論文要旨

システム制御情報学会論文誌, 3 巻, 4 号, pp. 93~102 (1990)

可能性分布間の相互関係を考慮したファジィ関係の拡張とファジィ線形計画問題への応用

乾口 雅弘・久米 靖文

本報告では、ファジィ数値計画問題の最適解、有効解に関する従来の定義における問題点を指摘し、その問題点を克服するための基礎として、可能性分布間に相互関係がある場合のファジィ関係の拡張方法を提案する。拡張されたファジィ関係の性質を調べ、拡張されたファジィ関係を用いて、ファジィ線形計画問題の最適解の定義を修正する。修正された定義では、定義の問題点から生じていた修正前の欠点が改善されていることが示される。

システム制御情報学会論文誌, 3 巻, 4 号, pp. 103~109 (1990)

列車運転時隔を短縮するための新しい制御方式の提案

大島 弘安・東口 實

列車の運転時隔を短縮することは輸送力増強の上で大きな意味を持つ。ATC を従来よりも多段とし列車速度がこれを越えた時は停車まで緩まないブレーキを作動させることと、これに内接するパターンをもうけこれにそって列車速度を自動制御することと、列車後部検知を細分化することにより、一例では現行 ATC での最小運転時隔 140 秒である駅間を 116 秒まで短縮できることを明らかにした。これは 17% の輸送力増強にあたる。

システム制御情報学会論文誌, 3 巻, 4 号, pp. 110~117 (1990)

画像情報を利用した移動体の位置姿勢計測法

藤原 直史・米澤 徹・津村 俊弘

本論文では、TV カメラを用いた移動体（ビークル）の位置・姿勢計測手法を提案する。このシステムは、移動体に搭載したカメラと位置が既知である目標物（ターゲット）からなり、カメラの位置・姿勢を、ターゲットの画像を解析することにより計測する。またカメラがターゲットの方向を常に向くように追尾制御がなされる。この手法を用いて実験を行ない、位置・姿勢計測の有効性を確認した。

システム制御情報学会論文誌, 3 巻, 4 号, pp. 118~120 (1990)

区間パラメータをもつ線形システムのロバスト安定条件

小亀 英己・木田 浩・森 武宏

不確定パラメータがシステム行列の中にリニアに含まれるシステムのロバスト安定問題をパラメータの変動する範囲があらかじめ知れているものとして検討した。このとき発生し得るシステム行列の集合が行列ポリトープをなす事に注目すると、問題は行列ポリトープが Hurwitz 不変であることを検証することに帰着する。本稿ではポリトープの各頂点行列に対して求められたリアプノフ解から構成されるある行列をもとにして、行列ポリトープの Hurwitz 不変性が容易に検証できる一つのロバスト安定条件を提案するものである。

論文

列車運転時隔[†]を短縮するための新しい制御方式の提案*

大島 弘安**・東 口 實***

A Proposal of Novel Control System for Reducing Train Headway*

Hiroyasu OSHIMA** and Minoru HIGASHIGUCHI***

A control system for cutting down the headway of train operation is proposed. This system employs the following three measures. First, the system is provided with multistep ATC, and applies the brake that is unreleasable until full stop of the train once train speed exceeds the limited value. Second, a control pattern is incorporated into the system, and controls the train speed automatically according to the pattern. Third, improved definition by subdividing train detection at its tail end is applied. Simulation result shows that headway is reduced to 116 second by the proposed system against 140 second by conventional system. This fact signifies reinforceability of the carrying capacity by 17 %.

1. はじめに

昭 40 年代の初めに国内のほとんどの鉄道は列車運行の保安度向上と能率化を目的として自動列車制御装置 (ATC, Automatic Train Control System)^{††}もしくは自動列車停止装置 (ATS, Automatic Train Stopper)^{†††}の装備を終えた^{1,2}.

しかし、現在の都市交通においてはその輸送需要の増大は急激であり、それに対する線路設備の増強は環境などの理由から容易ではない。そこで、輸送需要の増大に列車運転の高密度化・高速度化で可能な限り対応すべく高能力の信号保安設備となる新しい列車制御方式を提案する。本方式は信頼度にそん色がなく、かつ、小型でまとまった装置として実現できるようになった半導体技術の大幅な採用によって、より精細な信号制御を行なおうとするものである。

2. 現行の ATC とその改善の余地

現行の典型的な ATC では軌道に併設された信号回路

は閉塞 (Blocking Section) と呼ばれる単位区分に分割されている。そしてそれぞれの閉塞ごとに信号機器が設けられ、それらはその閉塞区間内での列車在線の検知と、そこを通過するときの制限速度情報の送出を行なっている (Fig. 1)。すなわち、先行列車 (Leading Train) の後方に閉塞区間毎に 0_2 (絶対停止) 0_1 (許容停止) 45 (45 km/hr 制限) 65 (65 km/hr 制限) 80 (80 km/hr 制限) の信号が展開されている (Fig. 1)。ケース ①では続行列車 (Following Train) は 80 の区間にあるので 80 km/hr までの速度で走行することが許されている。先行列車が前進してケース ②のように一つ先の閉塞区間に入ると信号展開は閉塞単位ごとに一つずつ右方ヘシフトされる。

一つの閉塞区間に必要な長さは、その区間の許容最大速度に相当する速度で進入した列車をその区間内で 1 段下位の制限速度以下まで減速させるに十分な距離でなければならない。すなわち、この距離は空走距離 (Delay) と減速距離 (Braking) とシステムに必要な余裕 (Margin) を合算したもの以上でなければならない。ここで減速距離は真に必要なもので安全確保から止むを得ない。空走距離はブレーキの構造上必要な時素^{††††}によって生

* 原稿受付 1989. 6. 16

** 日立製作所 機電事業本部 Industrial Processes Group, Hitachi, Ltd.; 4-6 Kanda-surugadai Chiyoda-ku, Tokyo 101, JAPAN

*** 東京大学 先端科学技術研究センター Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo; 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153, JAPAN

Key Words : train, headway, automatic train control, high density traffic, fuzzy control.

† 列車運転上の 2 列車間の時間的な間隔をいい、通常秒・分などの単位を用いて表現する。

†† 列車の速度を自動的に制限速度以下に制御する装置 (JIS 1973)

††† 列車が停止信号に接近すると列車を自動的に停止させる装置 (同)

†††† むだ時間、運行時間見つもりに加えられる時間おくれ

Fig. 1 Operation of ATC

まれるもので、例えば許容最大速度が 80 km/hr の閉塞区間の場合 2.5 秒の時素をとると

$$2.5 \cdot 80 \cdot 10^3 / 3.6 \cdot 10^3 = 56 \text{ m}$$

となる。各閉塞ごとにこれを見込んで閉塞長を決める従来の方法では、制限速度段数の増加は、これによる速度向上の利点が各段ごと（各閉塞ごと）の閉塞長が長くなることにより打ち消されて列車の接近運転をむしろ阻害する。また一方制限速度段数の減少は 45 km/hr や 65 km/hr で徐行しながら先行列車に接近するという運転を不可能とするので実用面から不利である。ここに一つの改善の余地がある。

もう一つの改善の余地は列車在線検知の目の荒さを更に細分化することである。現行の列車在線検知は閉塞区間単位で行なわれ、その閉塞区間長は前述のような考え方から実際には 200 m 前後であるため、先行列車が 200 m 程前進して前方の閉塞区間に収まってしまうまで、続行列車に対する信号は上位信号に解除されない。細分化した列車後部検知が実現でき、その情報をもとに制限速度信号を小刻みにシフトすることができれば、特に先行列車が駅を離れて低速で走行している領域などで改善が期待できる。

さらに、現行の ATC の閉塞ごとに設けられた信号機

† ある理論系において故障が生じて、誤り出力が予め決められた安全側の出力のみに限られる時、その理論系はフェールセーフであるという。

器は、ワイヤードロジックで構成されたものであり、いわゆるインテリジェンスを備えていない。もし、ここにマイクロプロセッサなどで構成されたインテリジェンスを附加し、前後の列車の運転状況などから続行列車にとって有益な運転情報を見出し続行列車に伝えることができれば、ダイヤグラム乱れを誘発しやすい高密度運転環境において乱れ抑制という点で効果が期待できる。

3. 提案するシステム³

これまで述べてきたように現行の ATC には次の三つの改善の余地がある。すなわち

- (1) 追加空走距離を必要としない新しい制御方式の導入。
- (2) 細分化した列車後部検知による遅れの少ない速度制限の解除。
- (3) 地上装置にインテリジェンスを持たせ、得られた情報を続行列車に伝送する。

提案するシステムはこれら 3 点についてそれぞれ改善を施し、次の条件を加えてそれらを一つの新しい ATC システムとして構成したものである。

- (a) 安全性とフェールセーフ[†]性については現行 ATC と同等であること。つまり安全性とフェールセーフ性にかかわる技術思想と手法は従来と変えない。
- (b) 現行 ATC を提案方式で全的に置換できること

はもちろんのこと、高密度化の隘路となっている路線の一部の区間に現行 ATC と併設してもその効果が期待できること。

つぎにそれぞれの改善について述べる。

3.1 追加空走距離を必要としない制御方式

不必要に空走距離を追加しない制御方式とするには ATC からブレーキをかけるという動作を停止までに一回限りとするればよい。つまり現行の階段状の制限速度パターンの各段で空走距離が避けられない方式を、列車のブレーキ特性に見合った曲線状の制限速度パターンを作り列車速度がこれを越えた時に停車まで緩まないブレーキを作動させる方式に替えればよい。曲線状のパターンとすることによって続行列車は低速で先行列車により接近して運転することも可能となる。しかしこのような停止まで緩まないブレーキを頻繁に作動させると、停止発進を繰り返すために列車の運行をかえって乱すことになる。そこでこのパターンの内側に必要な制御余裕を残して内接するもう一つの曲線状パターンを設け、このパターンに追従するように列車速度を自動制御する。この自動制御に使用するブレーキは必要により強めたり弱めたりできる常用ブレーキである。ここで前者のパターンを EB (Emergency Brake) パターンと名付け非常ブレーキ (例えば減速度 4.0 km/hr/sec 空走時間 2.5 sec) を適用する。後者のパターンを CB (Control Brake) パターンと呼ぶ。列車から見て CB パターンの方が手前にあるので通常は列車は CB パターンの制御のみを受ける。

現存する一部の ATS には曲線の制限速度パターンを車上で演算の上作り出しているもの^{4,5}もあるが、提案システムでは ATC と同等のフェイルセーフ性を持たせるため、地上から多段制限速度信号 (例えば 8~20 段階。現行 ATC は 4~5 段階) を直接送り、これで EB パターンを近似させることにする (Fig. 2)。EB パターンは先行列車の移動に伴って順次シフトしていく。

また、この方式は低速で続行列車が先行列車にかなり接近できるので、端末駅での転線が最短時隔を決定づけている路線に対しても効果がある。

Fig. 2 によって従来の方式との違いを示すと、続行

Fig. 2 Effect of EB/CB Pattern (Conceptual)

列車が先行列車の影響を受け速度を制限しなければならない距離は現行 ATC 方式の場合 $L_1 \text{ m}$ であるのに対し、提案方式ではこれが $L_2 \text{ m}$ になり、先行列車による影響を受けないで走行可能な距離が $(L_1 - L_2) \text{ m}$ 増したことになる。これを先行列車の影響を受けないで走行できる最少運転時隔で表現すると現行 ATC は T_1 秒、提案方式では T_2 秒となり、 $(T_1 - T_2)$ 秒短縮されることになる。

3.2 列車後部検知の細分化

列車後部検知の細分化は列車の後部に標識信号発信器を設け、その信号を地上に連続的に布設された複数のループコイルで受信し、どのループコイル上に列車後部があるかを検出することにより行なわれる。ループコイルは先に述べた多段制限速度信号を伝送するものと共用する。1 ループの長さは例えば 20 m であり、その数は制限速度段数に等しい。したがってこの場合の細分化された分解能は 20 m である。細分化は駅出発直後の低速度の部分にのみ適用してある。

3.3 地上装置のインテリジェンス化

先行列車の遅れにより続行列車が速度制限を受けるとパターンに従って減速する。やがて先行列車が駅を出発すると速度制限は解かれ続行列車は Fig. 3 の B 点で再力行[†] ののち駅へ進入する。前駅出発から計って次駅到着までの時間は $(t_1 + t_2) \text{ sec}$ である。しかし地上のインテリジェンスで先行列車と続行列車の挙動が予測できる

† 力行とは原動力を加えて列車を加速する状態。再力行とは駅出発時の力行を除き、駅間で再度の力行を行なうことをいう。

Fig. 3 Selection of optimum entering speed

場合、続行列車をあらかじめ減速させておいて次駅への再力行速度を大きくする方が駅間所要時間を圧縮できることがある。すなわち $(t_3 + t_4)$ を最小とする再力行開始点 A の位置と最適速度を予測して、この条件に速度を抑制するための修飾速度インテリジェンス情報として続行の列車に伝送する。伝送路はさきに述べた複数のループコイルが共用できる。

A 点を CB パターン上の (t_4) を最小にする点であると仮定して、いくつかの速度に対して駅到着までに要する時間を試算すると Table 1 のようになる。この事例では、駅到着までの時間が最小となる A 点は 21 km/hr の地点であり、これは先行列車遅れ 17 秒に相当する。そこで先行列車が 17 秒以上の遅れのとき前もって速度を抑え、先行列車により速度制限が解除されると予測さ

Table 1 Speed at point A vs. time for train stop

Speed at Point A (km/hr)	Time for Train Stop t_4 (sec)	Equivalent to Lag Time of Leading Train (sec)
5.4	4.4	
3.8	4.0	
3.2	3.9	
2.1	3.8 (Min.)	1.7
1.8	3.9	
0.9	4.2	
0	4.2	2.6

れる時点で丁度 A 点に到着するようにすれば遅れの波及を最大 4 秒 (26 秒以上の遅れの時) くいとおめることができる。さらにブレーキ→惰行→力行と惰行→力行の機器応答時間差約 2 秒を加えると最大 6 秒の効果がある。

4. 装置の開発

これまでに述べた提案システムの列車運転時隔短縮にかかわる性能を実証的に評価するには、複数本の列車を相互に時間的な関連を持たせて運転することが必要である。しかし、これは現実問題として試験条件を設定する運転が極めて難しい。そこで運転時隔については現行 ATC との比較においてシミュレーションで評価し、一

Fig. 4 Block diagram of proposed system

方、目的通りの制御を行なう装置の実現性について実規模で車上装置、地上装置各1セットを製作することによって確認することとした。

全体のシステム構成を Fig. 4 に示す。

4.1 EB パターンの設定

EB パターンは、列車に非常ブレーキ (EB) が適用されたとき示すであろう速度軌跡 (Trail (EB)) に対し列車のそれぞれの進入速度での空走距離相当分を控除して得られる EB パターン (Virtual) を考え、これに内接する階段状のパターンとして与えられる (Fig. 5)。パターンの段数は多くするほど、より高い速度で列車を接近運転することができ、また高い減速度を得ることができる。しかしその反面地上装置の設備数を増加させてしまう。したがって EB パターンの段数は運転時隔短縮の効果とそのためのコストからきまる。

EB パターンは 5, 10, 15, 20 km/hr 刻みの 4 種について、また 1 ループの長さは工事の作業性から 5 m の整数倍にとるものとしてシミュレーションを行なった。結果を Table 2 に示す。5, 10 km/hr 刻みの場合、とり得る CB パターン減速度は 2.5 km/hr/sec, CB パターンの長さは 400 m となり、15, 20 km/hr 刻みの場合それぞれ 2.0 km/hr/sec, 500 m となった。このように CB パターンの長さが 100 m 違うと運転時隔にして約 5 秒の差となるため少くとも 10 km/hr 刻みとする必要があることが判った。5 km/hr 刻みと 10 km/hr 刻みでは CB パターンの長さにはほとんど差がないが、端末駅

Fig. 5 Designed EB/CB pattern

Table 2 Performances and speed step of EB pattern

Speed Step (km/hr)	Deceleration Available (km/hr/sec)	Length of CB Pattern (m)
5	2.5	400
10	2.5	410
15	2.0	500
20	2.0	520

での追い込みを考えると 5 km/hr 刻みの方が有利である。このようなことから装置としては 5 km/hr 刻みで最高速度 100 km/hr まで対応できるものとして 20 段階のシステムを製作した。試験に使用した EB パターンを Fig. 5 に示す。

4.2 製作した車上装置

Fig. 6 は車上装置の外観を示したものである。EB パターン制御を行なう部分は信号判別部も含めてフェイルセーフ性のある全デジタル構成のものである。これを更に 3 重系構成として、3 者択 2 論理をとっている。CB パターン制御部は自動列車運転装置用とほぼ同じ予見フェジ制御方式⁶によっている。

Fig. 6 Carborne equipment

5. システムの評価

運転時隔についての評価はシミュレーションプログラム「JUMPS」^{7,8}を用いて行なった。編成長、運転時隔共に限界に達していると考えられる通勤線区をとりあげ、実路線条件を用い現行方式と提案方式についてシミュレーションを行なった。列車長 200 m, 加速度 2.5 km/hr/sec, 停止減速度 2.0 km/hr/sec である。駅間最高速度が 90 km/hr と高く B 駅進入時の防護距離の大きい A 駅→B 駅と、E 駅での停車時分が 50 秒と長い D 駅→E 駅の二つのケースについて比較した。

5.1 EB/CB パターンによる効果

Fig. 7 は EB/CB パターンによる効果を D 駅→E 駅について調べたものである。縦軸は路線上の位置、横軸は経過時分である。斜めに走る帯の縦方向の幅は列車長を表わし、階段は先行列車による速度制限を受ける限界を示している。現行方式では丁度 140 秒が限界であり、したがってこれが最少運転時隔である。提案方式は 130 秒の時隔で作図されているが 9 秒の余裕があるため最少運転時隔は 121 秒である。帯の中に階段の角が一部喰い込んでいるがこの位置では駅停車のために列車は既に減速しておりパターンの制限は受けていない。

以上のことから、D 駅→E 駅の場合 EB/CB パター

Fig. 7 Effect of EB/CB pattern (simulation)

Table 3 Effect of EB/CB pattern (summary)

	Minimum Headway		(A) - (B)
	Conventional (A)	Proposed (B)	
Station A ↓ Station B	2 min. 14 sec.	2 min. 02 sec.	12 sec
Station D ↓ Station E	2 min. 20 sec. (140 sec.)	2 min. 01 sec. (121 sec.)	19 sec

ン採用による運転時隔短縮の効果は $140 - 121 = 19$ 秒といえる。

A 駅 → B 駅の場合も含めてまとめると Table 3 のようになる。

5.2 列車後部検知細分化による効果

Fig. 8 は列車後部検知細分化を採用した場合の列車間の関係を示したものである。図は 130 秒の時隔で作図されているが 14 秒の余裕があるため最少運転時隔は 116 秒である。EB/CB パターンによる効果を除くと列車後部検知細分化の効果は $121 - 116 = 5$ 秒である。

5.3 地上装置にインテリジェンスを持たせる効果

先行列車の遅れのため続行列車が駅の手前で信号停止し、停止直後に信号が解除され列車は起動・加速の後駅に到着するというケースをとりあげる。D 駅 → E 駅間

Fig. 8 Effect of subdivided train tail detection (simulation)

でこのような運転を行なった場合地上装置にインテリジェンスがないと駅間走行に 176 秒を要する。

同じ条件で地上装置にインテリジェンスを持たせた場合、列車は修飾速度インテリジェンス情報を受け減速・惰行の後 A 点 (Fig. 3) に 21 km/hr の速度で進入する。先行列車の移動に伴い予測どおりここで信号が解除されると列車は再力行の後駅に到着する。この場合の駅間走行に必要な時間は 170 秒である。すなわち、このケースでは $176 - 170 = 6$ 秒の改善効果がある。

5.4 製作した装置の動作

製作した装置は地上装置・車上装置共各一式であり、これを装備して単列車で走行試験を行なった結果、装置は目的通りの制御を行なうことが確認された。

5.5 安全性とフェイルセーフ性

本方式では、従来の ATC, ATS システムとの両立性を保つように、EB パターン系を安全性とフェイルセーフ性についての従来からの技術思想と手法をそのまま取り入れて構成している。CB パターンは列車から見て EB パターンより手前にあるため、通常の正常な状態では列車は常に CB パターンの制御のみを受ける。しかし万一 CB パターン系に異常が生じたとき列車は CB パターンを超えて EB パターン系の制御を受ける。EB パターン系は先に述べたように構成されているのでシステム全体としては従来と同程度の安全性とフェイルセーフ性を保有することになる。

6. おわりに

シミュレーションと実機での試験により次のことが明らかとなった。

- (1) 地上から多段の ATC 制限速度信号を列車に送り、列車速度がこれを超えたとき列車が停止するまで緩まないブレーキを作動させることを基本とし (EB パターンによる制御)、このパターンの内側に列車

速度を自動制御するパターン（CBパターン）を設けて制御を行なうことは有効である。一例では現行ATCで最少運転時隔140秒の駅間を19秒短縮して121秒とすることができる。

- (2) さらに列車後部検知を細分化することにより上記121秒を5秒短縮して116秒とすることができる。
- (3) 地上装置に制限速度が解除される時刻を予測する機能をもたせ、その時点で適切な再力行に移れるようあらかじめ抑速して進入する方式を採用することにより、一例では先行列車の遅れによる続行列車の遅れの波及を6秒くらいとめることができる。
- (4) 実機の製作と現車での試験を通して実用に供しうるシステムが実現できる。

上記(1)(2)による効果は $(19+5)/140=17\%$ であり、これは鉄道事業者にとってみれば線路容量が17%向上した事に相当し、利用者にとってみれば待ち時間が17%短縮された事に相当する。

都市交通における輸送力増強は重大な課題であるので、今後更に新技術を駆使して改善を重ね、理想である移動閉塞に一步でも近づけたいと考えている。

なお、本研究は財団法人日本船舶振興会（会長 笹川良一）の補助事業として、社団法人日本鉄道技術協会（会長 長濱正雄）の開発部会に設置された研究委員会で実施されたものである。本研究の遂行に当って格別の御配慮と御指導をいただいた委員各位ならびに社団法人日本鉄道技術協会 山田秀三前専務理事 同真宅正博専務理事 同竹林宏計画部長に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 根津，他：ATS 特集号；信号保安，22 巻，10 号，pp. 2～65 (1967)
- 2) 高木，他：ATC 特集号；信号保安，31 巻，10 号，pp. 2～64 (1976)
- 3) 大島，小野関：高密度運転線区に適用する列車制御システム；JREA，30 巻，11 号，pp. 20～26 (1987)
- 4) 生井：東武鉄道の ATS；信号保安，22 巻，10 号，pp. 11～15 (1967)
- 5) 寺門：西武鉄道の ATS；信号保安，22 巻，10 号，pp. 61～65 (1967)
- 6) 大島，関野，安信：予見フェージ制御方式による自動列車運転装置の実現；電気学会論文誌 C，109 巻，5 号，pp. 337～344 (1989)
- 7) 能見，安信，井原，藤倉，高岡：軌道輸送システムの設計評価シミュレーション JUMPS；第 14 回鉄道におけるサイバネティクス応用国内シンポジウム論文集，pp. 23～27 (1977)
- 8) 宮本，井原，刈谷，今泉，大島：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 巻，10 号，pp. 59～64 (1978)