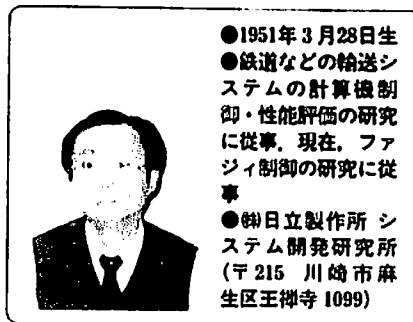


ファジィ理論の実システムへの応用

—仙台市地下鉄列車自動運転—

Application of Fuzzy Theory for a Real System
—Automatic Train Operation of Sendai-city Subway—

安 信 誠 二
Seiji YASUNOBU



Key Words: Application of Control, Railway, Fuzzy Set Theory, Fuzzy Control, Predictive Fuzzy Control, Automatic Train Operation

1. まえがき

昭和62年7月に開業した仙台市地下鉄(図1)は、人間のあいまいな主観を定量化できる、ファジィ(fuzzy)理論を応用したファジィ制御方式により列車の自動運転が行われている。

このファジィ制御は、従来人間が行ってきた運転(制御)に関する知的活動をアルゴリズム化することにより、熟練者と同様に知的な運転をマイクロコンピュータなどで実現しようとする試みの一つである。このファジィ制御の基本となるファジィ理論では、ある状態が「大きい」とか「小さい」といった、熟練者の運転経験の中に含まれている言葉の主観的なあいまいさ(fuzziness)を、



図1 仙台市地下鉄南北線の車両外観

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、定量化する⁽¹⁾。

最近このファジィ制御は、コンテナクレーン⁽²⁾、エレベータ群管理⁽³⁾、セメント・キルン、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、トンネルのシールド機械の制御、そして給湯用混合装置の湯温制御など⁽⁴⁾のさまざまな実システムへの応用が盛んに試みられている。

ファジィ理論とその応用については、寺野氏らの入門書など⁽⁵⁾⁽⁶⁾に平易に記述されている。またファジィ制御については、菅野氏⁽⁷⁾、宮本氏⁽⁸⁾、そして筆者ら⁽⁹⁾による解説がある。また最近の実システムへの応用動向については、稲葉氏ら⁽⁴⁾の紹介記事、廣田氏の解説⁽¹⁰⁾がある。ファジィ理論と制御の全体についてはこれらをご覧頂きたい。

本稿では、ファジィ理論について簡単に述べると共に、熟練運転士の制御知識を組み込みリアルタイム制御を実用化した予見ファジィ制御方式、本方式を適用した仙台市地下鉄の列車自動運転システムの概要、その運転結果について紹介する。

2. ファジィ理論

ファジィ理論は、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ィ集合論⁽¹⁾を基礎とする概念である。図 2 に身長を例にとりファジィ集合の概要を示す。通常集合の概念では、175 cm 以上は、背が「高い」とし、174.9 cm は「高くない」と明確に分離する。これに対して人間は、明確に区切ることなしに「背が高い」を考えており、その境界は不明確である。ファジィ集合では、「高い」「中位」「低い」をそれぞれ図中に示す 0 から 1 の値をとる満足度関数（メンバシップ関数）により定義する。従って例えば身長 180 cm の人の場合には、背が高いが 0.9、背が中位が 0.1、背が低いが 0.0 という、各満足度の値を得ることができる。このようにしてファジィ理論を用い、背の高さに関して持っているような人間の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。

3. 熟練者の運転と予見ファジィ制御方式⁽⁹⁾

PID 制御等の従来制御方式は、対象システムの望ましい動きを目標パターンとして与え、コントローラは対象システムの状態量が目標パターンにうまく追従するように出力である制御指令を決定している。従って、特性が線形モデルで十分に表される対象であるとか、目標が一定であるような制御は得意である。しかし、状況に応じて制御対象の特性や外部状況がダイナミックに変化したり、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適用が難し

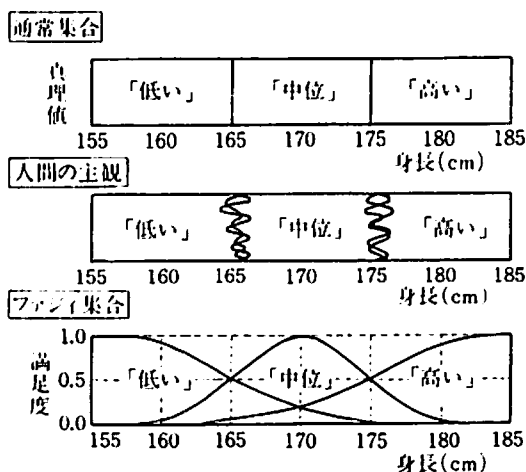


図 2 ファジィ集合の概要

く、現在でも人間の方がうまい制御、質的に満足できる制御を行っている場合が多い。

3.1 熟練者の運転 ここで、熟練者がどのように運転（制御）しているかを考えてみると、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として、(a) 現在のシステム状態ならば、過去の経験からこれぐらいの制御指令を出したら良いという状態評価と、(b) 現在のシステム状態でこの制御指令を出したならば、過去の経験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目的評価、による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の意味をファジィ集合論によって定量化し、(ii) その構造を制御知識として記述する、ことにより計算機化しようとするのがファジィ制御である。これには、先に述べた人間の思考過程に対応して、次の二つのアプローチが提案された。

3.2 状態評価ファジィ制御方式 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、温度が高く、圧力が中位であれば、燃料を少し減らす」といった制御則により制御指令を決めていく。

本方式では、現在のシステム状態量（温度や圧力など）の観測値が、「高い」「中位」といった人間の主観に基づいたファジィ集合により記述した制御則に、どの程度似ているかを評価し適合度を求め、他の制御則の適合度も併せ推論して制御指令である燃料の量を決めていく。この方式は、セメントキルンや浄水場の薬剤注入制御などのプラント制御に実用化されている⁽⁷⁾。

3.3 予見ファジィ制御方式⁽¹¹⁾ 本方式は熟練者の運転を、(i) 多数の制御目的のファジィ理論による把握と (ii) 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

知識表現と、(iii) 制御対象の実時間シミュレーションを行う数学モデル、の三つ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3)。

この制御構造は図4に示すように、状態の観測値をもとに、制御指令の全候補値についてシミュレーションを行い、その結果により被評価量を予測し、その予測をもとにファジィ関数による多目的評価を行い、その評価値と制御知識を、ファジィ推論で処理し、最適な制御指令を決定するようになっている。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強くして、乗り心地良く、正確に駅に止まれそうな状況ならば、ブレーキを少し強くする。」といった、制御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していく。3・2節で示した状態評価ファジィ制御と大きく異なる点は、被評価量が現在の時点で、ある制御指令の実行を仮定した場合に制御目的がどうなるかを、実時間シミュレーションにより予見(予測)した結果であることである。もちろん、評価しようとする値が実行を仮定した制御指令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だけを評価し、状態評価ファジィ制御方式に一致する。

この制御方式による制御指令の具体的推論方法⁽⁹⁾⁽¹¹⁾は、本稿では割愛する。これらファジィ制御は、決して「あいまい」や「不確実」なものではなく、同一の条件下では、常に同一の制御を行う。またこの制御方式では、ファジィ集合により各制御則を定義すると共に対象システムのモデルを用いているため、数少ないが特徴ある制御則に

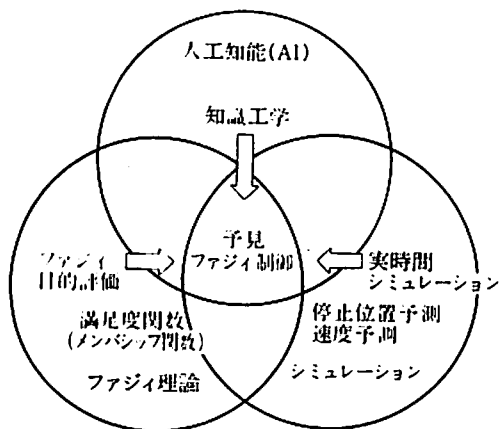


図3 予見ファジィ制御の位置付け

より、要所要所を押さえた運転を行える。

4. 予見ファジィ制御による列車自動運転⁽⁹⁾⁽¹²⁾

4・1 列車運転とその自動化 列車の運転とは、出発信号に従い加速を開始し、駅間を制限速度を超えないように列車速度を調節し、次の駅の停止目標に列車を停止させるよう、力行及びブレーキの制御指令(ノッチ)を操作する。この列車運転の制御目的としては、

- (1) 乗客の安全性の確保,
- (2) 乗り心地の維持,
- (3) 制限速度の順守,
- (4) 駅での停止精度,
- (5) 駅間走行時間,
- (6) 消費電力量, などがある。熟練運転士は、これらを状況に応じて局所的、全体的に複雑に組合わせ評価することにより、うまい運転を実現している(図5)。

この列車の運転を、運転士に代わり行うのが列車自動運転システム(ATO: Automatic Train Operation)である。これまで制限速度や、停止目標までの距離に応じ発生させた目標速度パターンに、列車速度を追従させる従来制御方式(図6)により、国内外の各地で実用化されている。これら実用化方式では、列車に搭載された自動運転装置が走行中に評価するのは、目標速度パターンに対する列車実速度の偏差値であり、乗り心地や停止精度といった列車運転にとって重要な制御目的は、目標速度パターンの形状や、制御定数により間接的に考慮されているが、熟練者なみの調和のとれた運転を実現することは困難であった。

4・2 列車運転の予見ファジィ制御化 熟練運転士による運転は、常に同じ速度パターンに追

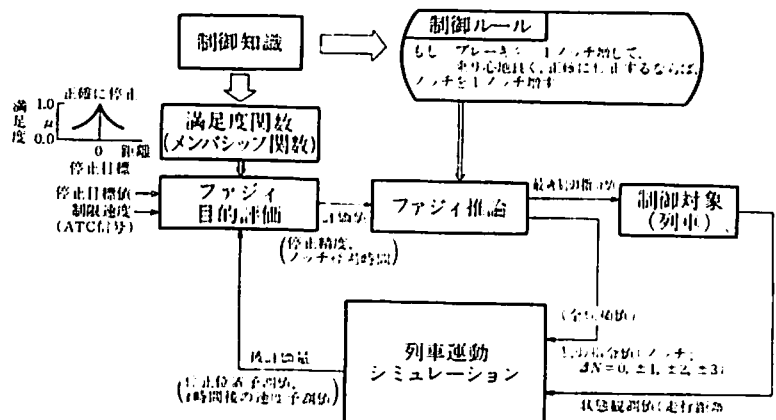


図4 予見ファジィ制御方式の概要

従することだけを考えている訳ではない。例えば停止制御においては、乗客の乗り心地などを考えながら、停止精度の良い運転を実現している。予見ファジィ制御方式を適用することにより、この熟練運転士の制御に関する知的ノウハウを組込んだ制御を計算機により実現した。

例えば、列車を目標に停止させる間際（停止20～30 m手前）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。すなわち、運転士は、「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っている。また、このままでどこに止まれそうなのかといった、列車の運動特性も判断の中に入っている。この停止位置の予測は、現在の列車位置、速度、減速度から計算可能である。

従って、運転士が時々刻々考えている制御則は、「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」「もし、ブレーキを少し強くした時、乗り心地良く、正確に停止できそ

うなら、ブレーキを少し強くする」といった形式の制御則でまとめることが可能である。図7に列車を停止目標に停止させるのに用いているファジィ制御則を示す。

これらの制御則中の「正確に停止」「うまく停止」といった言葉の意味は、最初に述べたようなファジィ理論により定義できる。さらに、各制御則で仮定している制御指令に対応した停止位置は、列車の運動特性をモデル化したシミュレーションにて予測でき、これらにより各制御則を評価できる（図8）。

また、列車運転全体では、制限速度を遵守しながらの駅間走行制御や、省エネ運転を目的としたノッチ・オフによるだ行制御などのノウハウを組込むと共に、定位置停止制御中に前方列車の影響で速度を下げる、といった状況の変化にも柔軟に対応できるようになっている。

4.3 予見ファジィ制御列車自動運転の評価⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ 開発した予見ファジィ制御列車自動運転装置を、実システムに搭載するに先立ち、現在PID制御により実用化している従来制御方式と、シミュレーションにより性能を比較した。

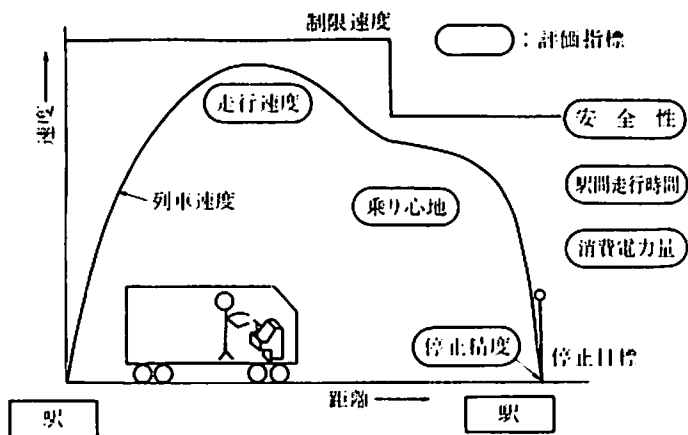


図5 列車運転の制御目的

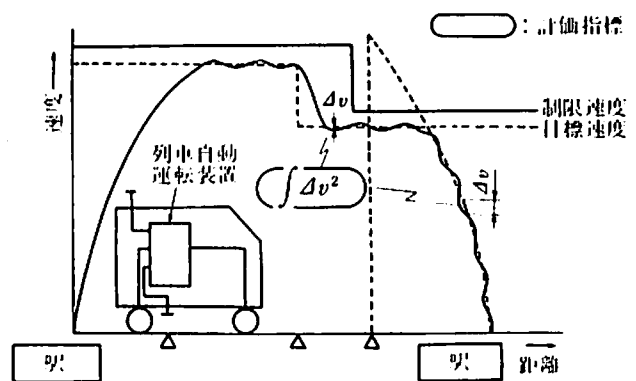


図6 従来方式による列車自動運転

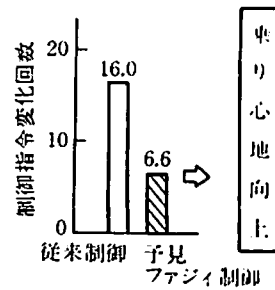
- | |
|--|
| 1: もし、ブレーキ開始点までの余裕が“大きい”なら、力行7ノッチとする。 |
| 2: もし、ブレーキ開始点までの余裕が“中位”なら、力行4ノッチとする。 |
| 3: もし、ブレーキ開始点までの余裕が“小さい”なら、ノッチオフとする。 |
| 4: もし、ブレーキ開始点までの余裕が“ない”なら、ブレーキ2ノッチとする。 |
| 5: もし、ブレーキ7ノッチで目標を“大きくオーバー”しそうなら、非常ブレーキとする。 |
| 6: もし、ブレーキ7ノッチで目標を“オーバー”しそうなら、ブレーキ7ノッチとする。 |
| 7: もし、現在のノッチで、“うまく停止”しそうな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

図7 定位置停止のファジィ制御則

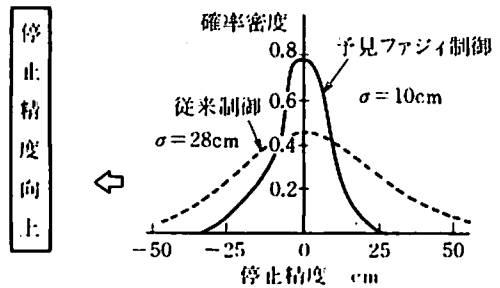
図9は、ブレーキ性能を定格値に対し±30%，こう配を±5%変化させた場合の結果である。予見ファジィ制御方式ではブレーキ性能，こう配条件が大きく変動した場合でも、停止誤差の標準偏差が10cmと1/3，制御指令（ノッチ）変化回数を1/3とした正確で乗り心地良い制御が実現できた。なお、列車の走行に伴うこう配による外力の変化，回生制動ブレーキから空気制動ブレーキへの切替えに伴う制動力の急変といった環境の変動に対する制御の頑強性（ロバスト性）についても、予見ファジィ制御方式では、熟練者の操作を模擬して、うまく対応した制御が可能となっている。

4.4 実システムへの適用 上記のように開発したファジィ制御列車自動運転システムを、昭

和62年7月15日に開業した仙台市地下鉄南北線（図1）に適用した。車両の床下に搭載されてい



(a) 制御指令変化回数の評価



(b) 停止精度の評価

図9 乗り心地と停止精度の評価

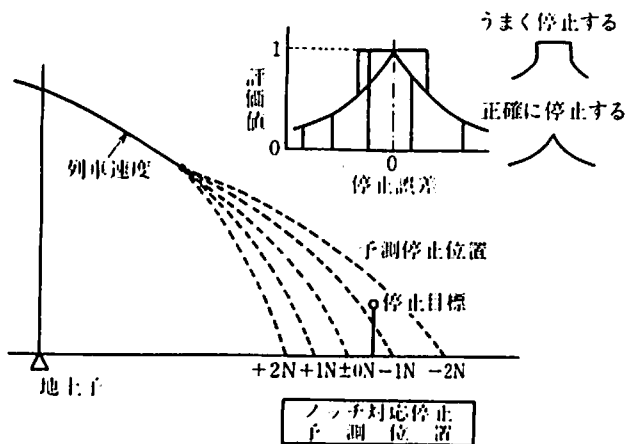


図8 停止位置の予測と評価

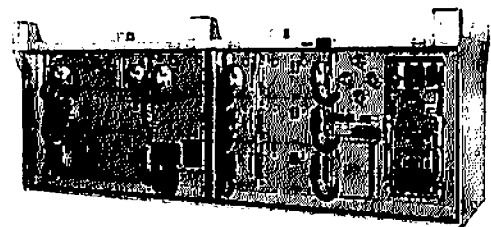


図10 予見ファジィ制御列車自動運転装置

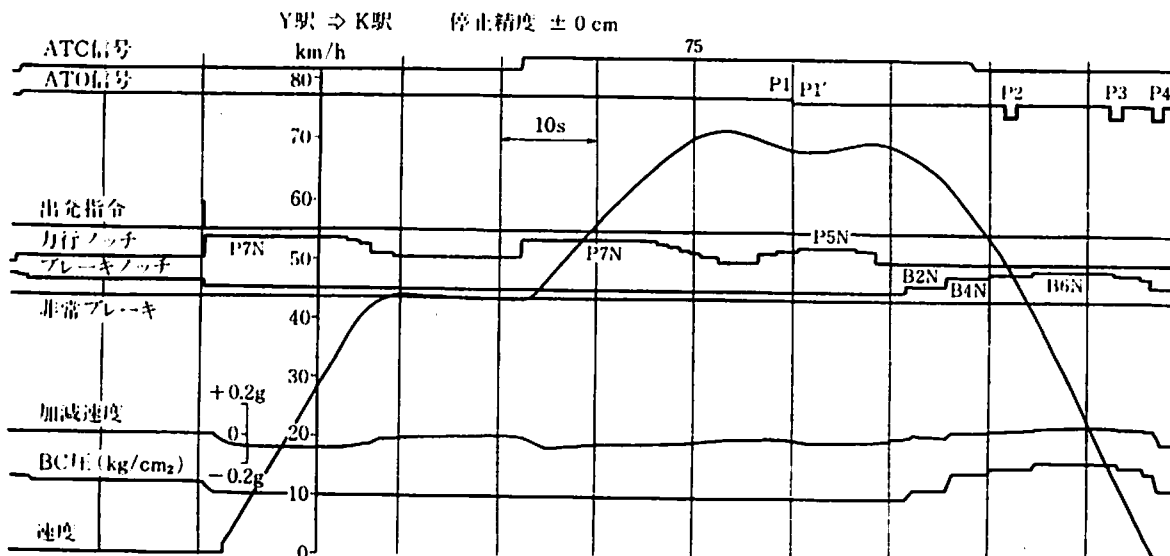
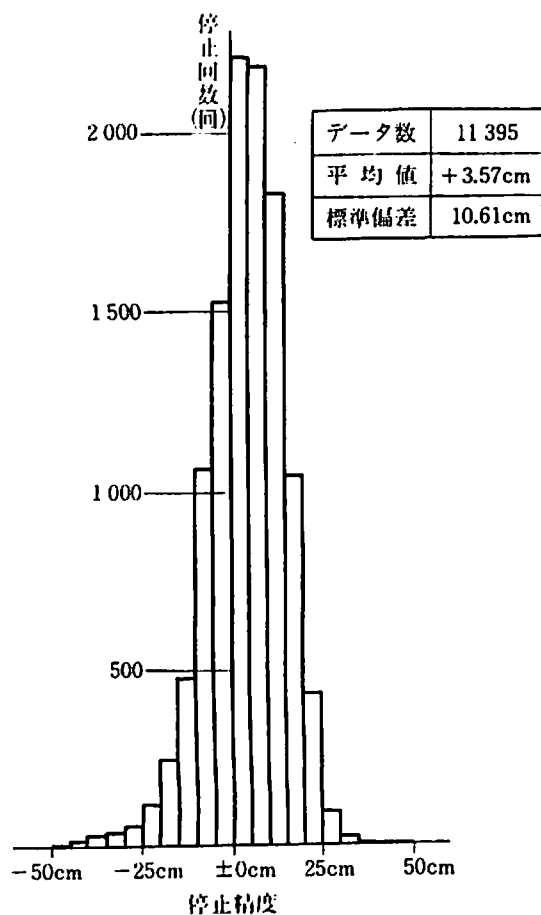


図11 実列車走行状況の一例



(全 19 編成を全駅に停止させ 11 395 データを収集)

図 12 停止精度測定結果

る列車自動運転装置を図 10 に示す。図 11 は、実列車の走行結果の一例であるが、制限速度の変化、こう配変化などへ、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、乗り心地のよい運転が実現されている。また停止精度についても 19 編成ある列車すべてを用い、全線にわたり試験走行 (11 395 回の停止) をした結果、停止精度誤差の平均値 +3.57 cm、標準偏差 10.61 cm と乗り心地、停止精度良い自動運転が実現できることを確認した (図 12)。本システムは、開業後も全編成順調に稼働中である⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

5. あとがき

本稿では、ファジィ理論の実システムへの適用として営業運転中である列車自動運転システムと、そこに用いた予見ファジィ制御方式について紹介した。このファジィ制御は、人間の制御に関する知的活動を計算機化しようとするものであり、これまで制御理論が先行し制御系を作りやすいモデルに基づき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。この制御は、人間とのインタフェースも良いことから、各種の実システムへ応用が広がると期待される。

おわりに、本システムの実用化に当たりご援助頂いた、仙台市交通局 佐藤 應 技監をはじめとする仙台市の関係者の方々に深謝します。また、本システムを開発した(株)日立製作所水戸工場の関係者の方々、日ごろからご指導頂く同システム開発研究所 堂免信義 所長、春名公一 副所長を始めとする関係者の方々に深謝する。

文 献

- (1) Zadeh, L.A., *Information and Control*, 8 (1965), 338.
- (2) 安信, 計測自動制御学会論文集, 23-9 (1987), 969.
- (3) 安信, 第 26 回 SICE 学術講演会予稿集, (1987-7), 443.
- (4) 稲葉, 日経エレクトロニクス, 426 (1987), 129.
- (5) 寺野・ほか 12 名, ファジィシステム入門, (1987), オーム社.
- (6) 菅野・ほか 8 名, 数理学, 284 (1987), サイエンス社
- (7) 菅野, 計測と制御, 18-2 (1979), 150.
- (8) 宮本, 計測と制御, 25-5 (1986), 458.
- (9) 安信・宮本, 電気学会誌, 104-10 (1984), 867.
- (10) 廣田, 情報処理, 28-8 (1987), 1065.
- (11) 安信・ほか 2 名, 計測自動制御学会論文集, 19-11 (1983), 873.
- (12) 安信・ほか 2 名, システムと制御, 28-10 (1984), 605.
- (13) 佐藤, 車両と機械, 1-8 (1987), 4.
- (14) 庄子・ほか 5 名, 第 24 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, (1988-2), 242.

(原稿受付 昭和 63 年 2 月 17 日)