

# Fuzzy 制御による列車定位置停止制御†

安 信 誠 二\*・宮 本 捷 二\*・井 原 廣 一\*

## A Fuzzy Control for Train Automatic Stop Control

Seiji YASUNOBU, Shoji MIYAMOTO and Hirokazu IHARA

A predictive fuzzy control that uses rules based on a skilled human operator's experience is proposed and applied to train automatic stop operations.

In recent years automatic train operation (ATO) systems using a microcomputer instead of a human operator have been developed for new transit systems including subway, monorail and new public-transit systems.

Some problems of the train operation are that it is controlled by performance indices such as, safety, riding comfort of passengers, and accuracy of the stop gap. So, train operation is a nonlinear control function. Up to now, this system has been developed by linearized control using a target pattern. However, it is difficult to control the train in a manner similar to a human operator.

In this paper, we propose a predictive fuzzy control which selects the most likely control rule from the sets of control rules. It is described as follows.: "If ( $u$  is  $C \rightarrow x$  is  $A$  and  $y$  is  $B$ ) then  $u$  is  $C$ ". And the proposed fuzzy control is applied for a train automatic stop control system which evaluates comfort, accuracy of a stop gap and running time.

The simulation result of our newly developed fuzzy control system shows it can directly adjust a system performance as desired in the same way as that controlled by a skilled operator, so it is able to stop a train comfortably and accurately.

**Keyword:** fuzzy set theory, fuzzy control, transportation system, PID control, automatic train operation, predictive control

### 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。ここで対象としている列車自動運転システムは、その代表的な例であり、運転士に代って列車を出発させ、つぎの駅の目標停止位置に停止させるシステムである。この列車自動運転は、最近開業されている国内各地の地下鉄、モノレール、新交通システムなどで実施されてきている<sup>1),2)</sup>。

この列車の運転を制御系として見た場合、つぎのような特徴がある。

- (1) 入力データ（速度情報）の分解能が低い。
- (2) ブレーキ装置などの制御対象の特性が、時間と共に変動する。
- (3) 勾配などの路線条件が場所により異なり、列車の位置によって外力が変化する。
- (4) 制御に対する評価指標が、乗り心地良く、精度良く止める、といったように、多次元であり、非線形な制御系となる。

このように、ラフな入力データをもち 制御対象の特性と外乱がダイナミックに変化するうえに、非線形な制御系となる列車自動運転に対し、従来実用化されているのは、平均的な対象モデルを考え、このモデルによる走行パターン（目標速度）を発生し、このパターンに追従するよう PID 制御を行う線形化パターン追従による方式である<sup>3),4),5)</sup>。なおこの線形化パターン追従の方法として、最適制御理論の適用が提案され計算機シミュレーションが行われている<sup>6),7)</sup>。さらに、距離又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>8)</sup>、現在の速度から目標地点に停車させるために最適な制御指令を出力する方式<sup>9)</sup>、などが提案され実験されている。

しかし、これら従来方式においては、先に述べた列車運転制御の重要な評価指標である、乗り心地、停止精度などを直接評価できない。たとえば、線形化パタ

† 第21回計測自動制御学会学術講演会で発表（昭57・7）  
第1回知識工学シンポジウムで発表（昭58・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 March 16, 1983)

(Revised July 26, 1983)

ーン追従方式ではあらかじめ定めたパターンへの速度誤差平方和最小などの追従性が制御上の評価指標となっているわけで、乗り心地については、パターンの形状、制御定数で間接的に保証しているにすぎず、また、停止精度については、計算機シミュレーション又は実際の車両を用いた実験を行うことによりその分布を求めている。

いっぽう、熟練運転士が注意深く手動で運転すると、自動運転と比較してブレーキ・ノッチ(制御指令)の変化が少なく乗り心地の良い、しかも停止精度の良い制御ができる。したがって、この運転士が行っている制御をアルゴリズム化できれば、列車運転制御の評価指標を総合的に満足する制御が実現できると考えられる。

本論文では、この運転士が行っている制御をアルゴリズム化するため、人間の経験から作った将来の予測を含んだ制御則を Fuzzy 集合として評価し、最も評価値の高い制御指令を選択する予見 Fuzzy 制御方式を提案すると共に、列車自動運転の中で最も複雑な制御を必要とする列車定位置停止制御 (TASC: Train Automatic Stop Control) に適用した結果について述べる。

さらに本論文では、提案方式と従来の PID 制御による方式とをシミュレーションにより比較し、提案した予見 Fuzzy 制御方式の有効性を検討する。

## 2. 列車定位置停止と運転士による運転

### 2.1 列車定位置停止制御

ここで Fuzzy 制御を適用する列車定位置停止制御とは、列車が特定の地点を通過したことを示す地点情報と速度発電機による一定サンプリング時間内の走行距離とからブレーキの制御を行い次駅の所定の目標位置に停止させる制御である。(Fig. 1)

ここでは、制御系への入力を、最近の車両で採用さ

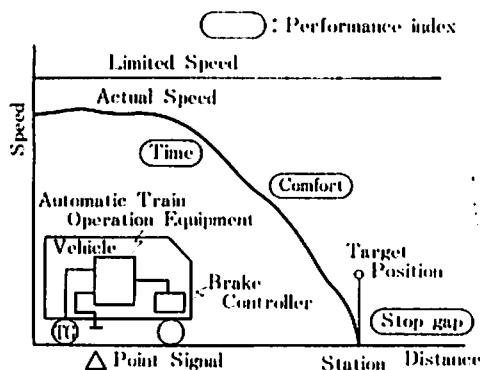


Fig. 1 Train automatic stop control

れている離散的な減速度に対応したブレーキ・ノッチ指令とする。この制御系では、ブレーキ・ノッチ指令に対する実際の車両の減速度を応荷重装置により測った列車重量を用いて一定に保とうとするが、エア・ブレーキの空気圧の変動、列車重量の測定誤差、ブレーキ・パッドの摩擦係数の変動、などによって定格値に対する実際のブレーキ減速度に  $\pm 30\%$  程度の誤差を生じ、列車の位置により変化する勾配条件によって  $10\%$  (1000m で 10m 上昇) 当り  $0.32 \text{ km/h}\cdot\text{s}$  の誤差を生じる。また、速度の検出は、車輪の回転から発生する距離パルスから求めるが、通常この距離パルスの分解能は 1cm 程度でありサンプリング時間を 100 m sec とすると、 $0.36 \text{ km/h}$  程度の悪い分解能の検出精度となる。このように、ここでの制御対象は、対象システムのパラメータおよび路線の勾配条件による外乱が変動するうえに、入力データがラフであり所定の停止目標に列車を停止させる制御(運転)が困難である。

### 2.2 運転士による運転の考察

つぎに、このような列車を運転する場合に運転士がどのようなことを考えながら、列車の定位置停止制御を行っているかを定性的に記述する。以下に述べる制御方法は、我々がこれまで列車自動運転システムを開発<sup>10), 11), 12)</sup>してきた経験から作成したものである。

運転士による列車定位置停止制御では、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、定位置停止のためのブレーキをかけ始める。また、ブレーキ・ノッチを出力し、かつそのノッチが安定している場合には、ブレーキ・ノッチに対する実際の列車の減速度を推定する。さらに、時々刻々以下のことを考えながらブレーキ・ノッチを決定して行く。

- (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。
- (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・ノッチをかける。
- (3) 停止精度を良くするため; B地点を通過し、そのままうまく停止できないと判断した場合は、 $\pm 1$ ノッチ以内で正確に止まれるノッチを選択する。

以上のように、運転士は、時々刻々に(1)乗客の乗り心地、(2)走行時間、(3)停止精度の予測値、を考えながら予見制御として列車の定位置停止制御を行っ

ている。

### 3. 予見 Fuzzy 制御の提案

人間の定性的な評価指標を定量化する方法として、Zadeh によって提案された Fuzzy 集合論、Fuzzy 理論、の意志決定への応用<sup>13)</sup>をきっかけに、Mamdani らによって Fuzzy 制御が提案<sup>14)</sup>され、プラントの制御<sup>15)</sup>、交差点の制御<sup>16)</sup>などに応用されている<sup>17)</sup>。

これら従来行われている Fuzzy 制御の方法は、“If  $x$  is  $A_i$  and  $y$  is  $B_i$ , then  $u$  is  $U_i$ ”なる形の制御則  $R_i$  の集合  $R=(R_1, \dots, R_i, \dots, R_n)$  と、“ $x$  is  $A$  and  $y$  is  $B$ ”なる形の入力から、Fuzzy 推論 (fuzzy reasoning) により制御指令  $u$  を推論する形式である<sup>14), 15), 18)</sup>。この形式の Fuzzy 制御は、多次元にわたる評価指標をもとに、あらかじめ決められた制御則の集合  $R$  によって制御指令  $u$  を決定する多次元状態フィードバック制御に人間の経験を取り入れる方式として有効である。しかし、この方式では、人間が制御を行う時に考えているように、今ある制御指令を与えたとして、それによる制御結果を評価しながら、制御目的に最適な制御指令を決定する制御の実現が困難であった。

そこで、列車の停止精度などを予測し評価する制御を行うため、以下に述べる予見 Fuzzy 制御を提案する。ここで提案する予見 Fuzzy 制御は、“If ( $u$  is  $C_i \rightarrow x$  is  $A_i$  and  $y$  is  $B_i$ ) then  $u$  is  $C_i$ ”なる形の制御則  $R_i$  の集合  $R=(R_1, \dots, R_i, \dots, R_n)$  に対し、各制御則に含まれる制御指令  $C_i$  を行った場合の各評価値  $(x, y)$  を予測し制御則を評価することによって、最も評価値の大きい制御則  $R_i$  の制御指令  $C_i$  によって制御を行う形式である。

ここで提案する予見 Fuzzy 制御では、Mamdani らの Fuzzy 制御と同様に、

- (1) プロダクション・システム的に、制御結果に基づき、(a) 評価指標の定義、(b) 制御則の追加修正、が容易である。

といった特長をもつと同時に、各制御則で評価値を予測し制御指令を選択することから、

- (2) 各評価関数に関連したシステムの部分的知識に基づき予見制御が行える。

などの特長をもつ。

#### 3.1 Fuzzy 集合と Fuzzy 関係

ここで提案する予見 Fuzzy 制御に用いる Fuzzy 集合を、Zadeh<sup>13)</sup>に従いつぎのように定義する。

$A$  を全体集合  $U$  の Fuzzy 部分集合、 $\mu_A: U \rightarrow [0, 1]$  を  $A$  のメンバシップ関数とする。この時、Fuzzy 部分

集合  $A$  を次式で定義する。

$$A = \int_U \mu_A(x)/x \quad (1)$$

(1) 式において、 $x$  は全体集合  $U$  の要素で、 $\mu_A(x)$  はその要素  $x$  のメンバシップ値である。また、“ $x$  is  $A$  and  $y$  is  $B$ ” で表わされる二つの Fuzzy 集合  $A \subseteq U, B \subseteq V$  の直積である Fuzzy 関係を次式で定義する。

$$A \times B = \int_{U \times V} \mu_A(x) \wedge \mu_B(y)/(x, y) \quad (2)$$

以上定義した Fuzzy 集合を用いて、予見 Fuzzy 制御を提案する。

#### 3.2 予見 Fuzzy 制御則の定式化

##### (1) 制御目的の Fuzzy 評価

ここで、制御指令  $u$  が取りうる値の集合を  $C\{u: C_1, \dots, C_i\}$  とし、制御を評価する指標を  $x$  および  $y$  とする。評価指標  $x, y$  に対する、良い、悪い、といったような評価を、メンバシップ関数  $\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y)$  を用いた Fuzzy 集合  $A_i, B_i$  で定義する。評価指標  $x, y$  の全体集合を  $U, V$  と置くと、各評価の Fuzzy 集合は、

$$A_i = \int_U \mu_{A_i}(x)/x \quad (3)$$

$$B_i = \int_V \mu_{B_i}(y)/y \quad (4)$$

で表わせる。

##### (2) 制御則の定式化

つぎに、ここで提案する予見 Fuzzy 制御で時々刻々評価する、「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、この制御則を採用し制御指令として  $C_i$  を出力する」といった制御則  $R$  を以下のように定型化する。

$$R_i: \text{“If } (u \text{ is } C_i \rightarrow x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i) \text{ then } u \text{ is } C_i\text{”} \quad (5)$$

この制御則  $R_i$  の評価を行う前提部 (If 部) を  $P_i$  とし、そのメンバシップ関数を  $\mu_{P_i}(C_i: x, y)$  とおくと、その Fuzzy 集合は、

$$P_i = \int_{U \times V} \mu_{P_i}(C_i: x, y)/(x, y) \quad (6)$$

$$= A_i \times B_i: u = C_i \quad (7)$$

と表わせ、Fig. 2 中央の大きなピラミッド状のものとなる。

実際の制御においては、システムの部分的知識、制御目的にもとづいて、いくつかの制御則を記述し、全体の制御則  $R\{R_1, \dots, R_n\}$  を定義する。

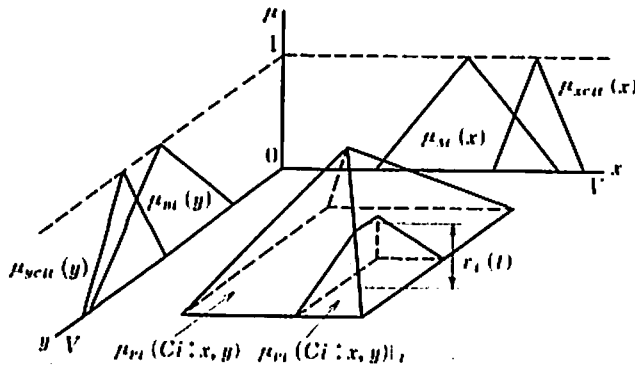


Fig. 2 Evaluation of a fuzzy control rule

3.3 制御指令決定方法

(1) 個々の制御則の評価

(5)式に示す制御則  $R_i$  より、現在時刻  $t$  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  $y$  の値がどのようになるかを、対象システムの部分的知識にもとづき予測する。この予測結果  $X(C_i, t)$ ,  $Y(C_i, t)$  がつきに示すようなメンバシップ関数  $\mu_{xci}(x)$ ,  $\mu_{yci}(y)$  で定義される Fuzzy 集合で求めたとする。

$$X(C_i, t) = \int_y \mu_{xci}(x) / x \quad (8)$$

$$Y(C_i, t) = \int_x \mu_{yci}(y) / y \quad (9)$$

この時、時刻  $t$  における制御則の前提部の Fuzzy 集合を表わす  $P_i|t$  は、

$$P_i|t = (A_i \cap X(C_i, t)) \times (B_i \cap Y(C_i, t)) \quad (10)$$

となり、Fig. 2 に示すように制御則  $R_i$  の前提部  $P_i$  のピラミッドの一部分となる。この時刻  $t$  における制御則前提部  $P_i|t$  の最大値  $Y_i(t)$  を、

$$Y_i(t) = \sup_{x, y \in U \times V} \mu_{rj}(C_i; x, y) \quad (11)$$

によって求める。これは、Fig. 2 に示すように、制御則前提部  $P_i|t$  の Fuzzy 集合の山の高さに相当する値であり、その時刻  $t$  における、制御則  $R_i$  の確からしさの値となる。

(2) 最適制御指令の選択

このようにして求めた時刻  $t$  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  $r(t)$  を

$$r(t) = \max_i r_i(t) = r_j(t) \quad (12)$$

により求める。したがって、全体制御則  $R$  の評価値  $r(t)$  を決定する  $j$  番目の制御則  $R_j$  が最も確からしいことになる。

ここで提案する予見 Fuzzy 制御では、時刻  $t$  において、この最も確からしい制御則  $R_j$  で仮定している “ $u$  is  $C_j$ ” から、制御指令  $u(t)$  を  $C_j$  とする。

4. Fuzzy 制御列車定位置停止制御

2章で述べた経験則による列車定位置停止制御を、3章で述べた Fuzzy 制御により実現するわけであるが、まず評価指標となる、乗り心地、停止精度、走行時分について Fuzzy 集合を定義し、それにもとづいて経験則を Fuzzy 制御則化する。

4.1 評価指標の Fuzzy 集合

評価関数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),  $N(t)$ : ブレーキ・ノッチ,  $X_t$ : 停止目標位置 (m),  $X_s(v)$ : 列車速度  $v(t)$  に対応した B 地点の位置 (m),  $t_s = (X_t - x(t)) / v(t)$ : B 地点までの余裕時間 (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,  $N_p$ : 選択対象のブレーキ・ノッチ,  $x_p(N_p)$ : ブレーキ・ノッチ  $N_p$  を出力した場合の予測停止位置 (m),  $X_e$ : 許容停止誤差 (m).

つぎに評価関数を定義するのに使用するため、定義域を  $(a-b, a+b)$  とする三角形の関数  $L$ , 関数  $L$  で  $a$  より大きい部分と 1.0 とした関数  $F$ , 定義域を  $(-\infty, +\infty)$  とした尖った関数  $A$ , 同じく定義域が  $(-\infty, +\infty)$  で台形状の関数  $G$ , を以下のように定義する。

$$L(x, a, b) = \begin{cases} 0 & : x \leq a-b, a+b \leq x \\ 1 - |x-a|/b & : a-b < x < a+b \end{cases}$$

$$F(x, a, b) = \begin{cases} 0 & : x \leq a-b \\ 1 - |x-a|/b & : a-b < x < a \\ 1 & : a \leq x \end{cases}$$

$$A(x, a, b) = b / (|x-a| + b)$$

$$G(x, a, b) = \begin{cases} 1 & : a-b \leq x \leq a+b \\ b / |x-a| & : x < a-b, a+b < x \end{cases}$$

ここで、 $b > 0$  とする。

(1) 乗り心地 (C) の評価指標の定義 (Fig. 3)

乗り心地については、頻繁にノッチを変化させるのが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持している時間  $t_c$  で評価する。

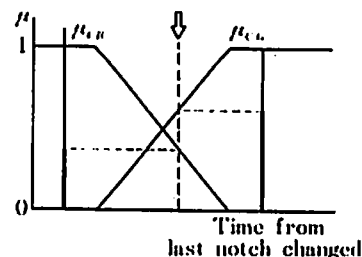


Fig. 3 Membership functions of the comfort

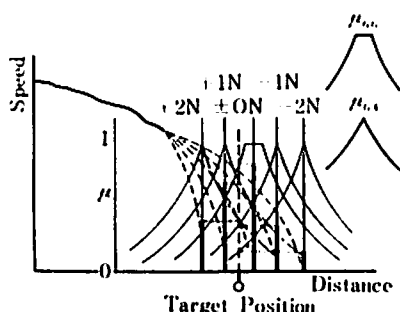


Fig. 4 Membership functions of the stop accuracy

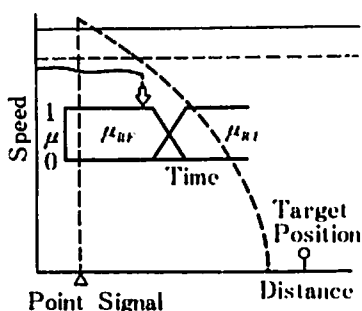


Fig. 5 Membership functions of the running time

(i) 乗り心地が良い (CG)

$$\mu_{CG}(tc, Nc) = F(tc, 1 + Nc/2, Nc/2)$$

(ii) 乗り心地が悪い (CB)

$$\mu_{CB}(tc, Nc) = 1 - \mu_{CG}(tc, Nc)$$

(2) 停止精度(G)の評価指標の定義 (Fig. 4)

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。

(i) うまく停止する (GG)

$$\mu_{GG}(x_P(N_P)) = G(x_P(N_P), X_t, X_e)$$

(ii) 正確に停止する (GA)

$$\mu_{GA}(x_P(N_P)) = A(x_P(N_P), X_t, X_e)$$

(3) 走行時間(R)の評価指標の定義 (Fig. 5)

走行時分については、列車速度に対応したブレーキ開始地点 (B地点) より出発駅側で定位置停止制御を開始すると走行時分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。

(i) 定位置停止制御ゾーン内にある (RT)

$$\mu_{RT}(t_s) = F(t_s, 0, 2)$$

(ii) 自由ゾーン内にある (RF)

$$\mu_{RF}(t_s) = 1 - \mu_{RT}(t_s)$$

#### 4.2 Fuzzy 制御則の決定

2章で定性的に記述した定位置停止制御のための経験則を、上記評価指標の Fuzzy 集合により定式化し、Fuzzy 制御則を決定する。ここで、DN は現在のブレーキ・ノッチの値に対する変化分を表わす。

2章の(1)で述べた乗り心地を良くするための経験

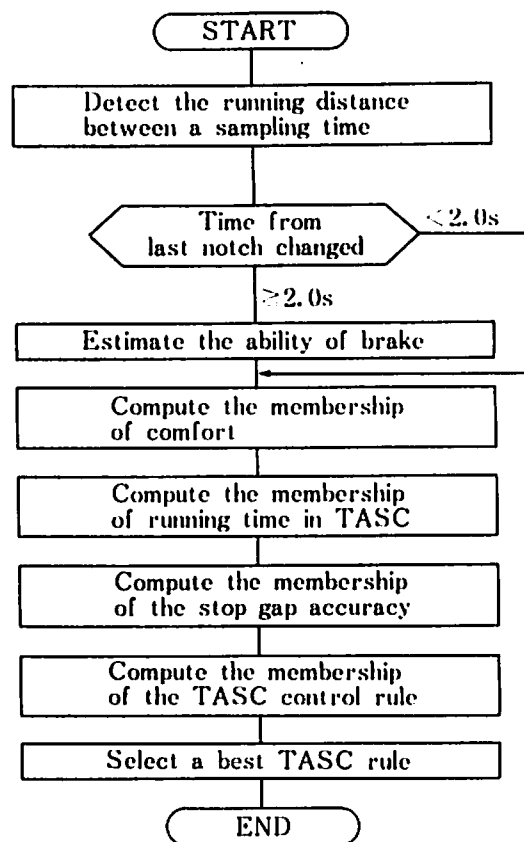


Fig. 6 The flowchart of the fuzzy controlled TASC algorithm

則を、予見 Fuzzy 制御の制御則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、

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

なる Fuzzy 制御則 R となる。2章(2), (3)の経験則からも同様にして、

(2-1) If (N is 0 → R is RF and C is CG) then N is 0.

(2-2) If (N is 1 → R is RT and C is CG) then N is 1.

(3) If (DN is n → R is RT and C is CG and G is GA) then DN is n.  
 (n = ±1, ±2, ±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。

#### 4.3 ブレーキ性能の推定

ここで対象としている列車は、ブレーキ・ノッチに

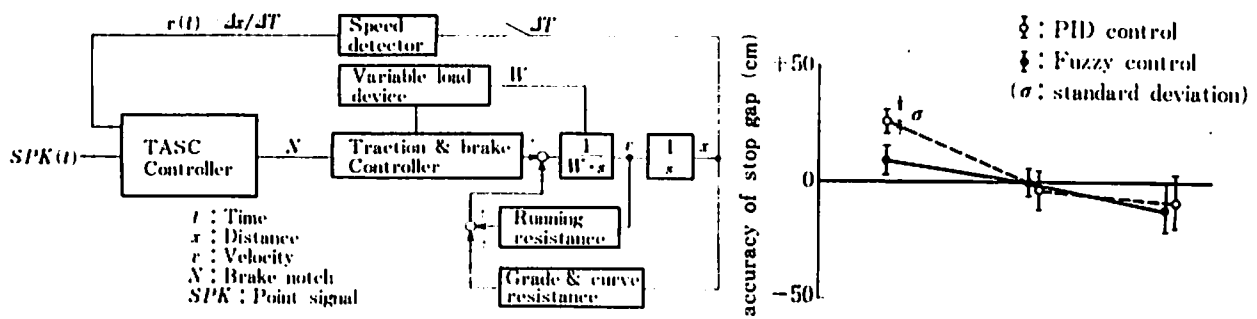
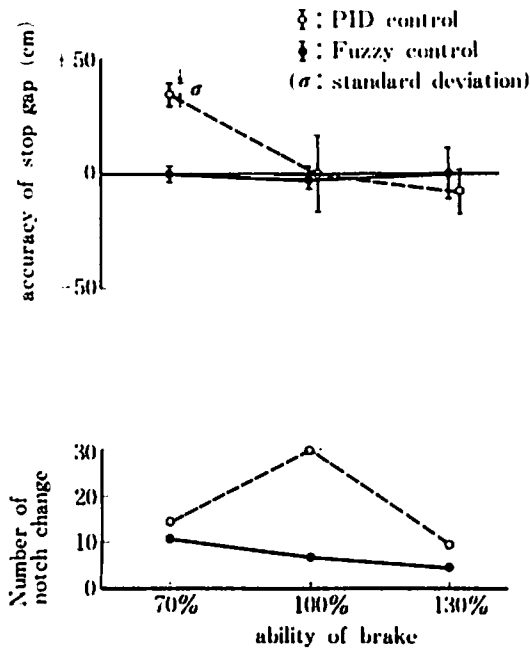


Fig. 7 Block diagram of the TASC control system

Table 1 Values assumed in the simulation

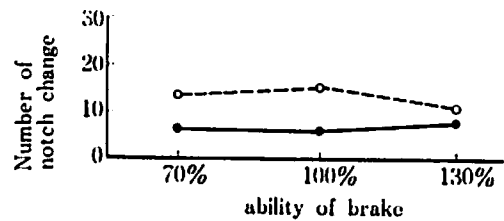
Train length:	83.5 m
Train weight:	129.0 ton
Running resistance:	$1.97 + 0.016 \cdot V + 0.00084 \cdot V^2$ kg/ton
Number of steps of brake:	9 steps
Maximum deceleration of brake $B_m$ :	
nominal	= 5.14 km/h·s
minimum	= 3.6 km/h·s
maximum	= 6.68 km/h·s
Dead time of braking system:	0.2 sec
1st order time lag of braking system:	0.6 sec



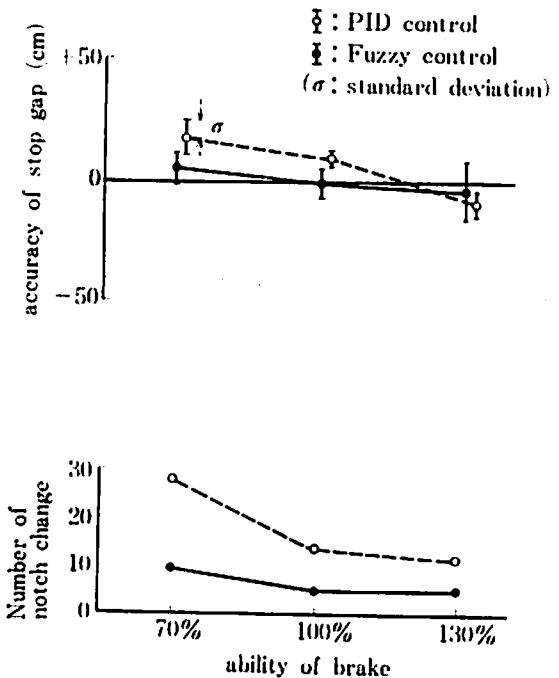
(a) Gradient condition is -5%

対する実際のブレーキ減速度が、制御系自体で定格値に対して  $\pm 30\%$  変動し、さらに路線の勾配によって列車の位置により変化する外乱が加わるとした。このため、列車を正確に制御するためには、ブレーキ・ノッチに対する実際の減速度を推定する必要がある。

これに対し、ここでは運転上の制御を模擬し、ブレーキ・ノッチが一定時間 (たとえば2秒間) 以上変化しなかった場合に、その間の各サンプリング時間毎の



(b) Gradient condition is 0%



(c) Gradient condition is +5%

Fig. 8 Summary of TASC simulation

走行距離により、実減速度を求めブレーキ性能を推定し、各ブレーキ・ノッチに対する減速度を推定する。

#### 4.4 Fuzzy 制御の実現

上記方法を、列車にとう載したマイクロ・コンピュータにより実現し、実際の列車に対する制御指令 (ブレーキ・ノッチ) を時々刻々決定して行く。この処理手順を示したのが Fig. 6 であり、このプログラムを 100 m sec 毎にくり返して起動することにより、その時点での制御指令を決定する。

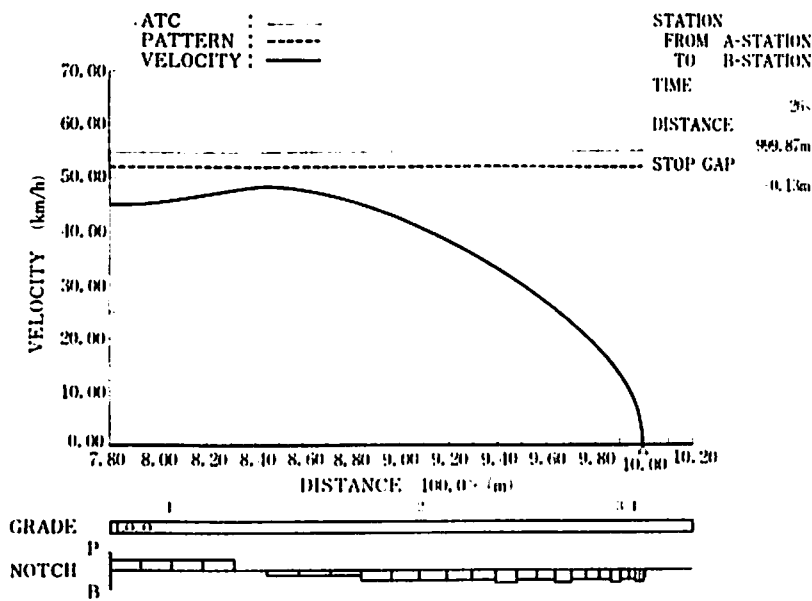


Fig. 9 A result of TASC by the fuzzy control

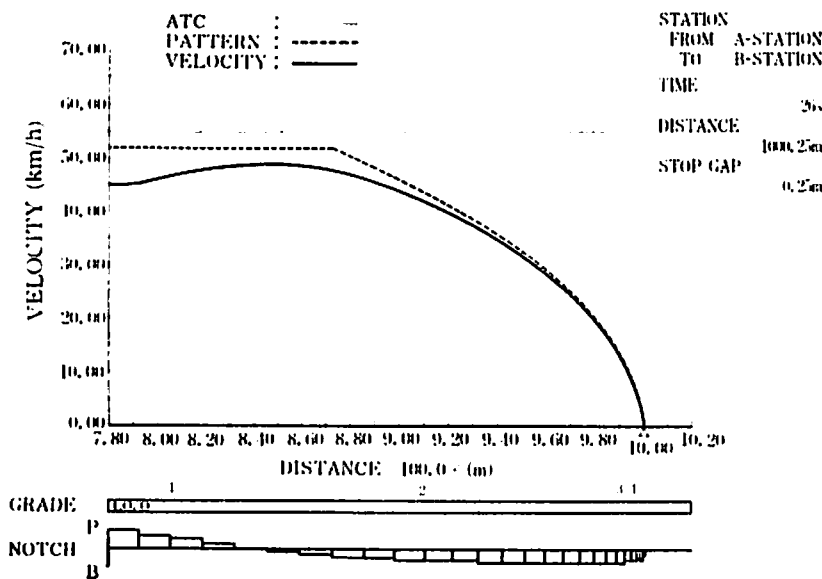


Fig. 10 A result of TASC by the PID control

### 5. シミュレーションによる検討

Fuzzy 制御の実用性を検討するため、Fig. 7 に示すモデルによって、従来より実用化している PID 制御と比較し、計算機シミュレーションを行った。

シミュレーションには、Table 1 に示す諸元をもつ標準的な地下鉄車両を用いた。

#### 5.1 シミュレーション条件と結果

先にも述べたように、定位置停止制御では、ブレーキ・ノッチに対する実際の減速度の定格値に対する偏差が、その制御性に大きな影響を与える。ここでは、路線勾配が -5%、0% (平坦)、+5% の各条件につ

いて、ブレーキ性能を定格値 5.14 km/h・s に対し、30% 減の、3.6 km/h・s、30% 増の 6.68 km/h・s を加えてシミュレーションを行った。シミュレーション結果の停止精度の平均値および偏差とノッチの変化回数を Fig. 8 (a, b, c) に示す。また、Fuzzy 制御、PID 制御による列車の走行状況およびノッチ変化の状況を Fig. 9、Fig. 10 に示す。

#### 5.2 シミュレーション結果の検討

Fig. 8 より、Fuzzy 制御は PID 制御と比較して、

- (1) ブレーキ性能の変動、勾配条件の変動に対し停止精度の平均値の変動が少なく、常に正確な定位置停止制御を行っている。
- (2) ノッチの変化回数は約 1/2 となり、乗り心地の良い制御を行っている。

であり、人間の運転に近い制御を行っていることがわかる。

このように、提案した予見 Fuzzy 制御方式が従来より実用化されている PID 制御方式と比較して、停止精度良く、ノッチ変化回数も少ない制御を行っているのは、以下の理由によると思われる。PID 制御では、一定減速度で変化する目標速度パターンに対し列車速度を追従させようとするが、制御対象のパラメータおよび外力の変動によって追従し

きれず停止精度が悪くなり、しかも目標速度パターンに追従させるためブレーキ・ノッチを頻繁に変化する必要がある。これに対し提案方式では、評価指標である停止精度を直接予測しながら制御を行い、停止精度が ±10 cm 以内だったらノッチを変化させずに乗り心地を良くするといった、制御対象の特徴を利用した制御を実現している。

また、PID 制御は常に同じ目標速度パターンに追従させるため、外乱などがあっても画一的な止まり方、ができる点で提案方式より優れているが、この点は列車の運転にとって重要な評価指標ではない。

## 6. 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より経験的に行っている人間の制御をアルゴリズム化できる予見 Fuzzy 制御方式を提案すると共に、この制御を列車自動運転に適用し、運転士の経験則にもとづき、(1)乗り心地、(2)停止精度、(3)走行時分、を評価しながら列車を所定の停止目標に停止させる制御則を作り、列車定位置停止制御を行った。

シミュレーションを行った結果、ここで提案した予見 Fuzzy 制御方式により、熟練運転士の経験則をアルゴリズム化することができ、列車定位置停止制御のような、制御対象のパラメータおよび外乱が時間および状態によって変動し、そのうえ多次元であいまいな人間の評価指標を満足する必要がある制御に対し、乗り心地の良い、正確な定位置停止制御を、マイクロ・コンピュータで実現可能な単純なアルゴリズムで実現できることを明らかにした。

最後に、本研究の機会を与えてくださった(株)日立製作所コンピュータ事業本部長三浦武雄博士、システム開発研究所長川崎淳博士をはじめとする関係者の方々に深謝します。

## 参考文献

- 1) 井原：地下鉄における計画と制御技術，電気学会雑誌，90-11，1056/1060 (1979)
- 2) 宮本：中量軌道輸送システムの制御と管理技術，電気学会雑誌，102-1，20/24 (1982)
- 3) 北川，安波，栗原ほか：札幌市交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，226/230 (1976)
- 4) 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，25-3，175/184 (1981)
- 5) 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，2205/2206 (1977)
- 6) 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-98-3，83/88 (1978)
- 7) 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，15-1，1/8 (1979)
- 8) 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，586/591 (1974)
- 9) 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，533/537 (1976)
- 10) 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，60-10，59/64 (1978)
- 11) S. Miyamoto, H. Ihara, M. Nohmi, et al.: TRAN-SPLAN - A Computer Assisted Planning and Designing System for Urban Guideway Transit System, 1978 Summer Computer Simulation Conference (1978)
- 12) S. Miyamoto, M. Nohmi, S. Yasunobu, et al.: JUMPS - A Design Support System for Urban Automated Guideway Transit System, 1978 Int. Conf. on Cybernetics and Society, 776/781 (1978)
- 13) L. A. Zadeh: Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes, IEEE Trans. SMC-3-1, 28/44 (1973)
- 14) E. A. Mamdani: Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, 121-12, 1585/1588 (1974)
- 15) C. P. Pappis: A Fuzzy Logic Controller for a Traffic Junction, IEEE Trans. SMC-7-10, 707/712 (1977)
- 16) Y. Tsukamoto, T. Takagi and M. Sugeno: Fuzzification of  $L_{\text{A}^*}$  and Its Application to Control, Proc. Int. Conf. on Cybernetics and Society, 2, 1217/1221 (1978)
- 17) 菅野：あいまい集合と論理の制御への応用，計測と制御，18-2，150/160 (1979)
- 18) 安信，宮本，井原：Fuzzy 理論による列車自動運転制御，第20回 SICE 学術講演会予稿集，467/468 (1981)