

解 説

ファジィ推論を利用した列車自動運転†



安 信 誠 二†

1. はじめに

最近、ファジィ (Fuzzy) 推論の実システムへの応用が着実に進みつつある。このファジィ推論は、「速度が低い」とか「うまく停止する」といった、人間が言葉で表現している概念 (命題) に含まれる主観的なあいまいさ (fuzziness) を、その状態量の全定義域で 0 から 1 までの値をとる関数 (メンバーシップ関数) により定義するファジィ集合^{1),2)}に基づいている。

制御の分野においても、熟練運転員の運転 (制御) に関する知的情報処理をアルゴリズム化し計算機により代行するエキスパートシステムの具体的な実現として、経験則をファジィ推論により実行するファジィ制御方式の実システムへの適用が進みつつある^{3),4)}。このファジィ制御では、リアルタイムに変化する対象システムの状況に対応して、どのような指令を与えたらよいかを、熟練者の知識と状況把握に基づき、計算機が意思決定を代行し制御指令を決定している。

われわれは、対象システム本来の数多くある制御目的をバランスよく評価しながら制御指令を決定している熟練者の思考過程をアルゴリズム化できる、予見ファジィ制御方式を提案した⁵⁾⁻⁷⁾。本方式は、昭和 62 年 7 月に開業した仙台市地下鉄 (図-1) の列車自動運転システムに適用され、熟練者並みの運転を計算機制御により実現している^{8),9)}。ここでは、人間の知的情報処理を計算機化する具体例として、ファジィ制御の概要とその実システムへの適応のようすについて紹介する。

また、このファジィ制御方式の考え方は、運転知識だけでなく、車掌が行っているような情報サービスを提供する知識の計算機化にも有効である。そこでここでは、ファジィ制御の次の展開として検討が進められている制御・情報サービス統合化方式^{10),11)}についても紹介する。

2. 熟練者の運転における情報処理

まず、熟練者が運転 (制御) において、どのような情報処理 (知的活動) を行い制御指令を決定しているかを考えてみる。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、制御ノウハウを蓄積している。これにより、外乱や対象システムの特性の変動により変化するシステムの動きに柔軟に対応し、制御目的を満足するような制御指令を決定している。

この熟練者の制御指令決定に関する情報処理を、まとめてみると、(a)「もし、 $\bigcirc_1\bigcirc_1$ の状態ならば、 $\Delta_1\Delta_1$ の制御指令を出したらよい制御ができるし、もし、 $\bigcirc_2\bigcirc_2$ の状態ならば、 $\Delta_2\Delta_2$ の制御指令を出したらよい制御ができそうだ。」といったいくつかの特徴的状态に対して、現状がどの程度似ているかを評価する知識に基づく多次元的状態評価と、(b)さらに、対象システムの動的特性をも考え、「もし、この状態で $\Delta_1\Delta_1$ の制御指令を出したならば、 $\diamond_1\diamond_1$ のように動くから、対象システム本来の制御目的 $\square\square$ をある程度満足した制御ができそうだ。一方、 $\Delta_2\Delta_2$ の制御指令を出したならば、 $\diamond_2\diamond_2$ のように動くから、対象システム本来の制御目的 $\square\square$ を十分満足した制御ができそ



図-1 仙台市地下鉄 (昭和 62 年 7 月開業)

† Automatic Train Operation System Based on Fuzzy Reasoning
by Seiji YASUNOBU (Systems Development Laboratory,
Hitachi, Ltd.).

†† (株)日立製作所システム開発研究所

うだから、今は $\Delta_2\Delta_3$ の制御指令にしておこう。」といったように、現時点で実行可能な制御指令に対して制御結果がどうなるかを予測し、それが制御目的をどの程度達成できるかを評価する多目的評価、の二つの思考過程として考えることができる。ファジィ制御では、これらの対象システムを大局的に捉えた人間の経験則に基づく情報処理を計算機化しようとしている。

3. 従来の計算機制御とファジィ制御

ファジィ制御は、「あいまい制御」と呼ばれることがあるが、その言葉から連想されるように、不確定的でいかげんな動きをするものではない。人間の経験則の中に含まれる命題の意味をファジィ集合を用いて明確に定義し、大局的判断に基づいた数少ない特徴ある制御則の集まりに基づき、それらを総合的に評価し、同一状況に対しては常に同じ制御指令を出力する確定的な制御である。

3.1 従来はモデルを対象を押さえ込む制御

まず、従来の計算機制御方式では、どのようにしているかを紹介する。従来は目標値をあらかじめ定め、対象システムに対する外乱や特性の変動が生じて、それを押さえ込み、常に目標値通りの動きをさせようとするフィードバック制御方式が主体であった。この方式では、最初に対象システムの線形モデルと目標値を設定し、それに基づきコントローラを設計する。そして、実際の制御系に組み込まれたコントローラは、特性の変動や外乱によって変化する対象システムに対して、あらかじめ定められた評価式によって目標値と状態量との偏差を評価する単純な処理を行い、制御指令を決定していく(図-2)。

この従来制御方式では、統計的にみて追従誤差の平方和が最小となるような制御は実現できる。しかし、その制御結果が対象システム本来の制御目的を満足しているかどうかは、また別な問題であり、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くある。

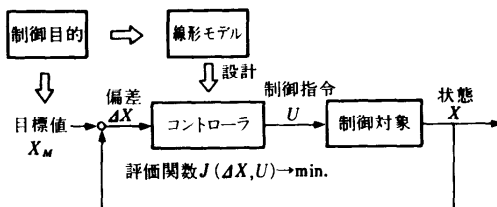


図-2 従来制御方式

3.2 人間の知識に基づくファジィ制御

熟練者の運転において思考している情報処理を、(i)知識工学：人間の経験則を言葉(記号)によりルール化、(ii)ファジィ論理：言葉に含まれる意味をファジィ集合論によって定量化し演算、さらに、(iii)シミュレーション：対象システムのダイナミクスをシミュレーションし動きを予測、といった技術を統合化して、ファジィ推論を行い制御指令を決定しようとするのがファジィ制御である(図-3)。この制御には、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、実用化されつつある。

(a) 状態評価ファジィ制御

人間の意思決定を、対象システム自体のモデルを作成することなく、過去の経験による状況の総合判断としてアルゴリズム化する推論に基づく制御方式である。すなわち、熟練者の状況判断を、言葉によりマニュアル化し、計算機がそのマニュアルに従い状況を把握し実行していく。

この方式では、速度と加速度によってアクセルを決定するような対象を例にとると、「もし(If)速度が低く、加速度が小さければ、(then)アクセルをもう少し踏む」、「もし(If)速度が高く、加速度が大きければ、(then)アクセルを緩める」といった対象システムの操作経験に基づき制御指令を推論する。

推論に当たっては、観測した速度と加速度の状態量が、各経験則の前件部(If部)に記述されている「高い」、「低い」といった人間の主観から定義したファジィ満足度関数にどの程度適合しているかを評価し、後件部(then部)の制御指令候補のファジィ集合を求め、すべての制御則の制御指令候補を併せて考慮し、制御指令であるアクセルの加減量を決めている。

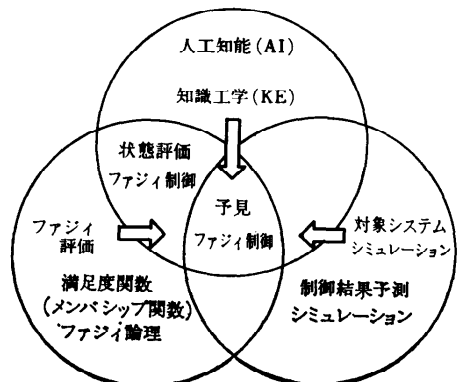


図-3 ファジィ制御の位置付け

(b) 予見ファジィ制御

この制御は、人間の運転を、実行可能な制御指令の代替案の実行を仮定し、制御目的がどうなるかを対象システムの部分的モデルに基づき予測・予見して得た制御結果を評価（満足できるものかどうかを評価）して、最適な制御指令を決定するものとしてアルゴリズム化する推論に基づく方式である。

列車運転の場合を例にとると、「もし (If) 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、ならば (then)、ブレーキを少しかける。」といった、経験則に基づき制御を行う。ここでは、現在の列車の状況で、出力可能な制御指令を仮定した場合の制御結果を、列車運動シミュレーションにより予見・予測し、前件部 (If 部) に記述された制御目的を評価し、後件部 (then 部) の制御指令の評価値を求める。この評価値を総合的に判断し制御指令を求めることにより、乗客にとってもっとも望ましい結果となるように列車を運転していく (図-4)。具体的推論過程は、次章に述べる。

このようにしてファジィ制御では、計算機を用いて熟練者の制御に関する知的活動を実行して行く。この制御は、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。またこの制御では、ファジィ集合により各制御則を定義しているため、数少ないが特徴ある制御則を用いて、要所要所を押さえた運転を行える。

以下、列車運転を例にとりファジィ制御の適用例を述べる。

4. 列車自動運転への応用例とその効果^{6), 8)}

4.1 列車運転と自動化

列車の運転とは、出発信号により加速を開始し、制限速度を超えないように列車速度を制御、次の駅の停止目標に列車を停止させる制御である。

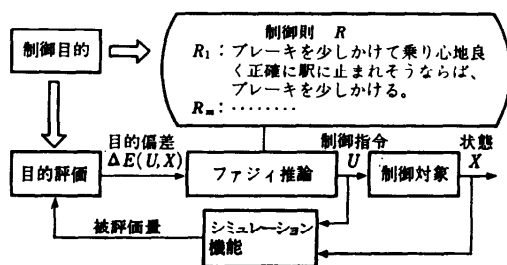


図-4 予見 (目的評価) ファジィ制御方式

列車運転全体で重要な評価指標は、(1)乗客の安全性を確保、(2)乗り心地を維持、(3)制限速度を順守、(4)駅での停止精度を守る、(5)駅間走行時間を短縮、(6)消費電力量を節約、などがあげられる。これらが状況に応じて局所的・全体的に複雑に組み合わせり、この運転の制御目的となる (図-5)。

この列車の運転を、運転士に代わり行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により、国内外の各地の地下鉄などで実用化されてきた。これらの実用化方式では、列車に搭載されたコントローラが走行中に評価しているのは、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本来の制御目的は、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することになる。

4.2 熟練運転士による列車運転のファジィ制御化

熟練者の運転を組み込み実現しようというのがファジィ制御である。熟練運転士による運転は、常に同じ速度パターンで運転されている訳ではない。たとえば停止制御においては、乗客の乗り心地を考えながら、停止精度の良い運転を実現している。ファジィ制御では、この熟練運転士の制御に関する知的ノウハウを組み込んだ制御を計算機により実現しようとしている。

たとえば、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

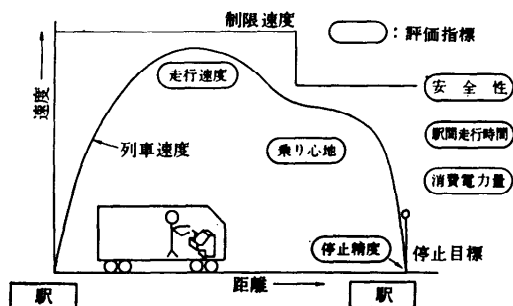


図-5 列車運転の制御目的

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、列車位置、速度、減速度から運動モデルを用いて、計算可能である。

したがって、運転士が考えている経験則は、「もし、ブレーキを保持したとき、うまく停止できるなら、ブレーキを保持する。」「もし、ブレーキを少し（1ノッチ）強くしたとき、乗り心地良く、正確に停止できるならば、ブレーキを少し強くする。」といった形式の制御則に書き換えることが可能である。図-6 に定位置停止における予見ファジィ制御の推論過程を示す。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、ファジィ集合により定義され、各制御指令（ノッチ）の仮定値に対して列車の現在位置・速度、ブレーキ性能などから予見した停止位置により評価される。さらに、前回のノッチ切替え後の経過時間に基づき「乗り心地が良い」が評価され、これらの min 演算を行い各指令の評価値としている。さらに各指令の中から、最大の評価値をもつものを選択し、ブレーキ系への制御指令としている。

実システムにおいては、主に制限速度を守り走行するために9個の駅間走行制御則を、また、停止させるために13個の定位置停止制御則を組み込んでいる。これらの制御則を列車の動きと共に、0.1秒ごとにマイクロ・コンピュータで処理し、停止精度、乗り心地などを考慮しながらブレーキの強さを決めていく。これにより、熟練者と同等の運転をコンピュータで実現できる。

4.3 ファジィ制御列車自動運転の効果

開発したファジィ制御列車自動運転システムは、す

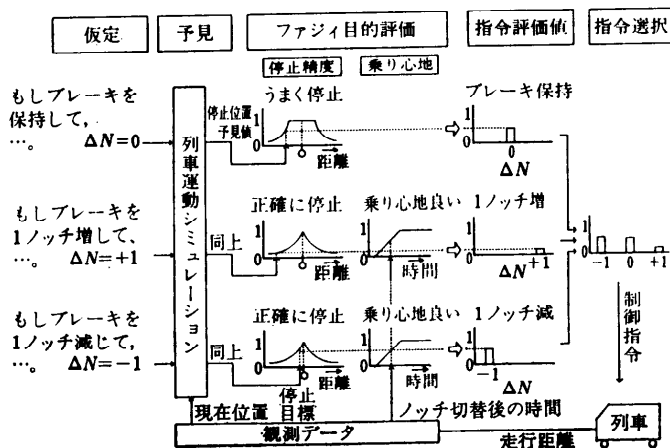


図-6 列車運転における予見ファジィ制御の推論過程

で昭和62年7月より仙台市地下鉄（図-1）にて営業運転に供し、熟練者並みの運転を実現している。

計算機シミュレーションにて実際の運転条件を与え、ファジィ制御方式と従来制御方式を比較した。その結果ファジィ制御を用いると、乗客数の増減などによりブレーキ性能が、停止駅の違いにより勾配条件が大きく変化した場合でも、停止誤差の標準値を約10cm、ノッチ変化回数が6.6回と、共に1/3とした正確で乗り心地良い制御が実現できる結果を得ている。また、実システムにおける走行実験において、全列車を全駅間にて一万回以上停止させた結果（図-7）でも、乗り心地良く、±30cm以内に99%停止でき熟練者と同等の運転を実現できることを確認した⁹⁾。その運転の状況および乗り心地については、実際に乗車し体験していただきたい。

5. 制御・情報サービスの統合化への展望^{10)~12)}

上記のように、熟練運転者の知的情報処理の計算機化を実用化することができた。さらに計算機による人間の情報処理の代行という観点より、列車運転などの人間とのかかわりが強いシステムにおける熟練者の役割を考えてみる。これらのシステムでは、対象システムの物理的操作を行う運転者と共に、その動作状況を利用客に説明する、車掌や案内人（ガイド）などが存在し、これによって利用客は、心理的にも快適に安心

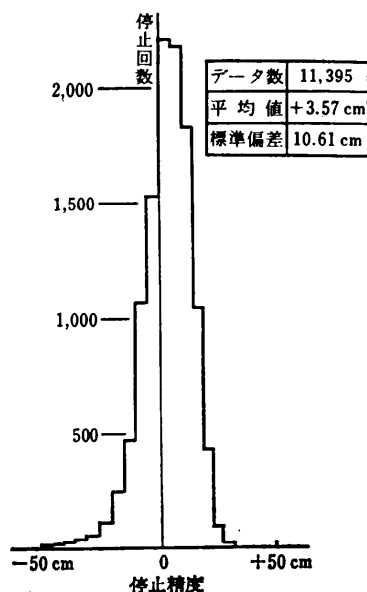


図-7 停止精度の実測結果

してこのシステムを利用している。すなわち、列車システムを例にとると車掌は、ポイント渡りによる横揺れの予告、減速ブレーキの予告などの制御情報の提供、さらには、乗り継ぎ列車の案内などの外部情報を提供するなど、時間・場所をわきまえた情報提供により、利用客に心理的サービスを提供している。また、列車などの自動運転では、機器の監視とドア開閉などの安全確保のために乗務員が運転席に乗務しているが、ただ単に自動運転を実行するだけではなく、計算機が現在のシステム状態をどのように捉え、どういう理由で次の操作をするのかを、人間に教える情報サービスが重要になってくる。そこで、従来ファジィ推論を適用し開発を進めてきた熟練者の制御に関する知的情報処理の計算機化に加えて、その制御に関連した情報サービスに関する知的情報処理をも統合化し組み込む方式について開発が進められている。

この方式は、(1)対象制御部、(2)情報サービス部、(3)知識編集部、に大別され、熟練者の知識に基づき作成された各ルールを用いて、乗客、乗務員などへの

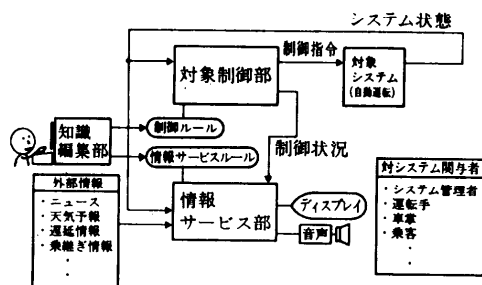


図-8 ファジィ制御・情報サービス統合化方式の概要

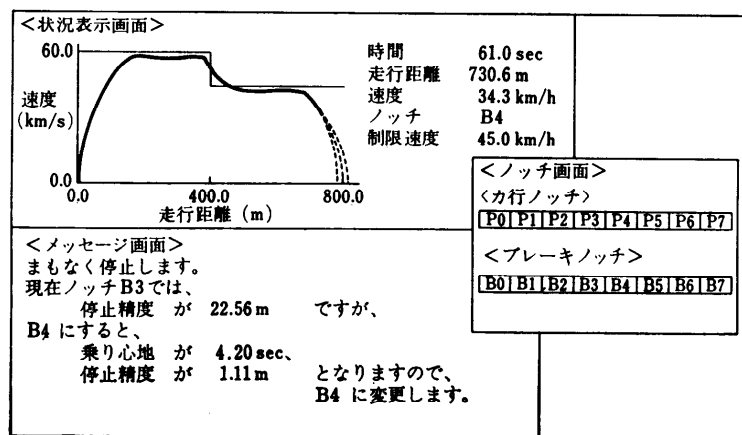


図-9 列車運転支援用ファジィ制御・情報サービス統合化システム画面例

適切な情報サービスを心掛けながら、対象システムの自動運転を行うことを目的としている。

情報サービス部では、対象システムの状態や対象制御部より入手した制御状況を、情報サービスルールに記述された知識に基づいて推論を行い、サービス情報や外部情報(ニュース、天気予報など)を、タイミングを考慮しながら、ディスプレイ、音声出力装置などに出力し、運転手や乗客らのシステム関係者に提供することになる(図-8)。

図-9に本方式を適用した列車運転支援システムの乗務員への表示画面例を示す。この画面は、駅に停止間際の運転状況の表示例であるが、現在までの運転履歴を状況表示画面に表示すると共に、情報サービス部の出力としてメッセージ画面に、計算機が「まもなく停止する。」と捉えている情報と、「現在のブレーキ(B3)では、22.56 m オーバして停止しそうであるが、ブレーキを少し強く(B4)することにより、1.11 m とうまく制御でき、乗り心地的にも問題無いため、ブレーキを少し強くする。」との制御指令決定における推論理由の説明が表示されている。

本方式の適用により、計算機による列車運転の状況を乗務員が知ることが可能であり、前方監視や案内放送などを安心して行うことができる。また、乗客に対しても、ブレーキを強くかける予告や、再加速の案内を行うことができ、乗客へのサービス向上を図った、より人間に快適なシステムを実現していくことが可能である。

6. おわりに

本稿では、熟練者の運転に関する知的情報処理をフ

ァジィ理論を用いて計算機に組み込み、実システムの運転を行っている列車自動運転システムと、さらに、車掌などの案内人による情報サービスを制御と統合化して提供するシステムについて紹介した。ここで用いたファジィ推論は、人間が状況を大雑把に捉え推論している情報処理を、その意味把握を含めて計算機化しようとするものである。ここで紹介したファジィ制御や情報サービスの考え方は、人間とのインタフェースもよい

ことから、広範な情報処理の分野への応用に有効であろうと考える。本稿がその適用のきっかけになれば幸である。

終わりに、列車自動運転システムの実用化にあたりご援助いただいた、仙台市交通局の関係者の方々に深謝いたします。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、日ごろからご指導いただく同システム開発研究所堂免信義所長を始めとする関係者の方々に深謝します。

参 考 文 献

- 1) Zadeh, L. A.: Fuzzy Sets; Information and Control, Vol. 8, pp. 338-353 (1965).
- 2) 寺野他: ファジィシステム入門, オーム社 (1987).
- 3) 菅野: ファジィ制御, 日刊工業新聞社 (1988).
- 4) 稲葉: 実用期に入ったファジィ理論, 日経エレクトロニクス, 1987. 7. 27 (No. 426), 129/152 (1987).
- 5) 安信他: Fuzzy 制御による列車定位置停止制御, 計測自動制御学会論文集, 19 巻, 11 号, pp. 873-880 (1983).
- 6) 安信他: 予見 Fuzzy 制御方式による列車自動運転, システムと制御, 28 巻, 10 号, pp. 605-613 (1984).
- 7) 安信: 人間の制御戦略に基づく Fuzzy 制御方式の一提案, 計測自動制御学会論文集, 23 巻, 9 号, pp. 969-976 (1987).
- 8) 安信: 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—, 日本機械学会誌, 91 巻, 836 号, pp. 639-644 (1988).
- 9) 庄子他: 仙台市地下鉄南北線自動列車運転装置, 第 27 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. 243-246 (1988).
- 10) 安信他: Fuzzy 応用による制御・情報サービス統合化方式の提案, 第 6 回知識工学シンポジウム, pp. 51-54 (1987).
- 11) 津田他: Fuzzy 応用による制御・情報サービス統合化方式の列車運転支援システムへの適用, 第 7 回知識工学シンポジウム, pp. 101-104 (1988).
- 12) 高岡他: 車両搭載情報制御システム, 日立評論, Vol. 70, No. 7, pp. 717-724 (1988).

(平成元年 4 月 27 日受付)