

予見ファジー制御方式による自動列車運転装置の実現

正員 大島 弘 安
非会員 関野 真 一
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

予見ファジー制御方式による自動列車運転装置の実現

正員 大島 弘 安 (日立)
 非会員 関野 真一 (日立)
 正員 安信 誠二 (日立)

1. まえがき

自動列車運転装置 (Automatic Train Operation Devices, 以下 ATO と略記) は、運転士により出発押釦が圧下された後列車を出発させ、ATC 装置 (Automatic Train Control Devices, 以下 ATC と略記) によるガードのもとで列車の巡行速度を決定・維持し、次駅の定位置に停止させるまでの一連の制御を自動的に行う装置である。

列車運動系を含むシステムのモデルは図 1 のように表現することができ、ATO からの出力 PN (力行指令ステップ値) と BN (ブレーキ指令ステップ値) は時刻 (t), 列車速度 (V), ATC 信号 (Si), 走行距離 (X), 地上子信号 (SPK), 走行情報 (M), 出発信号 (DT) とから, (1) 式によって決定される。

$$\begin{cases} PN(t) \\ BN(t) \end{cases} = F(t, V(t), Si(X, t), SPK(t), M(t), DT) \dots\dots\dots (1)$$

ここで, F{ } は { } 内の与えられた条件のもとで, 安全性・乗心地・停止精度・定時性・省エネルギー性などの総合的判断から最適値を選択することを意味する関数である。また PN は P₀~P₇ の八つの値のみを, BN は B₀~B₇ の八つの値のみをとり得る, 共に離散値である。

これに対し従来実用化されている ATO のほとんどは, 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方式

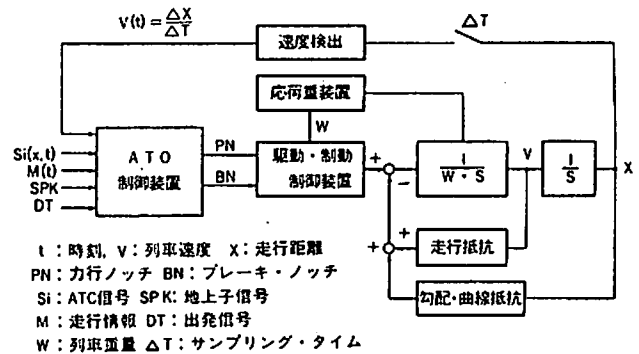


図 1 列車運動系を含むシステムのモデル
 Fig. 1. System model including train dynamics.

であった^{(1)~(3)}。この方式では, 制御の評価項目は速度パターンへの追従性のみであり, 本質的な評価項目である安全性・乗心地・停止精度・定時性・省エネルギー性などについてはパターンの形状, 制御定数の設定などで間接的に保証しているにすぎなかった。このため, このような評価項目を総合的に満足するように制御性を向上することには限界があった。こうした限界を打破するため, 最適制御理論の適用⁽⁴⁾⁽⁵⁾, オープンループ制御方式⁽⁶⁾, 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⁽⁷⁾, などが提案され実験されている。

ATO の制御系としての難しさは次のようなところにある。

第一は, ATO はひとを輸送する装置の制御を行うものであるため, その制御性能の良否を問う評価項目は目標速度パターンへの追従性ではなく安全性・乗心地・停止精度・定時性・省エネルギー性などである。そして普段は, これらがバランス良く満たされていることが好ましいが, ときには乗心地を犠牲にしても停止精度を許容値内に収めたいときや, その逆に将棋だおしを避けるため乗心地を優先させたいときがある。このようにそれぞれの評価項目に対する重み付け

Realization of an Automatic Train Operation Devices Based on Predictive Fuzzy Control. By Hiroyasu Oshima, Member, Shin-ichi Sekino, Non-member & Seiji Yasunobu, Member (HITACHI Ltd.).
 大島弘安: 正員, (株)日立製作所機電事業本部
 関野真一: 非会員, (株)日立製作所水戸工場
 安信誠二: 正員, (株)日立製作所システム開発研究所

が状況により変化するので総合的な評価関数を一義的には決めにくい。

第二は、乗客の多少、ブレーキ性能を始めとする列車性能、線路のこう配などの変動幅やばらつきが大きく、列車をダイナミックな系として正確にモデル化しようとしても限界がある。

第三は、列車の運動を知る唯一の情報である速度信号も、車輪踏面にはこう配があることと、常に微少な空転を伴って車輪は回転しているものであるため、十分な精度のある情報としては得られない。

著者らは、これらの問題を解決するためのアプローチとして運転士の判断過程に立ち戻り、

(1) 追従性、乗心地、停止精度などの多数の評価項目をファジー理論を用いて表現するメンバシップ関数と

(2) IF~THEN~形式で表現される制御ルールと

(3) 制御対象の予測演算を行う数学モデルとを組合せた予見ファジー制御方式を提案し⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾、これを実用化した⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾。

予見ファジー制御と、それを利用した自動列車運転装置の理論と検証については、既に多くの報告がある⁽⁹⁾⁻⁽¹³⁾。本論文では、これらの理論を受けて、実用とする装置を実現するまでの過程、すなわち、理論の実機への植付け、設計、対象と組合せたうえでのチューニングなどを中心に論じる。なお、本装置は仙台地下鉄で最初に実用化されたが、仙台地下鉄固有の問題、

一人乗務との関連などについての議論は別の機会にゆずるものとする。

2. 予見ファジー制御による列車の自動運転⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾

熟練運転士による運転では、列車は常に同じ速度パターンで運転されているわけではない。例えば、列車を目標位置に停止させる間際に運転士は、「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ほうが正確に止まれるうえ、乗心地も問題ない」などの判断を行いブレーキを操作している。すなわち、運転士は「うまく停止できる」、「正確に止まれる」、「乗心地が良い」という評価に基づき制御を行っている。また、このままでどこに止まれそうかといった列車の運動特性も判断の中に入っている。

このように、運転士が判断するよりどころになっている経験則は知識工学により、「もしブレーキを保持しつづけてもうまく停止できるならば、ブレーキを保持しつづける」、「もしブレーキを少し強くしたとき、乗心地良く、かつ正確に停止できるならば、ブレーキを少し強くする」といった制御則に書き換えることができる。また、これらの制御則の中の「正確に停止」というような言葉の意味はファジー理論により定義することができる。更に、停止位置などの未来値は列車の動特性をモデル化し、変数に現在の観測値を代入して計算することによって予測することができる。

このように経験則が制御則に書き換えられた後、そ

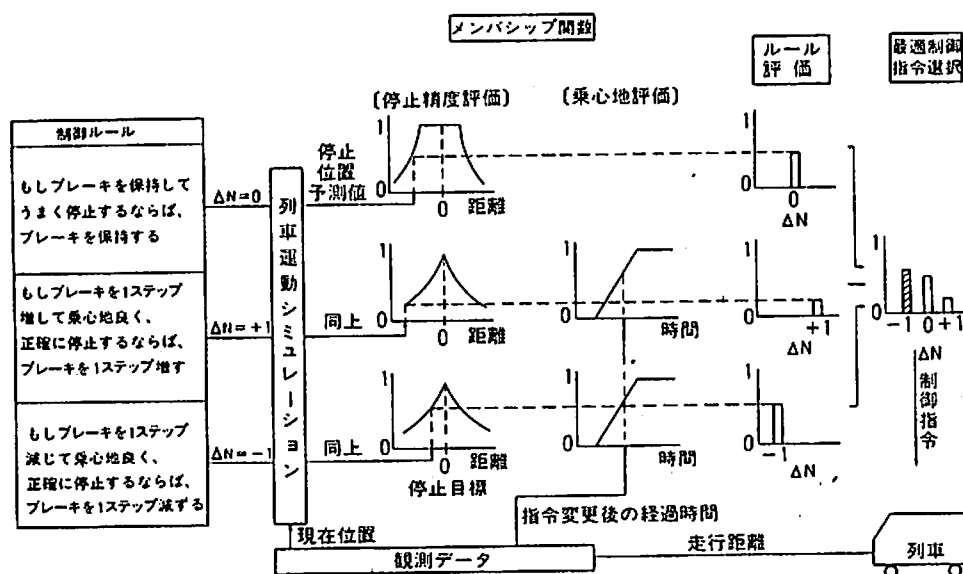


図 2 予見ファジー制御の推論過程

Fig. 2. Reasoning process in predictive fuzzy control.

の制御則が装置の内部で推論されていく。その過程を表すと図2のようになる。同図は説明のため、制御則(ルール)の数を三つに、メンバシップ関数を2種(停止精度評価と乗心地評価)に絞り、定位置停止制御の過程を単純化して表現してある。一つのルールに対し二種のメンバシップ関数がある場合、(図の $\Delta N = +1$ と -1 のケース)いずれか評価値の低いほうの値をそのルールの評価値とする。 $\Delta N = 0$ のとき乗心地評価を行わないのは、指令を変えないため乗心地は良好、つまり評価値1と評価するためである。 $\Delta N = 0$ のケースとそれ以外のケースとで停止精度評価のメンバシップ関数の形状を違えるのは、指令を変えるケースではどの指令値に変えることが最適かを判定するためと、指令を変えないでも目標範囲内に止まれるよであれば、それを許容しようという意図を反映させるためである。求められた三つのルールに対する評価を比較すると、この図の場合 $\Delta N = -1$ に対する評価が最も高い。従って、この時点でATOは $\Delta N = -1$ の制御指令を出力する。すなわち、ブレーキを1ステップ緩める指令を出力する(max・min法)。

3. 予見ファジー制御方式 ATO の構築

制御性と実現性を考慮し、実用に供する ATO 装置を次のように構築する。

(3.1) 評価項目のファジー集合による表現
 さきに述べたような経験則の中から、次の評価項目を取上げファジー集合により定量化する。メンバシップ関数の形状の決定については、形状決定手法と制御安定性評価手法とがまだまだ十分に整備されていないため、

過去の ATO 装置を製作した経験に照らしてまず形状を仮に定め、シミュレーションによってそれを最適化し安定性についても確認するという手法を採る。

(1) 追従性 T ATCによる制御速度に対し3 km/h 下位の速度を目標速度として列車を追従させるものとする。ここで、ある指令を選んだ場合に予想される t 秒後の目標速度に対する速度偏差をファジー集合により評価するものとし図3(a)に示すような二つのメンバシップ関数を定義する。ここで t は指令変更に対する列車の応答の早さを考慮して設定する。

このメンバシップ関数は制御指令を現状維持もしくは変更した場合、それぞれの指令値に対し t 秒後に到達するであろう速度をモデルでの演算を通して予測し、それらの予測値が目標速度への追従性という視点でどの程度満足しているかを表現するためのものである。指令値を変更しないときは若干の偏差を許容するという考えで頂上が平坦な“G”の関数を使い、指令値を変更するときは演算結果から最適指令値を探るためシャープな“VG”の関数を使う。スロープは左右対称とし3 km/hを超えた速度は許容しないためカットする。

(2) 停止精度 A 駅の停止目標位置に対し、ある指令で停止しようとした場合に予想される停止位置の偏差をファジー集合により評価するものとし、図3(b)に示すような2つのメンバシップ関数を定義する。

このメンバシップ関数はブレーキ指令を現状維持もしくは変更した場合、それぞれの指令値を列車停止まで保持することによって列車が停止するであろう位置

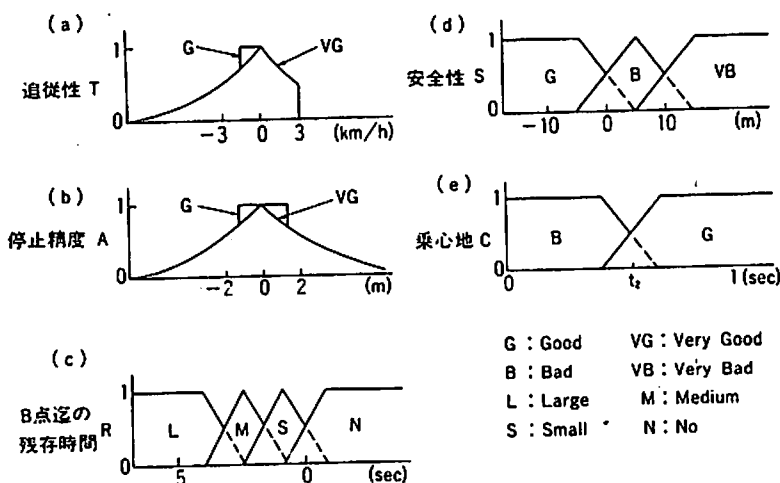


図3 評価項目のメンバシップ関数

Fig. 3. Membership functions for performance indices.

をモデルの演算を通して予測し、その予測値が目標停止地点に対する精度という視点で、どの程度満足しているかを表現するためのものである。指令を変更しなくともまずまずの精度が得られるときは、過剰な指令変更による乗心地低下を防ぐため、頂上に平坦な部のある“G”を使い、指令値を変更する場合は演算結果から最適指令値を探るためシャープな“VG”の関数を使う。正確に停止すれば満足度が高く、行き過ぎや手前での停止は満足度が低いので左右対称な山形となる。

(3) B点までの残存時間 R 駅間走行制御から定位置停止制御に移行するに際し、乗心地を損なわないような制御を行うため B 点までの残存時間をファジー集合により評価する。残存時間零を基準として、図3(c)に示すような四つのメンバシップ関数を定義する。

四つのメンバシップ関数はそれぞれ次のような制御状態に対応している。N:ブレーキ作動, S:だ行, M:力行3ステップまで許容, L:力行7ステップまで許容。従って、メンバシップ関数の値はそのときに採られている制御状態の適切性について表現している。B点までの残存時間が5秒程度のときは「力行7ステップまで」適切と判断されるが、時間の経過と共に「力行3ステップまで」に制限され、やがて「力行3ステップまで」の適切性が減少すると共にだ行状態に入ることの適切性が増え、残存時間零に至るとブレーキを作動させることの適切性がだ行状態であることの適切性をうわまわる。このようにして列車は緩やかに力行状態からブレーキ状態に移行する。

(4) 安全性 S 駅の停止目標に対して、最大ブレーキ指令7ステップを出力した場合に予想される過走距離をファジー集合により評価する。正常な客扱いが不能となる過走距離10mを基準として、図3(d)に示すような三つのメンバシップ関数を定義する。

三つのメンバシップ関数はそれぞれ次のような制御状態に対応している。VB:非常ブレーキ系作動, B:ブレーキ7ステップ作動, G:安全性確保のための非常ブレーキやブレーキ7ステップの介入が不要。従って、メンバシップ関数の値はモデルでの演算を通して予測されるオーバーランの程度に対応して、そのときに採られている制御状態の適切性について表現している。限度を超えるオーバーランが予測される場合は、このようにして上位のブレーキに切換えられ、オーバーランを防ぐ。

(5) 乗心地 C 前回の指令変更からの経過時間をもってファジー集合により評価する。 t_2 秒を境と

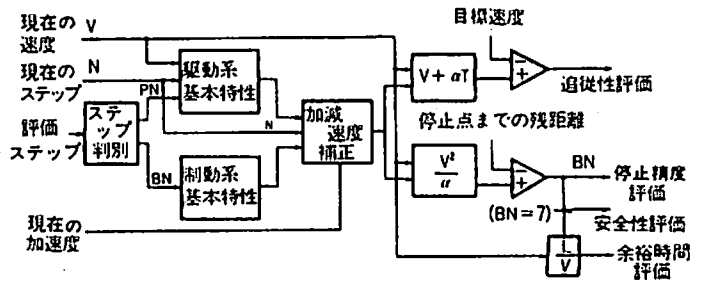


図4 予測のためのシミュレーションモデル

Fig. 4. Simulation model for prediction.

して図3(e)に示すような二つのメンバシップ関数を定義する。ここで、 t_2 秒という数値は熟練運転士の修正操作の応答に見合った値に設定する。

このメンバシップ関数は指令値変更のタイミングの適切性について表現している。“G”の関数の値が適切性を表し、“B”はその補数である。この関数をもとにした論理は頻繁な指令変更を抑制する効果をもつ。

なお、定時性と省エネルギー性については、現在の列車運行状況が標準運行時刻に対してゆとりがある場合には、できるだけだ行運転を取入れるという手法の導入のみにとどめる。

〈3・2〉 予測のための演算を行うモデル 制御則に表現された評価を行うには、ある指令を選んだと仮定したときの列車運動の予測を行うことが必要である。このための演算を行うモデルを図4のように構成する。

〈3・3〉 モデルの補正 実際の列車や路線では、加減速度特性に様々な要素が作用する。主なものとして次のような要素がある。

(1) 線路こう配 線路こう配から受ける加減速度であり、35% (水平距離1,000mに対し高低差35m)のこう配は加減速度に換算するとほぼ1km/h/sに相当する。列車の加速性能はほぼ3km/h/sであるから、無視できないほど大きい。このことは走行している場所により列車の運動特性が一樣でないことを意味する。

(2) ブレーキ力変動 ブレーキ力の変動は特に停止精度への影響が大きい。その要因は空気ブレーキのシリンダ圧の変動(定格の+10~-15%)、ブレーキパッドの特性ばらつきと温度による摩擦係数の変動などである。

(3) 荷重変動 駅ごとの乗客乗降に伴う荷重

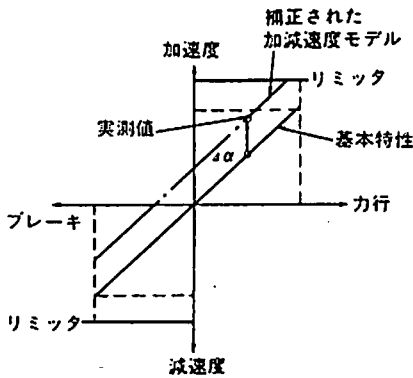
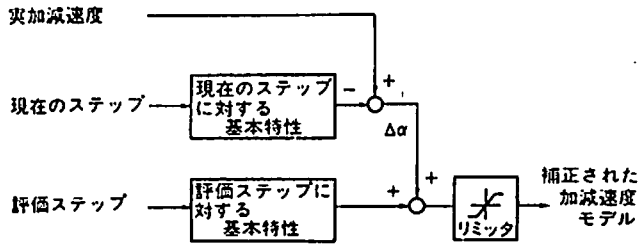


図 5 加減速モデルの補正

Fig. 5. Correction of acceleration and deceleration model.

変動である。列車には応荷重装置が設けられており、荷重によらず加減速度を一定化しようとするが、すべては補正できない。

このような諸要素によって生じる加減速度の偏差は停止精度などの制御性能に大きく作用するので、演算モデルを実時間で補正することが望ましい。現在出力中の指令に対する基本特性での加減速度と、観測した実加減速度とを比較し、図5のようにしてモデルに対する補正を行う。

〈3・4〉 制御則 例えば、停止精度を良くするための経験則を予見ファジー制御形式の制御則に書き換えると「ステップを n ステップ増したとき (DN is n), B 地点を過ぎており (R is N), 乗心地良く (C is G), 正確に停止 (A is VG) するならば、ステップを n ステップ増す (DN is n)」と表せる。同様に種々の経験則を制御則で表現することができる。適用する制御則を簡略化して表1に示す。

〈3・5〉 プログラム プログラムの実ステップ数は約2kステップ、メモリー使用量は約12kバイトである。

主制御部分のフローチャートを図6に示す。

まず駅間走行制御の制御則を評価し、その中から max・min 法で最適指令ステップ値を探し、それを N_c とする。続いて、停止制御中のときは停止制御の制御則を評価し、同じく max・min 法で最適指令ステップ

表 1 制御則
Table 1. Control rules.

Mode	Command	Evaluation			
駅間走行制御	1: $DN=0$	$C=*$	$T=G$		
	2: $N=P_0$	$C=G$	$T=VG$		
	3: $N=P_1$	$C=G$	$T=VG$		
	4: $DN=-1$	$C=G$	$T=VG$		
	5: $DN=+1$	$C=G$	$T=VG$		
	6: $DN=-2$	$C=G$	$T=VG$		
	7: $DN=+2$	$C=G$	$T=VG$		
	8: $DN=-3$	$C=G$	$T=VG$		
	9: $DN=+3$	$C=G$	$T=VG$		
	10: $N=B_1$	$C=G$	$T=VG$		
定位置停止制御	1: $N=B_1$	$S=VB$	$C=*$	$R=*$	$A=*$
	2: $N=B_1$	$S=B$	$C=*$	$R=*$	$A=*$
	3: $N=P_1$	$S=*$	$C=G$	$R=L$	$A=*$
	4: $N=P_1$	$S=*$	$C=G$	$R=M$	$A=*$
	5: $N=P_0$	$S=*$	$C=G$	$R=S$	$A=*$
	6: $N=B_1$	$S=*$	$C=G$	$R=N$	$A=*$
	7: $DN=0$	$S=*$	$C=G$	$R=N$	$A=G$
	8: $DN=+1$	$S=*$	$C=G$	$R=N$	$A=VG$
	9: $DN=-1$	$S=*$	$C=G$	$R=N$	$A=VG$
	10: $DN=+2$	$S=*$	$C=G$	$R=N$	$A=VG$
	11: $DN=-1$	$S=*$	$C=G$	$R=N$	$A=VG$
	12: $DN=+3$	$S=*$	$C=G$	$R=N$	$A=VG$
	13: $DN=-3$	$S=*$	$C=G$	$R=N$	$A=VG$

DN : No. of steps moved B_n : n -th step in braking mode
 N : Absolute value of *: Don't care control command
 P_n : n -th step in powering mode

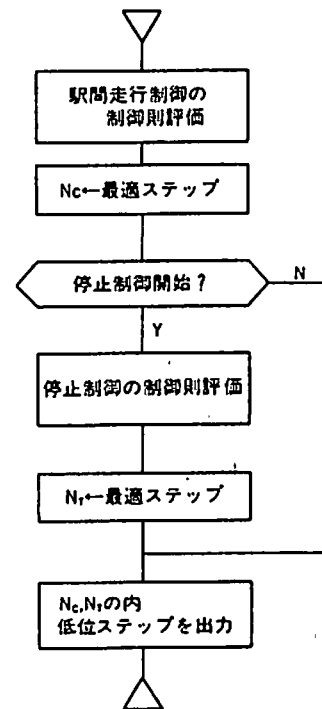


図 6 プログラムの流れ図
Fig. 6. Flow of program.

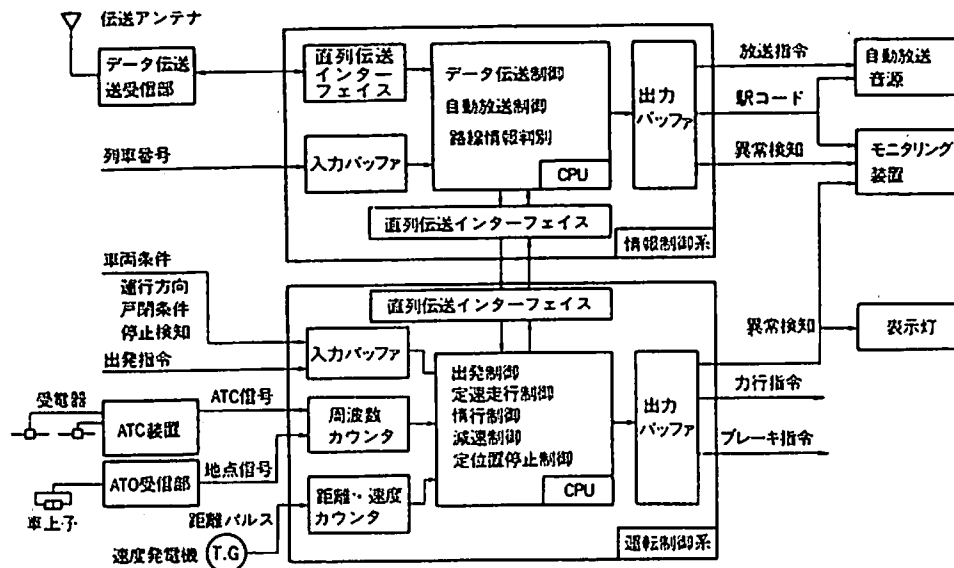


図 7 ATO 機能構成図

Fig. 7. Functional block diagram of the ATO.

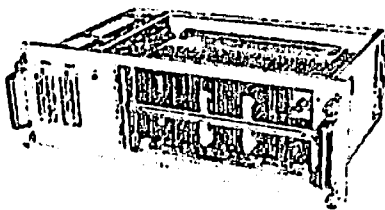


図 8 ATO 装置

Fig. 8. ATO equipment.

値 N_T を選ぶ。このようにして求められた N_c と N_T のうち、より低位の指令（力行とブレーキではブレーキを、ブレーキ同士では強いほうのブレーキを優先）を ATO 装置からの指令として出力する。このような演算を 100 ms の演算周期で実行する。停止制御を開始したあとでも毎回駅間走行制御の制御則評価を行うのは、いったん停止後再起動することがあるためである。

〈3.6〉 ハードウェア ATO は機能に従って、情報制御系と運転制御系の二つの CPU で構成する。

情報制御系では、地上装置とのデータ伝送の制御と自動放送の制御と路線情報判別を行う。運転制御系には、予見ファジー制御機能が収められ出発制御・定速走行制御・力行制御・減速制御・定位置停止制御を行う。両者は直列伝送で結ばれ情報伝送系から運転制御系へは、地上から送られてきた運転のためのデータや路線情報などが伝送され、運転制御系から情報制御系へは車内自動放送のためのタイミング信号などが送ら

れる。万一、運転制御系が故障しても車内自動放送が生き残れるよう、また情報伝送系が故障しても補完的なデータで運転制御系が生き残れるよう両者はまばらに結合される。

機能構成図と装置の外観をそれぞれ図 7 と図 8 に示す。

マイクロプロセッサは HD 6800 とし、クロックは 1 MHz、プログラムメモリーは情報制御系、運転制御系それぞれ 16 k バイトである。

なお、緊急時への対応、安全の確保については運転士による手動介入と ATC による保安とが、この ATO 装置の外側に別のハードウェアとして設けられている。

4. チューニング

各種試験ならびに対象となる列車と組合せたうえでのチューニングの段階で発生した現象と、それに対する対応を述べる。

(1) チューニング初期において、出発後の加速状態から目標速度に近づき定速走行に移行する際、力行ステップを早く戻しすぎて、列車速度が図 9 のように段付きとなる現象が発生した。これは図 4 における駆動系基本特性が実際の特性と大きくずれていたため発生したものである。モデルと実際の特性とは厳密に一致している必要はないが、適切でない制御則を選択してしまう程度のずれが介在するとこのような現象が発生する。モデルの修正により解決することができた。

(2) ATC によるブレーキで減速した後、定速走

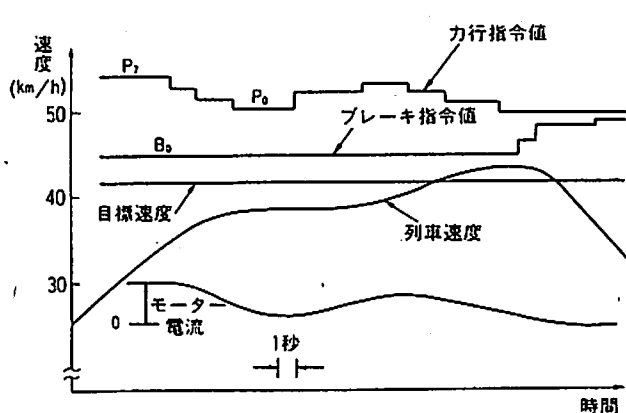


図 9 オシログラム 1
Fig. 9. Oscillogram 1.

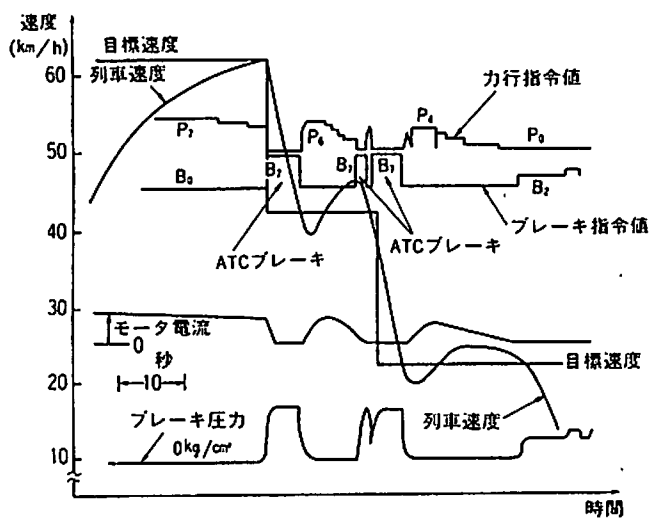


図 10 オシログラム 2
Fig. 10. Oscillogram 2.

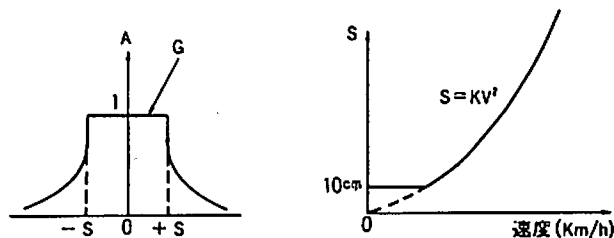


図 11 メンバシップ関数の制御
Fig. 11. Control of membership function.

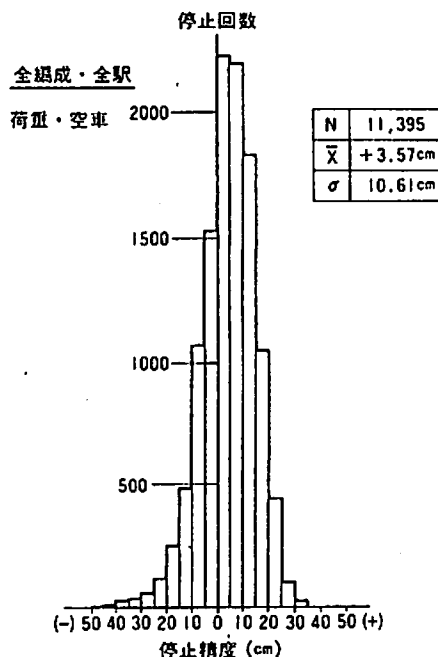


図 13 停止精度のヒストグラム(全編成・全駅)
Fig. 13. Histogram of stopping accuracy (all train & all station).

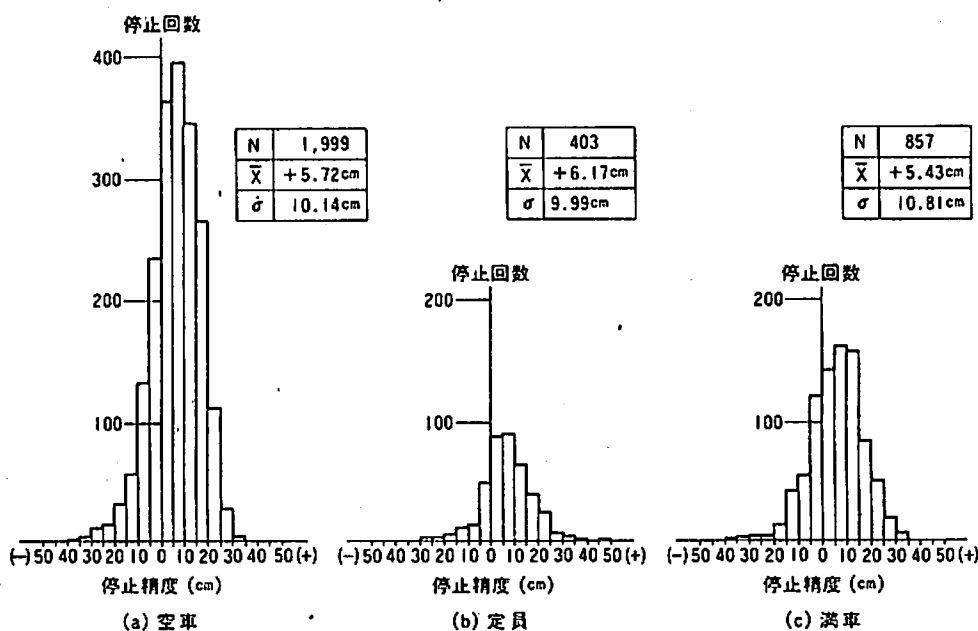


図 12 停止精度のヒストグラム (荷重変化)
Fig. 12. Histogram of stopping accuracy (load change).

行に移行する際、図10のようにハンチングすることがあった。これはステップが急変した際、列車速度が応答しきれない間に測定した加減速度の観測値をもとに内部モデルの補正を行ってしまったことによるものである。これは実加減速度の演算に平滑処理とリミッタを加え、更に同一指令が一定時間持続しないときは補正を禁止することで安定化することができた。図5のリミッタはこのためのものである。

(3) 停止精度の向上と指令変更の頻度を抑制することとは一般に相反する要求である。しかし、指令保持をした場合の停止精度についてのメンバシップ関数(図3, AのG)の形状(頂上の平坦部の幅)を、図11のように、減速中の列車速度に応じて連続的に制御することが可能である。このようにすると高速域での指令変更を抑制しながら、停止間際の微調整による停止精度の向上が可能である。

このように、観測値によりメンバシップ関数の形状そのものを制御するという手法も可能であり、実際の装置ではそれが有効であることが明らかとなった。

現車での試験結果は次のとおりであった⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

(1) 定速走行の追従性は仕様値(目標速度+3~-5 km/h)の範囲内に収まり、この範囲内で指令変更が少なくなめらかな追従を実現した。

(2) 停止精度は全編成、全駅での積上げデータとして、11,395回の試験で平均値+3.57 cm, 標準偏差10.61 cmであり、目標値の±50 cmに収まった。

図12は荷重を変化させたときの停止精度のヒストグラムである。荷重が変動しても停止精度はほとんど影響をうけていないことがわかる。

図13は全19編成が全駅間で走行し、停止精度を測定した結果のヒストグラムである。編成間の車両特性のばらつきも十分吸収されていることがわかる。なお全19編成のプログラムとメンバシップ関数を含む定数はすべて同一で、個々の編成の特性に合わせてATOを微調整するようなことは行っていない。

5. あとがき

本論文では、予見ファジー制御を列車の自動運転装置に適用する実際的な面について、その理論の実機での実現と、各種試験ならびに現車と組合せチューニングする段階で発生した現象とを中心として述べた。

装置の実現を通して次のことが明らかとなった。

(1) この適用対象では、指令に対する応答が予測可能なので予見ファジー制御は熟練者の運転に近い制御性能が得られる有効な制御手法であること。

(2) この適用対象については、8ビットマイクロプロセッサでも十分な制御性能が得られたこと。なおこれは従来のPID制御による場合と同程度の装置規模である。

(3) 観測値によるメンバシップ関数の形状そのものに対する制御も対象によっては実現可能な手法であること。

終りに、予見ファジー制御を実現する機会を与えてくださった仙台市交通局の佐藤 恵技監、車両全体の見方から御指導いただいた仙台市交通局田代良二技師、本論文の取りまとめに御指導をいただいた(株)日立製作所システム開発研究所の中尾和夫部長、松本邦頭主任研究員、(株)日立製作所水戸工場の安波政弘部長をはじめとする関係各位に感謝いたします。

(昭和63年6月22日受付)

文 献

- (1) 北川, 他: 「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 (昭51)
- (2) 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, 175 (昭56-3)
- (3) 藤倉, 他: 「列車の自動運転制御方式」, 昭52電気学会全大, p. 2205 (1977)
- (4) 半田: 「時間・速度制御における自動運転方式」, 電学論C, 98, 83 (昭53-3)
- (5) 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, 15, 1 (昭54-1)
- (6) 石井, 他: 「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, p. 586 (昭49)
- (7) 下浦, 他: 「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, p. 533 (昭51)
- (8) 安倍, 他: 「FUZZY制御による列車定位置停止制御」, 計測自動制御学会論, 19, 873 (昭58-11)
- (9) 安倍, 他: 「予見FUZZY制御方式による列車自動運転」, システムと制御, 28, 605 (昭59-10)
- (10) S. Yasunobu, et al.: Automatic Train Operation System by Predictive Fuzzy Control p. 1 (1985) North-Holland
- (11) 安倍: 「ファジー理論の実システムへの応用—仙台市地下鉄自動運転」, 日本機械学誌, 91, 836 (昭63)
- (12) 庄子, 他: 「仙台市地下鉄南北線自動列車運転装置」, 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. 242 (昭63)
- (13) H. Oshima et al: "Automatic Train Operation System Based on Predictive Fuzzy Control", Proc. Int. Workshop on AI IEEE/SICE, p. 485 (1988)