

予見Fuzzy制御方式の開発と 列車自動運転への適用

(株)日立製作所 システム開発研究所 安信誠二 河野克己
宮本捷二 能見 誠
(株)日立製作所 水戸工場 関野真一

1. はじめに

近年、従来人間が行なってきた制御(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な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い、これは現在実用化されている制御システムの多くが線形制御(最適制御・PID制御)方式を基盤にしているからで、もともと非線形な特性をもつ対象を多くの評価指標に基づいて制御すべき所を、線形近似しさらに評価関数を1つに限定して制御していたことに最大の問題がある。そこで、この問題を解決するものとして、非線形な対象をモデル化でき熟練者の定性的であいまいな評価指標であるノウハウをアルゴリズム化できるFuzzy理論に着目し、人間の断片的な経験則を、複数の目的に対応したFuzzy評価関数をもち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、最良の評価を得る制御指令を決定できる予見Fuzzy制御方式を開発した。さらに、本予見Fuzzy制御方式を運転士に代って列車を運転する列車自動運転システムへ適用し、熟練運転士と同等な列車自動運転システムを開発した。

本報告では、開発した予見Fuzzy制御方式の概要と本方式を適用した(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)停止精度、(5)消費電力量、を評価指標とする列車自動運転システムについて述べると共に、シミュレーションにより、従来実用してきたPID制御による列車自動運転と比較を行い、本方式の有効性の検討を行う。

2. 予見Fuzzy制御方式

Fuzzy制御は、人間の定性的な評価指標を定量化し制御を行う方法として、Mamdaniらによって提案され、プラントの制御、交差点の制御などに応用されてきた²⁾。我々は、このFuzzy制御を列車自動運転へ適用してきたが、停止精度のような制御結果の予測値を考慮した制御が行なえなかった³⁾。そこで、以下に述べる予見Fuzzy制御方式を開発した。

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。評価指標X, Yに対する、良い、悪い、といった評価を、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集合は次式で表わせる。

$$A_i = \int_V \mu A_i(x) / x \quad (1) \quad B_i = \int_V \mu B_i(y) / y \quad (2)$$

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。」を時々刻々評価する。

$$R_i : "IF(U \text{ is } C_i \rightarrow X \text{ is } A_i \text{ and } Y \text{ is } B_i) \text{ THEN } U \text{ is } C_i" \quad (3)$$

この制御則の前提部(IF部)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、

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

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

と表わせ、図1中央のピラミッド状のものとなる。

次に、全体制御則Rを用いた予見Fuzzy制御指令の決定方法について述べる。ここで、制御を行なっている時刻を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_i is C_i"を実行した場合に、評価指標x及び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(あいまいモデル)に基づき予測し、その結果がメンバシップ関数μ_x(x), μ_y(y)で定義されるFuzzy集合X(C_i, t), Y(C_i, t)で求めたとすると、この時刻tでの制御則の前提部P_itは、

$$P_{i|t} = (A_i \cap X(C_i, t)) \times (B_i \cap Y(C_i, t)) \quad (6)$$

となり、図1に示すピラミッドの一部となる。時刻tでのP_itの最大値を、

$$r_i(t) = \sup \mu_{pi}(C_i : x, y) | t \quad (7)$$

によって求め、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、

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

により求める。これにより、全体制御則Rの内でも最も確かな制御則R_jが決定できる。

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を予見Fuzzy制御コントローラの出力として選択し対象システムを制御する。

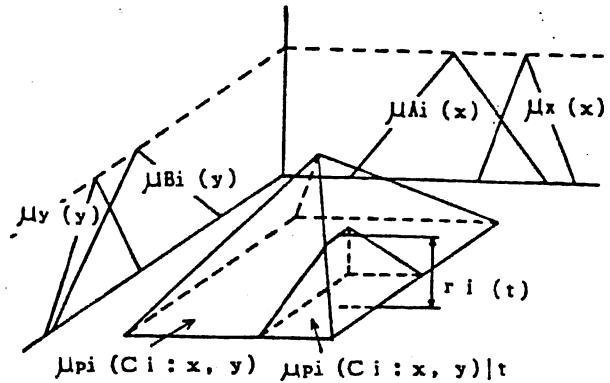


図1 予見Fuzzy制御則の評価

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、2つの駅間の列車の制御を行なうシステムある。(図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 Con

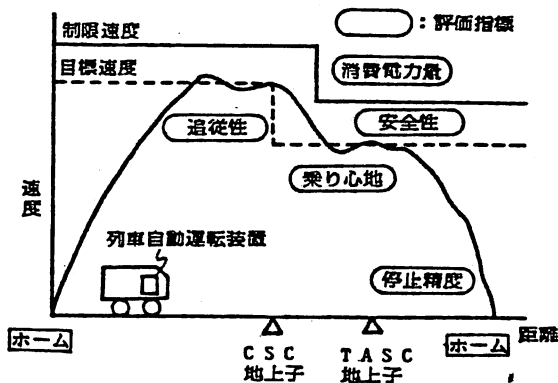


図2 列車自動運転と評価指標

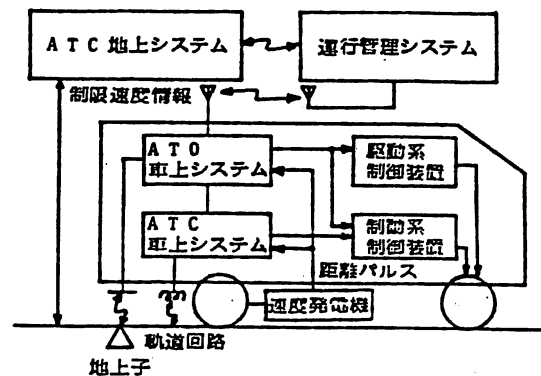


図3 列車自動運転システムの構成

control) システムが作動しない領域で列車の制御を行なう。列車自動運転システム全体の構成を図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・制動系への制御指令(ノッチ)を出力するものである。

本報告では、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

本報告では、運転士の経験をそのまま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。そこで我々がこれまで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から、運転士の制御を考えてみる。この制御は、駅間走行制御(CSC: Constant Speed Control)、定位置停止制御(TASC: Train Automatic Stop Control)、の2つに大別することができるが、ここでは、紙面の都合により、以下定位置停止制御の部分を中心に述べる。

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る。さらに、時々刻々以下のことを評価しながら制御ノッチ(指令)の選択を行なう。

(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、そのノッチを確保する。

(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

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_z(v): 列車速度v(t)に対応したB地点の位置(m), t_z = (X_z(v) - 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位置(m), X_e: 許容停止誤差(m), b: 正定数,

$$L(x, a, b) = \begin{cases} 0.0 & : x \leq a - b, a + b \leq x \\ 1 - |x - a| / b & : a - b < x < a + b \\ 1.0 & : a - b \leq x \leq a + b \\ b / |a - b| & : x < a - b, a + b < x \end{cases}$$

$$F(x, a, b) = \begin{cases} 0.0 & : x \leq a - b \\ 1 - |x - a| / b & : a - b < x < a \\ 1.0 & : a \leq x \end{cases}$$

(1) 乗り心地(C)の評価指標の定義(図4)

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っている時間t_cで評価する。

(a) 乗り心地が良い(CG)

$$\mu_{CG}(t_c, N_c) = F(t_c, 1 + N_c / 2, N_c / 2)$$

(b) 乗り心地が悪い(CB)

$$\mu_{CB}(t_c, N_c) = 1.0 - \mu_{CG}(t_c, N_c)$$

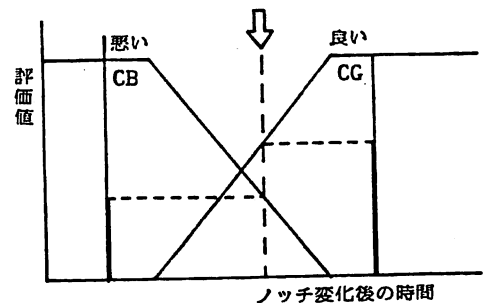


図4 乗り心地の評価指標

(2) 停止精度 (G) の評価指標の定義 (図5)

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)

$$\mu_{GG}(X_p(N_p)) = G(X_p(N_p), X_t, X_e)$$

(b) 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 (図6)

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ある (RT)

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

(b) 自由ゾーン内にある (RF)

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

5.2 Fuzzy制御則の決定

4章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は現在のブレーキ・ノッチの値に対する変化分を表す。

4章の(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,
 そのままうまく停止できる → G is GG, に対応しており、即ち、

(T1) 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章(T-2), (T-3)の経験則からも同様にして、

(T2-1) IF(N is 0 → R is RF and C is CG), THEN N is 0.

(T2-2) IF(N is 1 → R is RT and C is CG), THEN N is 1.

(T3) 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。

同様にして、駅間走行制御についても制御則が決定できる。これらの制御則を例えば100msec毎に評価することによって、運転士と同様の制御を行なうことができる。

6. シミュレーションによる比較・検討

提案した予見Fuzzy制御は、すでにマイクロコンピュータにより現車試験を行い、その実用性の検討を行なったが、ここでは計算機シミュレーションにより、従来より実用化しているPID制御と比較を行なった結果を示す。(図7、図8)予見Fuzzy制御では、PID制御と異なり無理に目標速度パターンに追従することなく、常に最終的な停止位置と乗り心地を評価しながら制御を行なっているためブレーキ性能の

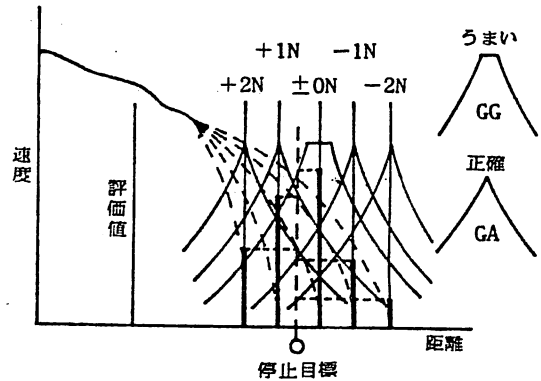


図5 停止精度の評価指標

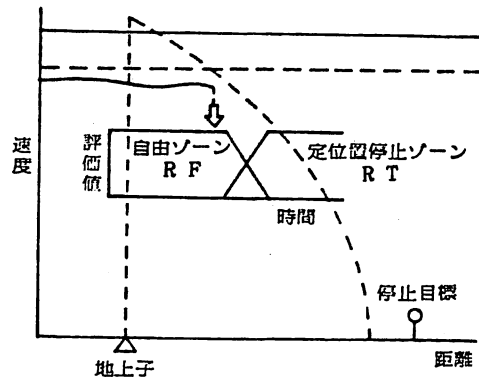


図6 走行時間の評価指標

変動、勾配条件の変動に対し停止誤差の標準偏差 σ を1/3、ノッチ変化回数を1/2とした正確で乗り心地の良い制御となっている。消費電力量については、惰行運転などの活用により、1000mの駅間にて同一走行時間で約10%の節約を図ることができている。また、ブレーキ力の急変といった環境の急変に対する制御の頑強性(ロバスト性)について比較した結果(図9)提案した予見Fuzzy制御では、従来のPID制御がパターンに追従しきれないような状況に対しても、運転士と同様にうまく制御が可能である。

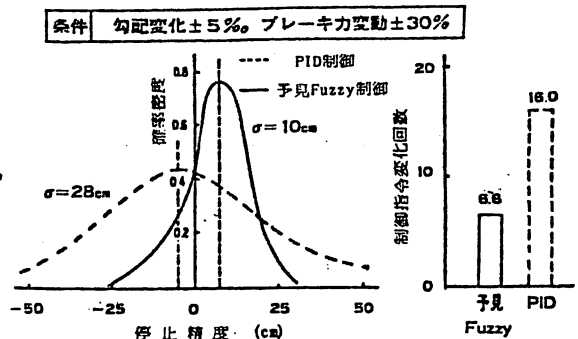


図7 停止精度と制御指令変化回数の比較

7. おわりに

本報告では、開発した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制御方式と、この制御方式を列車自動運転に適用し開発した、運転士の経験則に基づき、(1)乗り心地、(2)追従性、(3)停止精度、(4)走行時間、(5)消費電力量、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、運転士の経験則をアルゴリズム化した正確で乗り心地良く、環境の変動に強い上に、約10%の省エネルギー運転が可能な列車自動運転が実現できた。

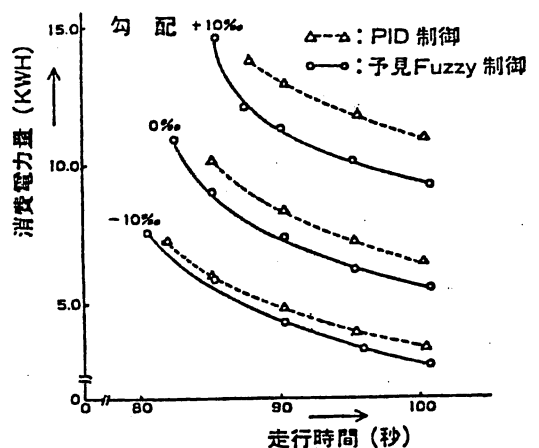


図8 走行時間に対する消費電力量の比較

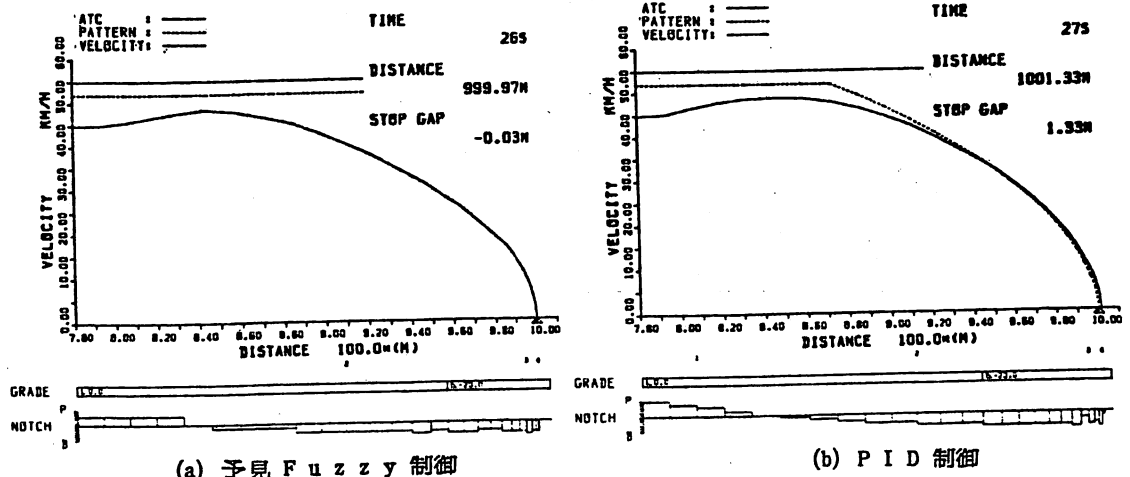


図9 環境の急変に対する制御のロバスト性の比較 (駅手前60mで勾配を平担から-20%へ変化)

【参考文献】 1) 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) 2) 菅野：あいまい集合と理論の制御への応用、計測と制御、18-2,150/160(1979) 3) 安信 他：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) 4) 関野 他：Fuzzy制御方式による列車自動運転装置の開発、第20回鉄道サイバネ(1983)