  $V_p(N_p)$ : 制御ノッチ  $N_p$  を出力した場合の予測速度 (m/s),  $V_s$ : 許容速度偏差 (m/s),  $A(N_p)$ : 制御ノッチ  $N_p$  を出力した場合の推定加速度 (m/s<sup>2</sup>),  $X_p(N_p) = -v(t)^2 / (2 \cdot A(N_p)) + x(t)$ : 制御ノッチ  $N_p$  を出力した場合の停止予測位置 (m),  $X_s$ : 許容停止誤差 (m).

つぎに, 評価指標をメンバシップ関数を用いて, Fuzzy 集合として定義する場合に便利であり, またマイクロ・コンピュータによるオンライン処理に適する直線傾斜と双曲線による基本関数  $A, B, C$  を定義する. Fuzzy 集合のメンバシップ値は評価の満足度を表わす. そこで, 最大満足度の 1.0, 半分の 0.5, 1/4 の 0.25 のそれぞれを与える評価指標の値を用いて, その形状を規定することにした. ここで,  $A$  は  $b > 0$  の時  $a$  以上で 1.0,  $x = a - b$  で 0.5,  $x = a - 3 \cdot b$  で 0.25 となり,  $b < 0$  の時  $a$  以上で 1.0,  $x = a + b$  で 0.5,  $x = a + 1.5 \cdot b$  で 0.25,  $x < a + 2 \cdot b$  で 0 となる関数,  $B$  は  $a$  以下で 1.0 となる  $A$  と対称な関数,  $C$  は  $A$  と  $B$  を重ね凸形とした関数である.

$$A(x, a, b) = \begin{cases} \frac{b}{a+b-x} : x < a \\ 1.0 : a \leq x \end{cases} \quad (b > 0)$$

$$\begin{cases} 0.0 : x < a + 2 \cdot b \\ 1.0 + \frac{a-x}{2 \cdot b} : a + 2 \cdot b \leq x < a \\ 1.0 : a \leq x \end{cases} \quad (b < 0)$$

$$B(x, a, b) = A(2a - x, a, b)$$

$$C(x, a1, b1, a2, b2) = \min(A(x, a1, b1), B(x, a2, b2))$$

(1) 安全性 (S) の評価指標の定義

安全性については, 前方で現在の速度  $v(t)$  以下に制限速度がなっている場合, 制限速度低下地点  $X_d$  までの所要時間  $t_s$  ( $t_s = (X_d - x(t)) / v(t)$ ) で危険性を評価する.

- (a) 危険 (SD):  $\mu_{SD}$   
 $\mu_{SD}(t_s) = B(t_s, -T_s, -T_s)$
- (b) 安全である (SS):  $\mu_{SS}$   
 $\mu_{SS}(t_s) = A(t_s, 0.0, -T_s)$

(2) 乗り心地 (C) の評価指標の定義

乗り心地については, 前後方向の振動に関する基準は明確ではないが, 上下方向の振動に対する基準<sup>23</sup>, および乗車経験から頻りにノッチを変化させると, 高振動数のショックを乗客に与えるため乗り心地が悪いとし, 直前にノッチを変化させた段数  $N_c$  と, その後ノッチを一定に保っている時間  $t_c$  で評価する.

- (a) 乗り心地が良い (CG):  $\mu_{CG}$   
 $\mu_{CG}(t_c, N_c) = A(t_c, N_c, -N_c + C_c)$
- (b) 乗り心地が悪い (CB):  $\mu_{CB}$

$$\mu_{CB}(t_c, N_c) = B(t_c, C_c, -N_c + C_c)$$

(3) 省エネルギー (E) の評価指標の定義

省エネルギーの評価については, 駅間の特定の地点において, 所定の地点  $X_k$  まで惰行制御を行った場合の走行時間の増加を知識として持ち, これと出発時に与えられた駅間走行の余裕時間とを比較して, 省エネ走行が可能な場合には, 現在の列車位置  $x(t)$  から  $X_k$  までを省エネ走行区間として評価対象とする. なお,  $E_s$  は省エネ評価指標の Fuzzy 集合を定義するのに用いる定数であり,  $X_k + E_s$  の地点で「省エネ走行ができる」との値が, 0.5 に低下しているとする.

- (a) 省エネ走行ができる (ES):  $\mu_{ES}$   
 $\mu_{ES}(x(t)) = B(x(t), X_k, -E_s)$
- (b) 省エネ走行ができない (EN):  $\mu_{EN}$   
 $\mu_{EN}(x(t)) = A(x(t), X_k + E_s, -E_s)$

(4) 走行速度 (T) の評価指標の定義 (Fig. 4)

走行速度については, 予測速度  $V_p$  が目標速度  $V_t$  に対し, 許容速度誤差  $V_s$  の範囲以内に入ることを「うまく走行する」と定義し, 目標速度  $V_t$  に一致することを「正確に走行する」と定義した.

- (a) うまく走行する (TG):  $\mu_{TG}$   
 $\mu_{TG}(V_p(N)) = C(V_p(N), V_t(t) - V_s, V_s, V_t(t) + V_s, V_s)$
- (b) 正確に走行する (TA):  $\mu_{TA}$   
 $\mu_{TA}(V_p(N)) = C(V_p(N), V_s, V_s, V_t, V_s)$
- (c) 走行速度が低い (TL):  $\mu_{TL}$   
 $\mu_{TL}(V_p(N)) = B(V_p(N), V_t/2, V_t/4)$

(5) 走行時間 (R) の評価指標の定義

走行時間については, 列車速度に対応したブレーキ開始地点 (B地点) より手前で, 定位置停止制御を開始すると走行時間が長くなることから, B地点より停止目標側を定位置停止制御ゾーン, 出発駅側を自由ゾーンと定義し評価に用いる.

- (a) 定位置停止制御ゾーン内にいる (RT):  $\mu_{RT}$   
 $\mu_{RT}(t_s) = B(t_s, 0.0, -R_t)$
  - (b) 自由ゾーン内にいる (RF):  $\mu_{RF}$   
 $\mu_{RF}(t_s) = A(t_s, 2 \cdot R_t, -R_t)$
- (6) 停止精度 (G) の評価指標の定義 (Fig. 5)

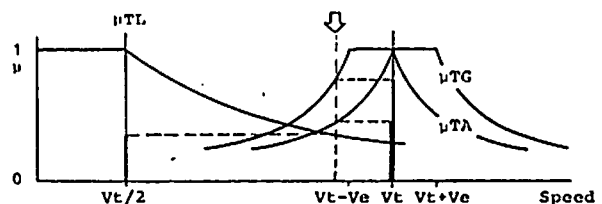


Fig. 4 Membership function of the traceability

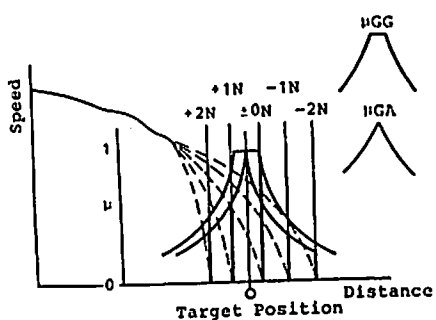


Fig. 5 Membership function of the stop accuracy

停止精度については、停止目標  $X_t$  に対する予測停止位置  $X_p(N_p)$  で評価する。

(a) うまく停止する(GG) :  $\mu_{GG}$

$$\mu_{GG}(X_p(N)) = C(X_p(N), X_t - X_t, X_t, X_t + X_t, X_t)$$

(b) 正確に停止する(GA) :  $\mu_{GA}$

$$\mu_{GA}(X_p(N)) = C(X_p(N), X_t, X_t, X_t, X_t)$$

### 5.2 Fuzzy 制御則の決定

4. で定性的に記述した定位置停止列車運転制御のための経験則を、上記 Fuzzy 集合により定式化し、Fuzzy 制御則を決定する。ここで、DN は現在の制御ノッチの値に対する変化分を、PN は力行ノッチを、BN はブレーキ・ノッチを表わす。また、非常ブレーキを  $B_{max}$ 、最大加速指令を P7 と記す。

4. の (T-1) で述べた乗り心地を良くするための経験則を、予見 Fuzzy 制御の形式に書き直すと、「ブレーキ・ノッチを保持した時、B地点を過ぎており、そのままうまく停止できるならば、ブレーキ・ノッチを保持する」となる。この制御則の各部分は、

ブレーキ・ノッチを保持した時 → DN is 0

B地点を過ぎており → R is RT

うまく停止できる → G is GG

に対応しており、すなわち

(T-1) If (DN is 0 → R is RT and G is GG)  
then DN is 0

なる予見 Fuzzy 制御則となる。4. (T-2), (T-3) の経験則からも同様にして、

(T-2.1) If (N is 0 → R is RF and C is CG)  
then N is 0

(T-2.2) If (N is B1 → R is RT and C is CG)  
then N is B1

(T-3) If (DN is n → R is RT and C is CG and G is GA) then DN is n  
( $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3$ )

なる定位置停止制御のための予見 Fuzzy 制御の制御則が決定できる。

同様にして、駅間走行制御についても

(C-1) If (N is  $(N(t) + B_{max})/2$  → S is SD)  
then N is  $(N(t) + B_{max})/2$

(C-2) If (N is 0 → S is SS and C is CG and E is ES) then N is 0

(C-3) If (N is P7 → S is SS and C is CG and T is TL) then N is P7

(C-4) If (DN is 0 → S is SS and T is TG) then DN is 0

(C-5) If (DN is n → S is SS and C is CG and T is TA) then DN is n  
( $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3$ )

なる制御則が決定できる。

### 5.3 マイクロコンピュータによる ATO 制御装置の実現

駅間走行制御 (CSC)、定位置停止制御 (TASC) それぞれの制御則を、たとえば 100 msec 毎に評価すること

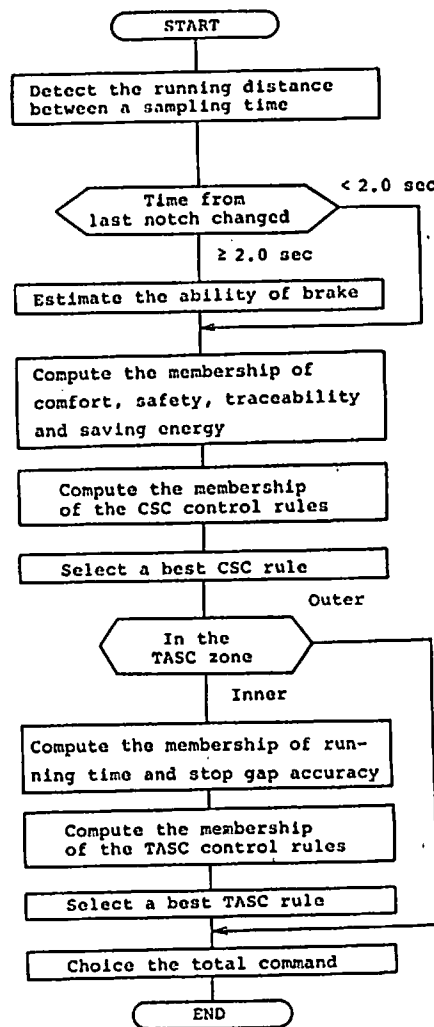


Fig. 6 The flowchart of the fuzzy controlled ATO algorithm

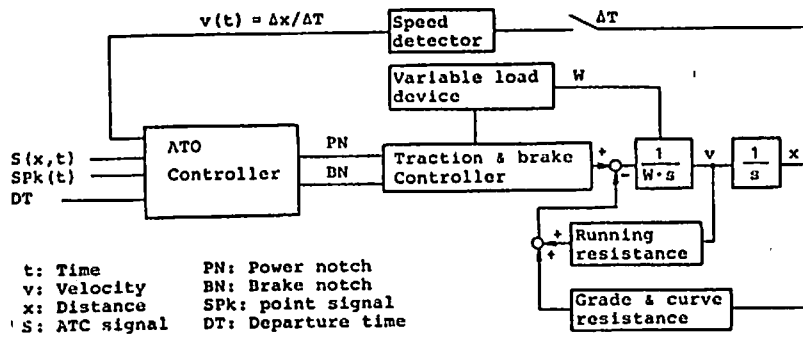


Fig. 7 Block diagram of the ATO control system

によって、二つの制御による最適制御指令を独立に求めることができる。このCSC・TASC二つの制御指令の内減速側（力行ノッチの場合は小さい方、ブレーキ・ノッチの場合は大きい方）を選択し、駆動系・制動系への力行・ブレーキ指令として出力する。本方式をマイクロコンピュータにより実現した列車自動運転装置の処理フローを、Fig. 6 に示す。

6. シミュレーションによる比較・検討

開発した予見Fuzzy制御列車自動運転プログラムを、現在PID制御により実用化している列車自動運転装置に組み込み、予見Fuzzy制御、PID制御、二つの方式の性能を比較した。この比較は、両方の列車自動運転装置に実際の運転に即した条件を与えることにより、シミュレーションにより実施した (Fig. 7, Table 1)。なお、列車定位置停止制御単独ではブレーキ性能、勾配条件が大きく変動した場合でも、停止誤差の標準偏差を1/3、ノッチ変化回数を1/2とした正確で乗り心地良い制御が実現できることをすでに示した<sup>8</sup>。

6.1 シミュレーション条件と結果

列車自動運転において、制御性能を定量的に評価する重要な指標となるのが、消費電力量と駅間走行時間である。ここでは全体的に+10%、0% (平坦)、-10%の勾配 (10%は1,000mで10m上昇) をもつ1,000m

Table 1 Values assumed in the simulation

Train length	: 83.5 m
Train weight	: 129.0 ton
Running resistance	: $1.97 + 0.016 \cdot v + 0.00084 \cdot v^2$ kg/ton
Number of steps of traction	: 7 steps
Maximum acceleration of traction	: 3.3km/h·s
Number of steps of brake	: 9 steps
Maximum deceleration of brake $B_{max}$	: 5.14 km/h·s
Dead time of braking system	: 0.2 sec
1st order time lag of braking system	: 0.6 sec

の駅間を想定し、走行時間を80sec, 85sec, 90sec, 95sec, 100secと指定した場合の消費電力量 (力行時の積算値) を Fig. 8 に、平坦 (0%) で85secを指定した場合の結果を Fig. 9 に示す。また、列車自動運転では列車の走行に伴う勾配による外力の変化、回生制動ブレーキから空気制動ブレーキへの切り替えに伴う制動力の急変といった環境の変動に対する制御の頑強性 (ロバスト性) も、重要なファクタとなる。ここではPID制御、予見Fuzzy制御それぞれに対して、駅の手前60mの地点からそれまで平坦であった勾配を、-20%の急な下り勾配に変化させてシミュレーションを行った結果を示す (Fig. 10)。

6.2 シミュレーション結果の検討

Fig. 7 より、Fuzzy制御による列車自動運転装置は、PID制御により従来実用化している装置と比較して、(1)同じ消費電力量であればより少ない走行時間で、(2)同じ走行時間であればより少ない消費電力量で、走行可能 (たとえば、Fig. 9 より0%、85secの場合には、Fuzzy制御8.91kWhに対し、PID制御10.03kWh)

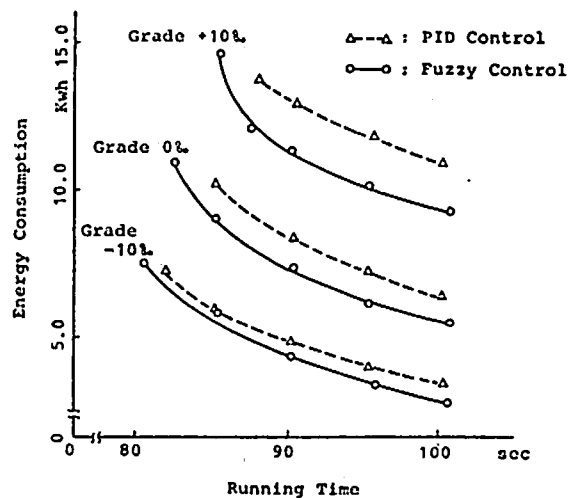
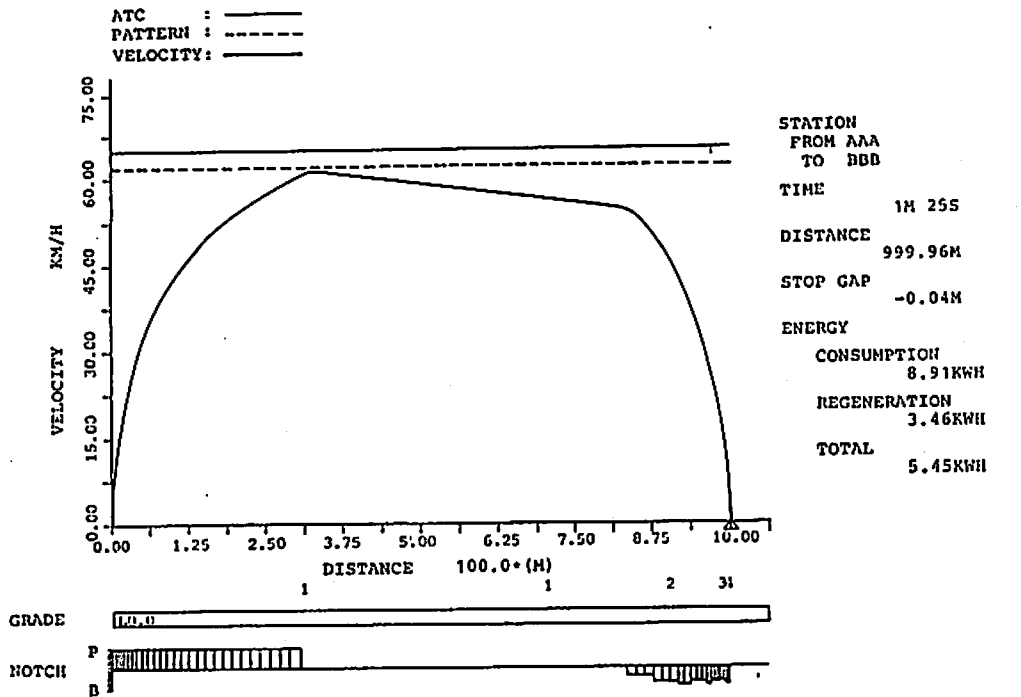
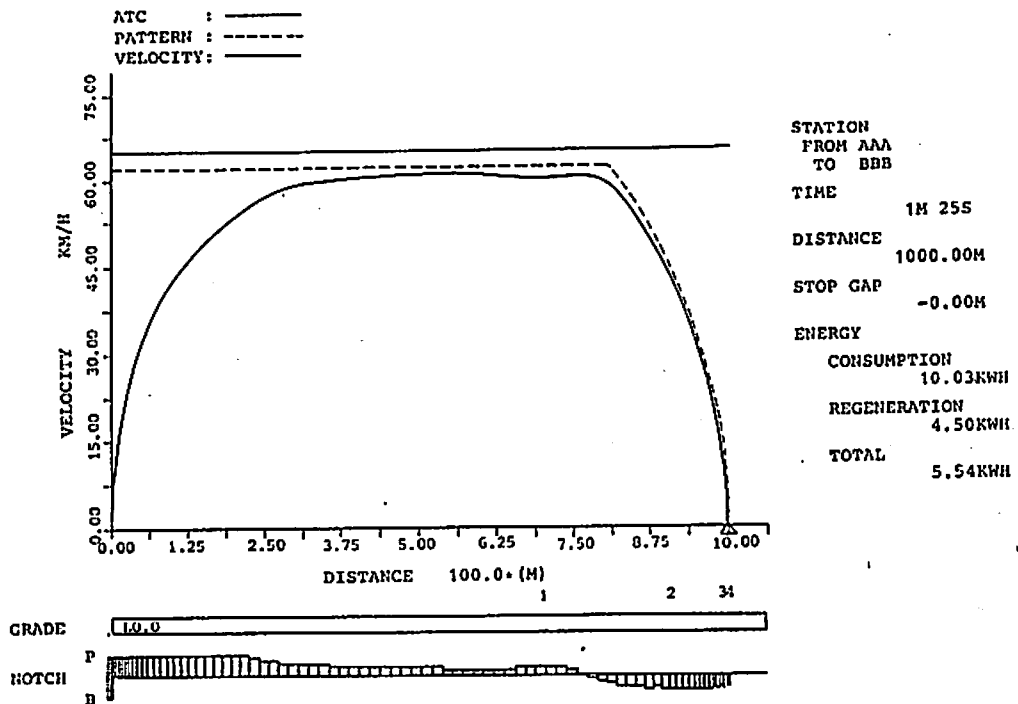


Fig. 8 Summary of simulations



(a) A result by the fuzzy ATO



(b) A result by the PID ATO

Fig. 9 Running curves of simulation (Grade=0%, Running time=85sec)

である。その度合いは、下り勾配 (-10%) では少なく、上り勾配 (+10%) となるほど大きくなっており、平均して10%を超える省エネルギーの効果があることがわかる。なお、Fig. 9において力行時の電力量からブレーキ (回生) 時の理想的な回生電力量を引いたトータル電力量では、約2%の省エネとなるが、実際の車両にお

いては、ブレーキ抵抗の挿入や空気ブレーキとの併用による熱的損失や、周囲の列車の状況により、回生できる電力量は限られており、ここでは確実に省エネ効果が期待できる力行時の消費電力量について比較した。

この結果で、下り勾配で消費電力量にそれほど差がないのは、下り勾配による加速力と走行抵抗による減速力

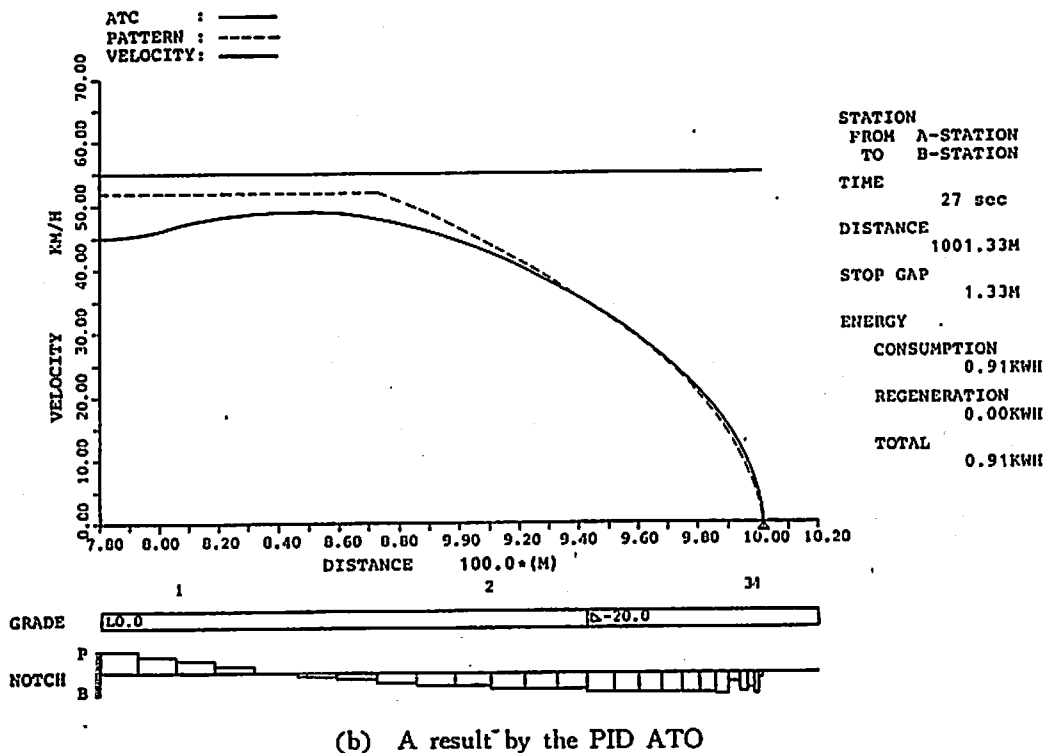
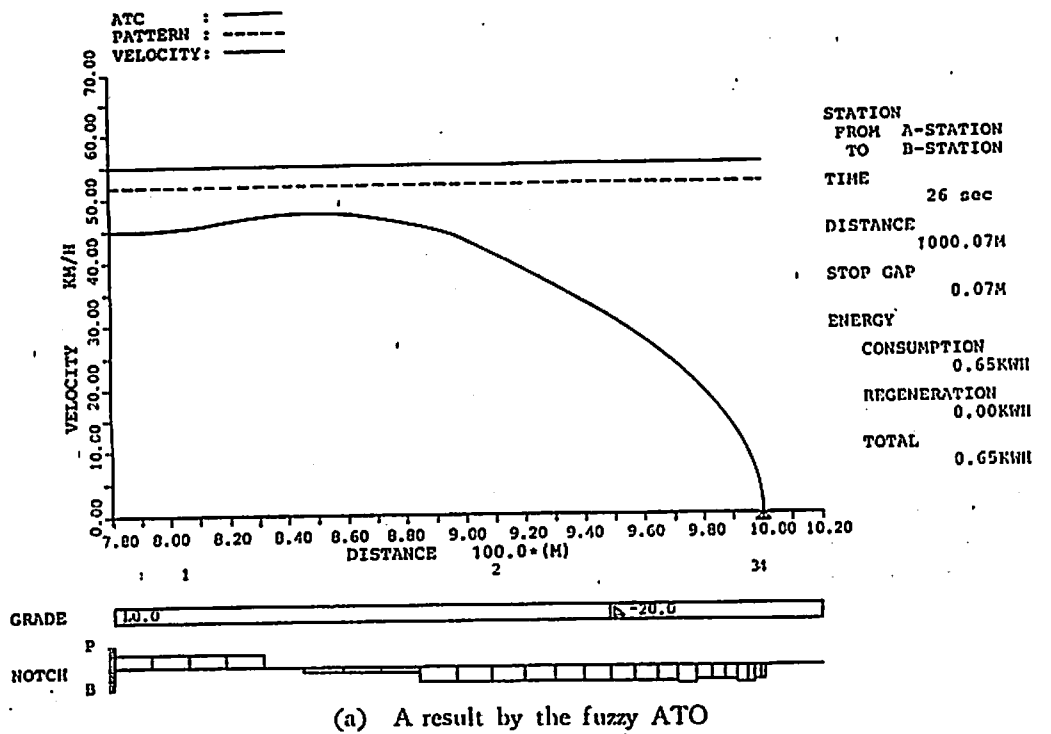


Fig. 10 Results of simulation for robust control (The grade was changed from level to -20% at 60m short of the next station)

がほぼ均衡し、PID 制御でもエネルギー的に良好な制御が行われており、Fuzzy 制御による省エネルギー運転の効果が少なくなっているためと考える。

また、Fig. 10 のロバスト性の比較では、従来の PID 制御による一定減速度で変化する目標速度パターン追従

方式では、停止間際に列車の走行に伴い目標速度が急激に変化する上に、外乱として与えた-20%の下り勾配による加速力が加わり、1.33mの停止誤差を生じ、しかも停止間際のブレーキ・ノッチ指令の変動も大きい。これに対して、予見 Fuzzy 制御による方式では、ブレーキ・



ノッチ指令の変化と最終的な停止精度を評価しながら制御を行うとともに、ノッチ変化が安定している場合には、ブレーキ力を推定するという人間の制御を模擬しており、ここで与えたような環境の急変に対してもうまく対応した制御が可能となっている。

## 7. おわりに

本論文では、多次元にわたるあいまいな評価指標に基づく人間の制御を、アルゴリズム化できる予見 Fuzzy 制御方式を列車自動運転に適用し、運転士の経験則に基づき、(1)安全性、(2)乗り心地、(3)追従性、(4)消費電力量、(5)走行時間、(6)停止精度を評価しながら、列車を走行させる列車自動運転システムについて述べた。シミュレーションの結果、開発した予見 Fuzzy 制御方式により、正確で乗り心地良く、環境の変動に強い上に、従来実用化している PID 制御方式と比較して、力行時の消費電力量を10%以上節約した省エネルギー運転が可能な列車自動運転が実現でき、熟練運転士と同等の制御が行えることがわかった。

終わりに、本研究の機会を与えてくださった日立製作所システム開発研究所所長川崎淳博上をはじめとする関係者の方々、ならびに列車自動運転装置の開発を推進頂いた日立製作所水戸工場 高岡征氏、清水朝行氏、関野真一氏に感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) L.A. Zadeh : Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes ; IEEE Trans., SMC-3-1, pp. 28~44 (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巻, 2号, pp. 150~160 (昭55)
- 3) E.A. Mamdani : Applications of Fuzzy Algorithms for Control of a Simple Dynamic Plant ; Proc. IEE, Vol. 121, No. 12, pp. 1585~1588 (1974)
- 4) C.P. Pappis : A Fuzzy Logic Controller for a Traffic Junction ; IEEE Trans., SMC-7-10, pp. 707~712 (1977)
- 5) L.P. Holmblad & J.J. Ostergaard : Control of a Cement Kiln by Fuzzy Logic ; Fuzzy Information and Decision Processes (M.M. Gupta & E. Sanchez (eds.)), North-Holland Company, pp. 389~399 (1982)
- 6) 高木, 菅野：あいまい制御則の設計と実システムへの応用；第1回知識工学シンポジウム資料, pp. 39~44 (昭.58)
- 7) 前田, 村上, 戸田：あいまい推論による Fuzzy Logic コントローラの設計；第1回知識工学シンポジウム資料, pp. 133~136 (昭.58)
- 8) 安信, 宮本, 井原：Fuzzy 制御による列車定位置停止制御；計測自動制御学会論文集, 19巻, 11号, pp. 873~880 (昭.58)
- 9) S. Yasunobu, S. Miyamoto & H. Ihara : Fuzzy Control for Automated Train Operation System ; 4th IFAC/IFIP/IFRS Int. Conf. on Transportation Systems, pp. 439~445 (1983)
- 10) 井原：地下鉄における計画と制御技術；電気学会雑誌, 99巻, 11号, pp. 1056~1060 (昭.54)
- 11) 宮本：中京軌道輸送システムの制御と管理技術；電気学会雑誌, 102巻, 1号, pp. 20~24 (昭.57)
- 12) 北川, 安波, 栗原, ほか：札幌市東西線自動運転システム；第13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, pp. 226~230 (昭.51)
- 13) 下浦, 三木：神戸新交通システムの概要と自動列車運転；システムと制御, 25巻, 3号, pp. 175~184 (昭.56)
- 14) 藤倉, 能見, 安信, ほか：列車の自動運転制御方式；電気学会全国大会, pp. 2205~2206 (昭.52)
- 15) D. Ferbeck : The Lille Underground—First Application of the VAL System ; 4th IFAC/IFIP/IFRS Int. Conf. on Transportation Systems, pp. 47~52 (1983)
- 16) 半田：時間・速度制御における自動運転方式；電気学会論文誌, C-98-3, pp. 83~88 (昭.53)
- 17) 荒屋：新交通システムにおける定位置停止制御；計測自動制御学会論文集, 15巻, 1号, pp. 1~8 (昭.54)
- 18) 石井, 饗庭, 大森：CVS における定位置停止方式；第11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, pp. 586~591 (昭.49)
- 19) 下浦, 磯田, 三木：KCV 試験線の定位置停止制御について；第13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, pp. 533~537 (昭.51)
- 20) 宮本, 井原, 刈谷, ほか：軌道輸送システム用計画設計サポートシステム, TRANSPLAN ; 日立評論, 60巻, 10号, pp. 59~64 (昭.53)
- 21) S. Miyamoto, H. Ihara & M. Nohmi, et al. : TRANSPLAN—A Computer Assisted Planning and Designing System for Urban Guideway Transit System ; 1978 Summer Computer Simulation Conference (1978)
- 22) S. Miyamoto, M. Nohmi & S. Yasunobu : JUMPS—A Design Support System for Urban Automated Guideway Transit System ; 1978 Int. Conf. on Cybernetics and Society, pp. 776~781 (1978)
- 23) 電気学会編：電気鉄道, 電気学会 (昭.35)